

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
ARQUITETURA E URBANISMO**

**Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço  
com fibra de carbono**

**Marcio Vinicius Marini**

**Orientador: Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa**

**Co-orientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior**

Dissertação de Mestrado apresentada à Banca Examinadora da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Estruturas.

Campinas  
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M338a Marini, Marcio Vinicius  
Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço com fibra de carbono / Marcio Vinicius Marini. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientadores: Derval dos Santos Rosa, Armando Moreno Lopes Junior.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Aderências. 2. Concreto. 3. Fibras de carbono. 4. Rugosidade. I. Rosa, Derval dos Santos. II. Lopes Junior, Armando Moreno. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Título em Inglês: Evaluation of the adhesion between concrete and strengthening system with carbon fiber

Palavras-chave em Inglês: Adhesion, Concrete, Carbon fibers, Roughness

Área de concentração: Estruturas

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Nilson Tadeu Mascia, Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs

Data da defesa: 01/04/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

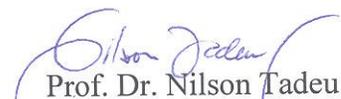
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

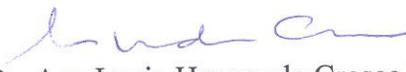
**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO E O SISTEMA  
DE REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO**

**Marcio Vinicius Marini**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

  
Prof. Dr. Deryal dos Santos Rosa  
Presidente e Orientador(a)/Universidade Federal do ABC

  
Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia  
Universidade Estadual de Campinas

  
Prof. Dr. Ana Lucia Homce de Cresce El Debs  
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Campinas, 01 de abril de 2011

## Agradecimentos

Meus agradecimentos nesta fase serão, primeiramente, aos meus familiares: Norberto Marini, Maria Jose Ricci Marini, tia Márcia Marini e ao meu irmão e companheiro Fabio Luis Marini, por estarem ao meu lado nesta jornada de minha pesquisa.

À minha noiva Rafaela Oliveira Campanha por apoiar e compreender este período de dedicação, e superar algumas ausências de minha parte.

Agradecer o apoio da equipe do Laboratório da Engenharia Civil da FEC: Marcelo, Rodolfo, Fabio, Marçal e, principalmente, o Luciano Passos.

Agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa, ao co-orientador Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior, Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia e a Prof. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha, por acreditarem em mim, enriquecerem os meus conhecimentos e pela contribuição para a conclusão deste trabalho de mestrado.

Ao engenheiro calculista Caruzo, pela flexibilidade, ensinamento e apoio nesta pesquisa.

Ao meu tio, Prof. Alfeu de Marco, (*in memorian*), um incentivador da educação.

À minha prima Lívia Ricci, pela força e correção no português e inglês.

À empresa BASF, aos engenheiros José Eduardo Granoto e Marcos Lima, pelas doações de matérias e laboratório.

À empresa Taylor Robson, aos engenheiros Marcello e Oscar e ao técnico Ney, pelos equipamentos e participação nas análises.

À Deus, por me dar força, garra e dedicação nos momentos críticos.

## Resumo

Marini, Marcio V. **Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço com fibra de carbono.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 103 p, 2011.

O reforço de estruturas de concreto armado ou protendido têm sido necessário na construção civil devido às falhas causadas por erros em projetos e execuções de obras, corrosões de armaduras, reabilitação após incêndios ou mudanças na utilização das estruturas projetadas. Os métodos convencionais para reforço de estruturas de concreto estão relacionados ao reforço pela adição de barras de aço e de concreto na estrutura ou, ainda, pela instalação de chapas de aço. O uso de fibras de carbono para reforços estruturais é recente, apresentando vantagens em relação aos métodos tradicionais, tais como: fácil manuseio na aplicação, alta aderência entre as fibras de carbono e o concreto e aumento na resistência à corrosão. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a aderência entre o sistema de reforço com as fibras de carbono e concretos com resistência à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa. A aderência concreto/fibra foi avaliada por meio de ensaios *pull-out* em pequenas placas de concreto com fibras de carbono aplicada superficialmente. Do concreto, foram obtidos resultados de sua porosidade e rugosidade; por meio de estereomicroscopia, foram avaliadas características como a textura superficial. Os resultados demonstraram que os concretos com menor relação água/cimento (*a/c*), ou seja, com maior resistência à compressão apresentaram maior aderência entre si e o sistema de reforço com fibras de carbono e menores valores de porosidade e rugosidade com maior homogeneidade superficial. Em relação aos concretos com maior relação água/cimento (*a/c*), observou-se o comportamento inverso nas propriedades citadas. De acordo com esses resultados, pôde-se concluir que a resistência à compressão do concreto (substrato) alterou a resistência de aderência com o sistema de reforço com fibras de carbono e também a porosidade; a rugosidade e a característica de superfície não influíram significativamente nestas propriedades.

**Palavras-Chave:** Aderência, Reforço em estrutura, Concreto e Fibras de carbono.

## **ABSTRACT**

Strengthening of conventional or prestressed concrete structures has been used due to failure occurred by design errors, erroneous methods and executives process, corrosion of steel bars of concrete pieces, rehabilitation after damages caused by fire or variations of structure type utilization. Conventional strengthening methods of concrete structure are used adding new steel bars to structure or installing steel plates. However more recent reinforcement methods based on carbon fiber use had been demonstrated advantages, such as: easy and fast application to substrate, high adhesion between carbon fiber and concrete and method to increase corrosion of bars of concrete structures. Thus, this work aims to evaluate adhesion process between strengthening concrete system employing carbon. In the experimental study was used concrete specimens with compressive strength of 15 MPa, 40 MPa and 60 MPa. The interface adherence of concrete/fiber was evaluated through pull-out test type on concrete slabs, where carbon fiber was superficially applied. Results of concrete porosity and roughness were obtained through a stereo microscope that assesses characteristics as the superficial texture. The obtained results showed that concretes with lower water/cement ratio (w/c) had higher values of adhesion between carbon fiber and concrete, lower porosity values and higher superficial homogeneity. Opposite behavior was observed in concretes with higher water/cement ratio (w/c). According to the obtained results was possible to note that the compressive strength concrete (substrate) modified the adherence resistance between concrete and carbon fiber, where higher compression strength increased adherence between concrete and carbon fiber. Also the results indicated that both the concrete surface characteristics and the roughness were not influenced significantly.

**Keywords:** Adhesion, Structural Strengthening, Concrete and Carbon Fiber.

## Sumário

Resumo.....	VI
Abstract.....	VII
Lista de Figuras.....	XII
Lista de Quadros.....	XV
Lista de Tabelas.....	XVI
1-Introdução.....	01
1.1-Objetivos e justificativas.....	02
1.1.1-Objetivos gerais.....	02
1.1.2-Objetivos específicos.....	03
1.1.3-Justificativa.....	03
2-Compósito de fibras de carbono e concreto.....	05
2.1-Fibras de carbono.....	05
2.2-Compósito de fibra de carbono.....	06
2.3-Adesivo.....	08
2.4-Resina .....	08
2.5-Concreto.....	11
2.6-Porosidade do concreto.....	12
2.7 -Rugosidade.....	13
2.8-Mecânica da Fratura.....	13

2.9-Pesquisas experimentais sobre reforço com fibra de carbono.....	15
3-Sistemas de reforço estrutural empregados no Brasil.....	19
3.1-Características dos principais sistemas de reforço estrutural com fibra de carbono empregados no Brasil.....	19
3.1.1-Preparação do substrato.....	20
3.1.2-Aplicação do adesivo epóxi.....	21
3.1.3-Aplicação da fibra de carbono.....	22
3.1.4-Aplicação da resina de impregnação.....	22
3.2-Campos de aplicação de fibra de carbono.....	26
3.3-Vantagens e desvantagens do emprego de reforço estrutural com fibra de carbono.....	27
4-Metodologia e caracterização dos materiais.....	30
4.1-Materiais.....	31
4.1.1-Cimento Portland.....	31
4.1.2-Agregados.....	33
4.1.3-Aditivo químico.....	34
4.2-Execução das misturas de concreto.....	35
4.3-Cura do concreto.....	37
4.3.1-Cura por imersão por 7 (sete) dias.....	37
4.4-Ensaio realizados.....	37
4.4.1- Resistência à compressão axial.....	37
4.4.2-Determinação da absorção total de água, índice de vazios e massa específica.....	38
4.4.3-Rugosidade do substrato de concreto.....	40
4.4.4-Análise da superfície do substrato de concreto.....	44

4.4.5-Metodologia para a aplicação da manta de PRFC.....	45
4.4.6-Ensaio de aderência do concreto.....	48
4.4.7-Propriedades do compósito de fibra de carbono.....	50
5- Apresentação e análise dos resultados.....	54
5.1 Propriedades mecânica do concreto.....	54
5.1.1-Resistência à compressão axial .....	54
5.1.2- Absorção de água.....	56
5.1.3- Índice de vazios.....	57
5.1.4- Massa específica seca, real e saturada.....	58
5.1.5- Rugosidade do concreto.....	60
5.1.6-Resistência de aderência.....	64
5.1.7-Análise morfológica do substrato de concreto.....	71
6-Conclusão.....	75
7-Referências.....	77
ANEXO 1 – Glossário.....	81
ANEXO 2 - Determinação da absorção de água, índice de vazios, massa seca, massa real e massa saturada.....	89
ANEXO 3 - Resultado de resistência de aderência.....	91
ANEXO 4 - Resultado do ensaio de rugosidade.....	92

ANEXO 5 - Gráficos de rugosidade.....93

ANEXO 6 - Dosagem do concreto: Quantitativo de materiais.....102

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Mecanismo de ruptura devido a esforços de ação de momento fletor e ação da força cortante .....	15
Figura 3.1 - Ilustração do sistema de reforço com fibra de carbono em estrutura de concreto.....	20
Figura 3.2 – Esquema do adesivo estrutural do sistema de reforço com fibra de carbono.....	22
Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos utilizados nesta dissertação.....	30
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	34
Figura 4.3 – Amostras cilíndricas e placas.....	36
Figura 4.4 – Amostras preparadas, a serem ensaiadas.....	36
Figura 4.5 – Amostras sendo submetidas em estufa.....	39
Figura 4.6 –Pesagem das amostras.....	40
Figura 4.7 – Esquema do campo de medição da rugosidade de cada amostra.....	41
Figura 4.8 – Ilustração do sistema de medição da rugosidade da linha média.....	42
Figura 4.9 – Sistema de medição da rugosidade Ra.....	42
Figura 4.10 – Sistema de medição da rugosidade Rz.....	43
Figura 4.11 – Rugosímetro e <i>software</i> – <i>Form Taysurf e Asphesic Form</i> .....	44
Figura 4.12 – Estereomicroscópio SMZ 800.....	45
Figura 4.13 –Materiais para aplicação do adesivo estrutural.....	46
Figura 4.14 - Ilustração do adesivo epóxi.....	47

Figura 4.15 - Ilustração da resina de impregnação – Saturante.....	47
Figura 4.16 –Manta na placa de concreto.....	48
Figura 4.17 – Equipamento do dinamômetro –DYNATESTE.....	49
Figura 4.18 –Amostras prontas para o ensaio.....	49
Figura 4.19 - Ilustração da colagem da chapa na placa de concreto.....	50
Figura 5.1- Resultados médios da resistência à compressão em função dos diferentes tempos de cura.....	56
Figura 5.2 – Resultados médios de absorção de água em função da resistência à compressão.....	57
Figura 5.3 – Resultados médios do índice de vazios em função da resistência à compressão.....	58
Figura 5.4 – Resultados médios de massa específica seca em função da resistência à compressão.....	59
Figura 5.5 – Resultados médios de massa específica real em função da resistência à compressão.....	59
Figura 5.6 – Resultados médios de massa específica saturada em função da resistência à compressão.....	60
Figura 5.7 - Média aritmética das amostras em função da rugosidade Ra.....	61
Figura 5.8 – Média aritmética das amostras em função da rugosidade Rz.....	62
Figura 5.9 – Variação da média aritmética do parâmetro de rugosidade Ra em função da resistência à compressão.....	63
Figura 5.10 – Variação da média aritmética do parâmetro de rugosidade Rz em função da resistência à compressão.....	64

Figura 5.11– Ilustração dos 5 tipos de rupturas entre o reforço com fibra de carbono e o substrato de concreto em seção.....	65
Figura 5.12 – Ilustração do tipo A.....	66
Figura 5.13 – Ilustração do tipo B.....	66
Figura 5.14 – Ilustração do tipo C.....	66
Figura 5.15 – Ilustração do tipo D.....	66
Figura 5.16 – Ilustração do tipo E.....	66
Figura 5.17 - Variação da média aritmética de resistência de aderência em função da resistência à compressão.....	69
Figura 5.18- Gráfico da variação da resistência do concreto em função da resistência de aderência.....	70
Figura 5.19- Variação da média da resistência de aderência em função da resistência do concreto.....	71
Figura 5.20 – Ilustração da superfície do concreto de 15 MPa.....	72
Figura 5.21 – Ilustração da superfície do concreto de 40 MPa.....	72
Figura 5.22 – Ilustração da superfície do concreto de 60 MPa.....	73
Figura 5.23 – Ilustração da superfície do concreto de 15 MPa.....	73
Figura 5.24 – Ilustração da superfície do concreto de 40 MPa.....	74
Figura 5.25 – Ilustração da superfície do concreto de 60 MPa.....	74

## Lista de Quadros

Quadro 3.1 – Características da fibra de carbono <i>Anchortec</i> .....	23
Quadro 3.2 – Características da fibra de carbono SIKA.....	24
Quadro 3.3 – Características da fibra de carbono BASF.....	25
Quadro 3.4 – Características da fibra de carbono <i>Mc-Bauchemie</i> .....	25
Quadro 4.1 – Propriedades físicas dos agregados .....	33
Quadro 5.1 - Os valores médios de resistência à compressão alcançados das amostras após 7, 28 e 76 dias de cura.....	55
Quadro 5.2 – Resistência de aderência e classificação dos tipos de rupturas no substrato 15MPa.....	68
Quadro 5.3 – Resistência de aderência e classificação dos tipos de rupturas no substrato 40MPa.....	68
Quadro 5.4 – Resistência de aderência e classificação dos tipos de rupturas no substrato 60MPa.....	69

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades da manta de (PRFC).....	08
Tabela 2.2 – Dados dos valores médios de resistência do adesivo de Malvar (2003).....	16
Tabela 2.3 – Dados dos valores médios de resistência a aderência de Galvez (2003).....	17
Tabela 3.1 – Custo da aplicação do sistema de reforço com fibras de carbono em vigas (2011).....	29
Tabela 4.1 – Propriedades físicas, mecânicas e químicas do cimento (CPII – E 32).....	32
Tabela 4.2 – Composição do cimento (CPII – E 32) .....	32
Tabela 4.3 - Propriedades da manta de PRFC-CF 130 F C elevada tração unidirecional .....	51
Tabela 4.4 – Propriedades da resina de imprimação TEC-POXI PR segundo fabricante .....	52
Tabela 4.5 – Propriedades da massa de regularização e colagem TEC-PUTTY, segundo o fabricante.....	53
Tabela 4.6 – Propriedades da resina de epoxídica TEC-POXI, segundo o fabricante.....	53

# 1

## Introdução

No ano de 1960, foram constatados problemas de corrosão na superfície das estruturas de concreto das pontes de rodovias, devido, por exemplo, à alta salinidade e ao clima agressivo, entre as soluções tradicionais, o reforço com chapas galvanizadas foi descartado, devido às reações de oxidação (ACI440, 1996). Na década de 70, a Administração Federal de Auto Estradas do EUA empenhou-se em pesquisas na busca de um novo material com resistência mecânica e resistente à corrosão (ACI 440, 1996). No início de 1980, a companhia *Pultrusion Internacional Grating* reconheceu a fibra de carbono como um produto eficaz e a ingressou na indústria de barras de Fibra de Carbono. Em 1986, surgiu, na Alemanha, a primeira ponte rodoviária do mundo onde foi utilizada esta fibra para reforço de sua estrutura. Os governos dos EUA e do Canadá investiram na tecnologia deste material inovador. Neste tipo de reforço, a fibra de carbono toma a forma de barras, cabos, grelhas em camadas e, até, placas (ZHAO *et al.*,2010).

No sistema de reforço com fibra de carbono há uma interface entre dois materiais, fibra de carbono e concreto, por onde ocorre a transmissão da tensão da estrutura de concreto para a fibra de carbono (reforço). Essa tensão propaga-se na forma de tensão de cisalhamento na interface (na região do adesivo) entre o concreto e os polímeros reforçados com fibras de carbono. (WOO *et al.*,2010). A resistência do substrato deve ser avaliadas para a determinação de sua capacidade para receber o reforço de sistema CFC. A resistência do substrato de concreto é, portanto, um parâmetro importantíssimo; devem possuir suficiente resistência à tração e ao cisalhamento para transferência de esforços para o sistema CFC. Para garantir o

funcionamento do sistema de reforço com fibra de carbono, indica-se a resistência mínima do concreto (substrato) de 17MPa e resistência de tração no mínimo 1,4MPa (ACI 440.2R, 2002).

Desde 1991, tem sido pesquisado o reforço em estruturas de concreto com a colagem de polímero contendo fibra de carbono. Os estudos têm mostrado que a resistência do concreto (substrato) e o tratamento da superfície influenciam na resistência de aderência (SUBRAMANIAM *et al.*, 2007 e STEPHEN KURTZS, 2008).

A alta resistência do concreto influencia na adesão do adesivo estrutural com a fibra de carbono e ocasiona o descolamento prematuro, antes que se atinja o estado limite máximo da estrutura (SILVA, 2001 e PASSOS, 2002). Além disso, o tratamento da superfície é importante para aumentar a rugosidade do substrato, o que garante maior área de contato do adesivo epóxi, implicando em maior resistência de aderência. (BERAHOU *et al.* 2006).

Estudos experimentais e computacionais comprovam que o sistema de reforço com fibra de carbono é eficiente em estruturas de concreto, no entanto, estes estudos não se aprofundam na análise das características físicas deste substrato, sendo que estas influenciam na aderência entre o sistema de reforço e o concreto (BENGAR *et al.* 2010).

## **1.1 Objetivos e justificativas**

### **1.1.1 Objetivos gerais**

Este trabalho tem por objetivo avaliar a aderência entre o sistema de reforço com fibra de carbono e os concretos com resistência à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa, além de analisar os tipos de rupturas ocasionados nestes sistemas. Pretende-se, ainda, identificar as características físicas do substrato – a porosidade, a rugosidade e a análise morfológica de superfície.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Analisar a influência das propriedades físicas dos concretos, como porosidade e rugosidade, na aderência entre o reforço com fibra de carbono e os diferentes substratos de concretos;

- Avaliar a morfologia da superfície dos diferentes substratos e relacioná-la com a resistência à compressão e aderência;

- Relacionar o efeito da resistência à compressão do substrato na aderência com sistema de reforço com fibra de carbono; e

- Classificar os tipos de rupturas entre o sistema de reforço com fibra de carbono nos diferentes concretos.

### **1.1.3 Justificativa**

São várias as justificativas que motivaram a realização desta dissertação. Entre elas:

- Ocorrência crescente de problemas patológicos em projetos, execuções e mudanças na utilização das estruturas;
- O método tradicional de reforço de estrutura em concreto envolvendo a instalação de chapas de aço na extremidade inferior do elemento apresenta problemas decorrentes de aderência entre o concreto e a chapa de aço;
- A procura de novos tipos de reforços de estruturas de concreto com características de leveza, elevada resistência e, principalmente, boa aderência;

- Estudos experimentais comprovam que o sistema de reforço com fibra de carbono é eficiente em estruturas de concreto armado, no entanto, estes não apresentam estudos específicos da influência das características físicas do concreto (porosidade, rugosidade, resistência à compressão e característica de textura da superfície) sobre a resistência de aderência entre os concretos de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa.

# 2

Neste capítulo, serão apresentadas as propriedades e características dos materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa experimental.

### 2.1 Fibras de carbono

As fibras de carbono são produzidas por extrusão de um polímero em um filamento contínuo. Esse processo de produção consiste na carbonização de fibras orgânicas de poliacrilonitrila (PAN) ou alcatrão (PITCH), subproduto da destilação do petróleo. Normalmente, há uma oxidação dessas fibras a elevadas temperaturas (entre 350 e 1600°C) em uma atmosfera de gás inerte para remover o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio e outras substâncias contaminantes. As propriedades mecânicas das fibras de carbono podem ser modificadas em seu tratamento térmico que chega a alcançar temperaturas entre 1300 a 3000°C. Após o processo térmico das fibras, estas apresentam átomos de carbono alinhados ao longo da fibra precursora; quanto maior a temperatura no processo industrial maior será o módulo de elasticidade da fibra.

Fibras de carbono com módulo de elasticidade de cerca de 230 GPa são conhecidas como fibras de alta resistência (AR), no entanto, ainda são consideradas de baixo módulo. As fibras de alto módulo (AM) têm valores que variam de 480 a 700 GPa desta propriedade. Melhorias significativas nas propriedades mecânicas das fibras de carbono estão sendo realizadas em alguns laboratórios de pesquisa e podem vir a ser incorporadas, no futuro, aos produtos de reforço que chegarem ao mercado. (SILVA, 2001; MACHADO, 2006).

As fibras de carbono possuem características, tais como:

- Elevada resistência mecânica;
- Resistência a ataques químicos - resistência à corrosão - por ser um produto inerte;
- Ótima resistência à fadiga e à atuação de cargas cíclicas;
- Leveza;
- Boa estabilidade térmica e reológica; e
- Flexibilidade.

## **2.2 Compósito de fibra de carbono.**

O compósito consiste de dois ou mais materiais que são combinados buscando as melhores propriedades de cada material. Estes compósitos foram desenvolvidos pela engenharia e pelas outras áreas da ciência para desenvolver novas aplicações exigidas pela sociedade (CALLISTER JR.,1994).

Os polímeros são materiais constituídos por muitas dezenas de milhares de unidades de repetição denominada de monômeros, já os reforçados com fibras (PRF), ou fiber reinforced polymers (FRP), são constituídos por um componente estrutural (as fibras) e por um componente matricial (a resina polimérica) e, geralmente, por algumas (*fillers*) e aditivos. O desempenho de um PRF é determinado pelas propriedades e características dos materiais que o constituem e pela interação entre os destes, o que explica a enorme versatilidade dos compósitos. (AGUIRRE, 2010).

Compósito de fibra de carbono pode ser apresentado na forma de laminados, cordões, folhas flexíveis unidirecionais e tecidos bidirecionais, pré-impregnados ou não. Comercialmente, as fibras são mais empregadas na forma de folhas flexíveis pré-impregnadas. A espessura e o formato em “folhas” permitem a fácil moldagem do conjunto a diversas formas geométricas de superfície receptora, ou seja, o elemento estrutural a ser reforçado.

O compósito de fibra de carbono é constituído por feixes de fibras de carbono agrupadas de forma contínua em uma tela impregnada com quantidades mínimas de resina polimérica, que pode ser uma epoxídica. (GALVEZ, 2003).

Entende-se, segundo CALLISTER JR. (1994), que:

- A *matriz polimérica* promove a união das fibras umas às outras, protege a superfície da fibra contra abrasão mecânica e tem como propriedade predominante a ductilidade;
- O *elemento estrutural* é constituído pelas fibras de carbono, dispostas unidirecionalmente na matriz polimérica e apresenta elevada resistência mecânica.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais características / propriedades da manta de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC).

Tabela 2.1 – Propriedades da manta de (PRFC).

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Módulo de Elasticidade	GPa	231
Tensão de tração admissível	MPa	3.650
Limite de deformação	%	1,4
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,76
Coefficiente de Dilatação Térmica	°C	10 <sup>-6</sup>

*Fonte: Carbon PAN-Carbon T-300 Unidirecional - Segundo a ACI 440R (1996)*

## 2.3 Adesivo

Adesivo é uma substância usada para colar as superfícies de dois materiais sólidos, produzindo uma junta que deverá, se o adesivo for bom, uma elevada resistência mecânica. As forças de ligação entre o adesivo e a superfície aderida são consideradas eletrostáticas, semelhantes às forças de ligação secundárias entre as cadeias moleculares em polímeros termoplásticos. Os adesivos poliméricos podem ser usados para colar uma variedade de combinações de materiais, entre eles: metal-metal, metal-plástico e metal-cerâmico. A principal desvantagem na utilização de adesivos é a limitação da temperatura de serviço (SILVA, 2001).

## 2.4 Resina

No Brasil, as resinas epoxídicas, derivadas do petróleo, são mais utilizadas em compósitos e aplicadas na construção civil, principalmente em obras de recuperação ou reforço de estruturas. Uma grande variedade de resinas é utilizada nos sistemas compostos: os

impreguintes primários (*primers*), os regularizadores de superfície (*putties*) e os saturantes (GALLARDO, 2002); (GODAT *et al.*, 2010).

Os impreguintes primários são utilizados com o objetivo de penetrar no substrato de concreto e funcionam como uma “ponte” de aderência para a resina de saturação. Os regularizadores de superfície são utilizados para o preenchimento de vazios e correção de imperfeições superficiais, visando uma superfície desempenada. As resinas de saturação são utilizadas para impregnação das fibras, que constituem o reforço estrutural dos compostos, fixando-as no local e garantindo um meio de transferência das tensões entre as mesmas.

A primeira resina epóxi foi resultante da combinação da epocloridina e do bisfenol A. De acordo com as proporções utilizadas de cada um destes componentes, torna-se possível a obtenção de resinas com diferentes propriedades, principalmente no que diz respeito a sua densidade e massa molar.

Para se conseguir a polimerização das resinas epoxídicas são utilizados catalisadores, em geral, à base de aminas ou poliaminas e poliamidas à temperatura ambiente, por possuírem hidrogênio ativo em suas moléculas. Outros materiais podem ser adicionados na fase inicial, como diluentes para diminuir a viscosidade e flexibilizadores para aumentar a resistência ao impacto da resina curada. Desta forma, obtêm-se produtos denominados de formulações epoxídicas, que são, em última análise, produtos realmente úteis aos trabalhos de recuperação e de reforço de estruturas de concreto.

As resinas epoxídicas podem ser curadas a diferentes temperaturas, chegando a 175°C, com o uso, ou não, de endurecedores.

De acordo com as proporções de resina e de endurecedor, e do tipo de endurecedor utilizado, obtêm-se os produtos mais apropriados para determinadas aplicações. Estas formulações têm boa aderência à maioria dos materiais, como o concreto, argamassas e aço, mas não aderem as superfícies sujas de ceras, óleos ou a materiais em desagregação.

Às resinas epoxídicas, provém ainda as seguintes características:

- Grande variedade de propriedades mecânica e física obtida devido à diversidade de materiais que podem ser adicionados à mistura;
- Não emissão de monômeros voláteis durante a cura ou processamento;
- Ausência, quase total, de retração durante a cura, garantindo a integridade da superfície de ligação; boa adesão a fibras e substratos; e
- Preenchimento de vazios.

A resina influi muito pouco na resistência à tração final do compósito, mas influi bastante no comportamento do mesmo ao cisalhamento e na resistência à compressão. A grande influência da resina nas condições de fabricação do compósito se dá dependendo da viscosidade, ponto de fusão e temperatura de cura. Mais especificamente, as características exigidas às resinas epóxi com função resistente são:

- Módulo de elasticidade da ordem dos 2 GPa;
- Baixa retração durante o processo de cura;
- Estabilidade frente a agentes químicos;
- Boa capacidade de adesão as fibras; e
- Boa adesão ao substrato em que será aplicada.

Aos adesivos de epóxi usados para colagem de laminados ao substrato, por serem mais espessos, é indispensável à apresentação de um elevado módulo de elasticidade, (aproximadamente 7 GPa), em especial, esforços de cisalhamento, de forma a garantir a sua transmissão entre os elementos colados (GALLARDO, 2002).

## 2.5 Concreto

O concreto é classificado como um material cerâmico e composto por elementos metálicos e não metálicos. Eles são freqüentemente óxidos, nitretos e carbetos.

O termo “cerâmico” vem da palavra grega *keramikos* - “matéria-prima queimada”. Isto indica que as propriedades desejáveis desses materiais são normalmente atingidas por meio de um tratamento térmico à alta temperatura conhecido por ignição. Estes materiais são isolantes térmicos e elétricos, são resistentes a elevadas temperaturas e a ambientes abrasivos, além de apresentarem elevados valores de resistência à compressão e baixa resistência à tração (CALLISTER JR.,1994).

O concreto, aplicado em sistemas estruturais, é constituído de cimento, areia, brita e água e apresenta uma densidade de 25 kN/m<sup>3</sup>.

O tipo, a quantidade, o tamanho, a forma a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua estrutura. Os elementos graúdos da estrutura de um material podem ser vistos facilmente, enquanto os mais finos são visualizados com auxílio de um microscópio. O termo macroestrutura é geralmente empregado à estrutura grosseira, visível à vista humana, o que significa 1/5 de milímetro (200µm). “O termo microestrutura é empregado para a porção aumentada microscopicamente da macroestrutura da ordem 10<sup>5</sup> vezes, através da técnica de microscopia eletrônica de varredura tornando possível analisar a estrutura numa fração de micrometro” (METHA & MONTEIRO, 1994).

## 2.6 Porosidade do concreto

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante, segundo engenheiros projetistas e de controle de qualidade. Existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência de sólidos que, para materiais homogêneos simples, pode ser descrita com a expressão (WINSLOW, 1989).

$$f = f_0 e^{-kp} \quad (2.1)$$

onde:

$f$  = resistência à compressão do material;

$f_0$  = resistência intrínseca para porosidade zero;

$k$  = constante de correlação entre porosidade e resistência;

$p$  = porosidade do material.

A porosidade do concreto é uma das características físicas que mais interfere nas propriedades deste material. Ela é representada pela fração do volume total de uma amostra porosa, ocupada por poros ou por espaços vazios.

O tamanho e a continuidade dos poros na estrutura do sólido determinam a sua permeabilidade. A permeabilidade é definida como a facilidade com que o fluído pode escoar por meio de um sólido (METHA & MONTEIRO, 1994).

Vários fatores governam a porosidade do concreto, entre eles, pode-se citar: os teores de sólidos do concreto, como o cimento ou aglomerante, o fator de empacotamento dos componentes e a relação água/cimento, ou seja, a presença de água evaporável e o grau de hidratação (LOEDOLFF, 1987), (MINDESS, 1984).

## **2.7 Rugosidade**

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, de pequenas saliências e reentrâncias, que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades (erros micro geométricos) podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos (Rugosímetro). A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos dos materiais e é muito utilizada na engenharia mecânica, pois influi na:

- Resistência ao desgaste;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras; e
- Resistência à corrosão e à fadiga. (SUBRAMANIAM *et al.*,2007).

## **2.8 Mecânica da Fratura**

Os mecanismos de ruptura ou também denominado mecânica da fratura acontecem de formas previsíveis no material solicitado em função do tipo de carregamento submetido. Em compósitos de fibra de carbono, a mecânica da fratura não é diferente, onde cada tipo de carregamento ocasiona uma fratura distinta. A compressão e identificação do tipo de ruptura são essenciais para o estudo do comportamento dos elementos reforçados, para o

desenvolvimento de critérios de dimensionamento e parâmetros na aplicação. (SALLABERRY, 2005).

Os principais tipos de fratura comuns em compósitos de fibra de carbono são descritos abaixo;

- ruptura por esmagamento do concreto: a fissuração da peça se desenvolve diminuindo a zona comprimida, até o momento no qual a tensão de compressão no concreto atinge seu valor máximo, acarretando ruptura brusca dessa região;
- ruptura por força cortante: a fissura ocorre no extremo do reforço e se desenvolve de forma inclinada, ao longo da altura da viga devido à transferência das tensões tangenciais para os extremos do compósito de fibra de carbono. Geralmente, ocorre em vigas com armadura transversal insuficiente;
- ruptura por separação do substrato de concreto: esse tipo de ruptura ocorre quando um valor excessivo para a espessura do reforço é adotado, gerando um acréscimo de tensões na extremidade e caso essas tensões ultrapassem a tensão de aderência admissível adesivo-concreto, o reforço separa inicialmente seu extremo, reduzindo seu comprimento efetivo, provocando uma ruptura horizontal devido ao aumento imediato da tensão de separação, representando uma ruptura brusca. Pode ocorrer também por falha na aplicação ou por escolha inadequada do adesivo;
- Os mecanismos de ruptura da ligação são do tipo frágil e resultam no destacamento localizado do compósito (*peeling off*), a partir de sua zona de ancoragem ou de zonas com fissuração excessiva, como pode ser observado na Figura 2.1. Este tipo de ruptura pode ser dividido em três categorias, de acordo com a região e a solicitação que a produz, isto é, descolamento no extremo do reforço proveniente da força cortante,

descolamento na região de momento fletor máximo e descolamento iniciado por uma fissura de cortante numa região de momento fletor de magnitude média.

(TRIANTAFILLOU, 1998; SUBRAMANIAM *et al.*, 2007).

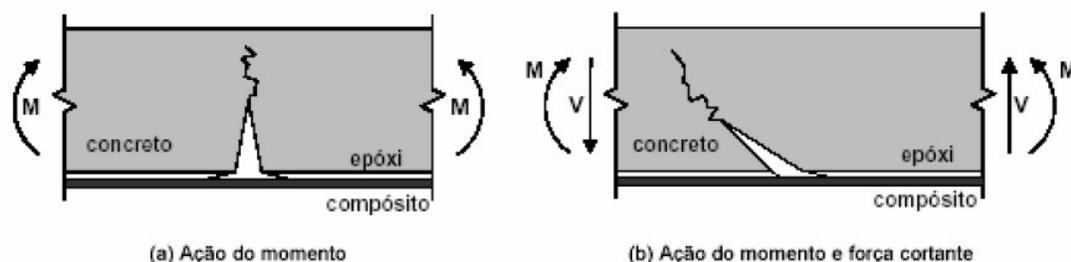


Figura 2.1 – Mecanismo de ruptura devido a esforços de ação de momento fletor e ação da força cortante.

## 2.9 Pesquisas experimentais sobre reforço com fibra de carbono

Resumos de alguns trabalhos que utilizaram reforço com fibra de carbono e suas principais contribuições e conclusões são apresentados neste item.

(MALVAR *et al.*,2003) O objetivo da pesquisa realizada foi avaliar o efeito da umidade relativa e temperatura na resistência do adesivo epóxi, usado na colagem do reforço com fibra de carbono. Avaliou-se o efeito do meio ambiente no estado normal e outro em condição acelerado com submissão de uma tensão. Foram ensaiadas duas condições sendo: (1) temperatura ambiente (23° C ou 73°F) e umidade relativa (50%); e (2) temperatura alta (35°C ou 95°F) e umidade relativa (95%). Dois adesivos epóxi foram usados S30 e o S32. Neste ensaio foi utilizado o *pull-out* para determinar a resistência do adesivo, nestas duas condições citada acima.Os resultados demonstraram que a temperatura e a umidade relativa, influem na resistência do adesivo epóxi. Os adesivos S30 e S32, sofreram perdas em suas resistências, conforme pode ser visto Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Dados dos valores médios de resistência do adesivo de Malvar (2003).

Adesivo	Resistência do adesivo (MPa)	Resistência do adesivo (MPa)	Perda
	(1) - T 23 °C - R 50 %	(2) - T 35 °C - R 95 %	(%)
S 30	17,5	3,67	79
S 30	14,7	4,70	68
S 30	15,6	4,56	71
S 30	16,0	4,31	73
S 32	3,26	1,98	39
S 32	3,70	1,14	69
S 32	3,88	1,95	50
S 32	3,61	1,69	53

(GALVEZ, 2003) Neste outro trabalho realizado foram preparadas amostras de PRFC na superfície de concreto das vigas, com diferentes combinações de colagem do adesivo estrutural. O ensaio foi realizado através do *pull-out*, que consiste em aplicar uma tensão de arranque perpendicular a superfície do reforço com fibra de carbono. As resinas utilizadas para avaliar a influência da combinação foram *Putty*, *Primer* e *Resina*. Foram determinadas 4 (quatro) combinações para colagem do reforço com fibra de carbono sendo:

Combinação 1 = *Putty* + Resina + Fibra

Combinação 2 = Resina + Fibra

Combinação 3 = *Primer* + *Putty* + Resina + Fibra

Combinação 4 = *Primer* + Resina + Fibra

Os resultados demonstraram que a combinação 3 (três) obteve a maior resistência de aderência entre as outras combinações. A combinação 2 (dois) que somente possui a resina apresentou a menor resistência de aderência, conforme pode ser observado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Dados dos valores médios de resistência de aderência de Galvez (2003).

<b>Combinação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Resistência de aderência (MPa)</b>
1	<i>Putty</i> + Resina + Fibra	3,50
2	Resina + Fibra	3,00
3	Primer + <i>Putty</i> + Resina + Fibra	3,75
4	Primer + Resina + Fibra	3,25

Houve assim uma diferença significativa nos valores de resistência em função do número de resinas combinadas. Usando todas as resinas recomendadas pelo fabricante, obteve um sistema de colagem 25% maior na sua resistência de aderência.

(CLELAND, 2007) Utilizou o ensaio de *pull-out* em amostras de concreto que buscou solucionar dificuldade de interpretação dos resultados, devido à heterogeneidade de interação que ocorre entre adesão e a coesão no substrato de concreto. O estudo visa resolver este problema através de um estudo probabilístico da adesão e coesão do concreto na interface. Neste estudo descreve um método na qual todas as médias de todas as falhas de adesão na interface podem ser combinadas fornecendo uma estimativa da “média teórica”. Nesta pesquisa foi avaliado ainda o tipo e a localização da fratura que ocorreu após o ensaio de *pull-out*. Foram utilizadas análises estatísticas para investigar a diferença entre “força média” e “média teórica”, esta diferença está relacionado com a proporção de todas as falhas que ocorrem na interface, isso depende da variabilidade (desvio padrão) de ambas as forças de adesão e coesão. O estudo estatístico da interação entre a adesão e coesão do substrato de concreto na interface, mostrou um erro entre a “média dos resultados experimentais” e a média teórica.

(A) A variação na força de adesão é significativa, ou seja, superior a 20%;

(B) A variação na força de coesão do substrato de concreto é baixa menor 12%.

(MALIK *et al.*,2010); (FITZWILLIAM *et al.*,2010) Uma investigação experimental foi conduzida com o intuito de estudar o comportamento de colunas confinadas com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) submetidas a cargas concentradas e excêntricas. Dezessete colunas foram moldadas com concreto de alta resistência com resistência à compressão de, aproximadamente, 140 MPa. As colunas não continham reforço de aço convencional, nem no sentido longitudinal tampouco no transversal. Para as amostras carregadas com carga concentrada, a falha ocorreu perto do carga máxima. Para as colunas excêntricas, a ruptura final foi repentina e explosiva. Não havia nenhuma evidência, no entanto, de que o uso de (PRFC) na direção aumentasse significativamente a força das colunas excêntricas.

(DEMIR *et al.*,2010) Nesta análise, dezoito amostras de concreto que receberam externamente polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) foram testadas sob compressão uniaxial com cargas diferentes. Os concretos possuíam resistência à compressão média. Todas as amostras apresentaram dimensões idênticas e o mesmo nível de confinamento. A taxa de carregamento e o nível de tensão aplicado sustentado foram os principais parâmetros de teste. A taxa de carga aplicada variou entre 0,0001 e 0,04 de deformação/min. Quatro níveis de tensão entre (0,52 e 0,85f (cc)) (0,90 e 1,4f (co)) foram usados em ensaios de fluência de curto prazo. Os resultados do teste mostraram que o comportamento tensão/deformação do concreto confinado (PRFC) foi influenciado pela alteração da taxa de carregamento, e proporcionou um aumento considerável no desempenho de fluência do concreto. Resultados obtidos em curto prazo nos ensaios de carga monotônica também foram comparados com os resultados de duas abordagens analíticas originalmente desenvolvidas para o concreto simples. Nenhuma das amostras falhou durante os ensaios de fluência em curto prazo. Os resultados dos ensaios de força residual mostraram que as amostras não tinham qualquer perda de tensão devido à carga longa duração

# 3

Diversos sistemas de reforço estrutural com fibra de carbono são empregados no Brasil. Esse capítulo tem por objetivo descrever os principais sistemas de reforço estrutural com fibra de carbono, visando levantar as principais similaridades e divergências entre os sistemas de reforço estrutural adotados no Brasil, com ênfase aos principais distribuidores do material no país.

No Brasil, são quatro as empresas credenciadas com a empresa MBT-*Master Builders Techológicas* do Japão: *Mc-Bauchemie*, *Anchortec* (antiga *Fosroc*), BASF e SIKA.

### **3.1 Características dos principais sistemas de reforço estrutural com fibra de carbono empregados no Brasil**

É importante salientar que, mesmo quando as condições de aplicação dos sistemas de reforços são esclarecidas de forma adequada, todos os processos executivos de aplicação destes devem estar de acordo com o projeto de recuperação estrutural realizado por um profissional devidamente qualificado. Todos os sistemas, de modo geral, consistem na aplicação de fibra de carbono na estrutura de concreto armado, seguindo as seguintes etapas, conforme pode ser ilustrado na Figura 3.1:

- Preparação do substrato;
- Aplicação do adesivo epóxi para “colagem” da fibra de carbono;
- Aplicação de fibra de carbono; e
- Aplicação da resina de impregnação sobre a fibra de carbono.

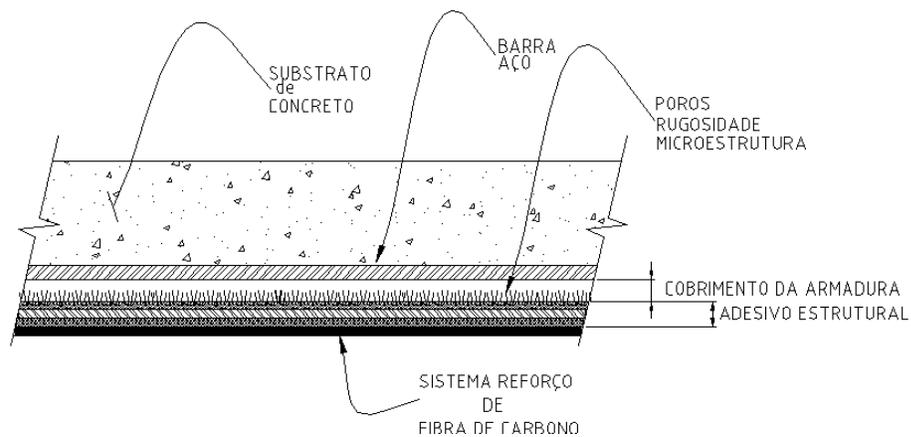


Figura 3.1 – Ilustração do sistema de reforço com fibra de carbono em estrutura de concreto.

### 3.1.1 Preparação do substrato

A preparação do substrato consiste na limpeza deste com o intuito de remover partículas soltas, óleos, graxas e outras substâncias ou agentes contaminadores. Entre os métodos empregados na limpeza, recomenda-se que não se utilize água, devido à não interatividade química com o epóxi.

Superfícies irregulares devem ser regularizadas com resinas de nivelamento à base de epóxi. Nos locais onde as fibras de carbono devem ser aplicadas em cantos, deve-se realizar o

arredondamento dos mesmos para a aplicação da fibra. Recomenda-se que o arredondamento dos cantos seja com raio mínimo de 2,5 cm. (MACHADO, 2006).

### 3.1.2 Aplicação do adesivo epóxi

A aplicação do adesivo epóxi para colagem da fibra de carbono no substrato deve ser realizada com o uso de desempenadeira metálica. O substrato deve estar seco e regularizado. A resina epóxi funciona como a cola para a aderência entre a fibra e o substrato.

É importante o tempo de utilização e de endurecimento da resina epóxica. O tempo de utilização (“*pot life*”) é o período em que a resina mantém suas características de aderência e esta pode ser manipulada sem dificuldade. O tempo de endurecimento (“*open time*”) é o tempo que a resina leva para endurecer, é o período no qual o material deve ser colado a fim de que possa desenvolver suas propriedades de forma satisfatória. Nos dois períodos, a temperatura ambiente é um fator decisivo, podendo acelerar as reações químicas e diminuir o tempo de manipulação. (SALLABERRY, 2005).

A maioria das resinas epóxi é fornecida em dois componentes (componente A – componente base; e componente B – componente endurecedor) que devem ser misturados mecanicamente (aproximadamente 3 minutos), pouco tempo antes da aplicação, em virtude do seu tempo de *pot life*, tempo útil de trabalhabilidade, ser pequeno. Esse tempo de trabalhabilidade da resina epóxi pode variar dependendo do fabricante, e possui o *pot life* médio, a 25 °C, de 50 minutos e, a 35 °C, aproximadamente, de 20 minutos.

A resina epóxi para colagem da fibra de carbono deve possuir característica de tixotropia para não escorrer quando aplicada em superfícies verticais ou na face inferior de vigas e lajes ou em pilares, quando em projetos de confinamento desses. A aplicação da resina epóxi deve possuir espessura mínima de 0,5 mm. (MACHADO, 2006).

### 3.1.3 Aplicação da fibra de carbono

Após a aplicação da resina epoxídica, deve-se iniciar a aplicação da manta de fibra de carbono impregnada com saturante, deixando-a sobre o elemento estrutural de concreto, conforme pode ser ilustrado na Figura 3.2.

### 3.1.4 Aplicação da resina de impregnação

Assim como a resina para fixação da fibra de carbono, a resina de impregnação é bi-componente e de base epóxi, ou seja, componente base e componente catalisador endurecedor.

Não possuir solventes, ter elevada resistência mecânica e ter elevada capacidade de impregnação são algumas das características da resina de impregnação.

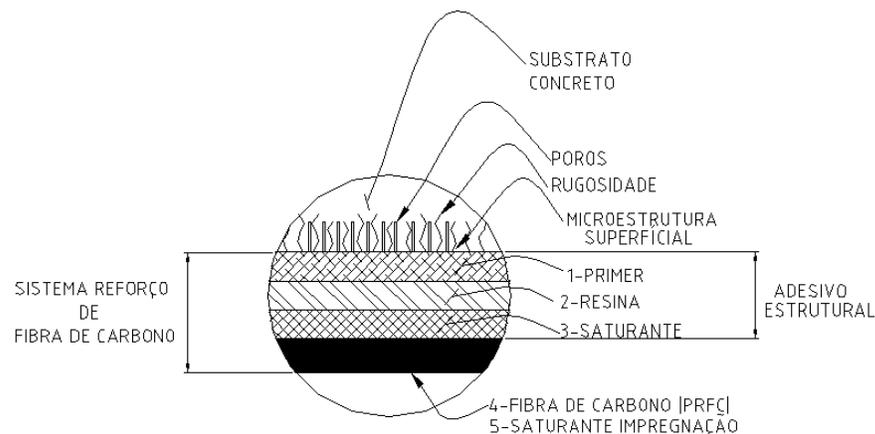


Figura 3.2 – Esquema do adesivo estrutural do sistema de reforço com fibra de carbono.

Diversos são os representantes que distribuem fibra de carbono no Brasil para reforços estruturais, assim como são fornecidas diferentes características das mesmas, conforme pode

ser observado nos quadros 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 (cada quadro representa as características fornecidas por cada representante).

Conforme pode ser observado no Quadro 3.1. o representante denominado *Anchortec* informa propriedades da fibra de carbono: massa específica, massa unitária, resistência à tração de projeto, módulo de elasticidade, alongamento na ruptura, entre outras.

<b>Produto</b>	<b>Fosfiber C – N200</b>	<b>Fosfiber C – N300</b>	<b>Fosfiber H – N300</b>
<b>Tipo</b>	<b>Alta resistência</b>	<b>Alta resistência</b>	<b>Alto módulo</b>
Massa unitária	200 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>
Massa específica	1,80 g/cm <sup>3</sup>	1,80 g/cm <sup>3</sup>	1,82 g/cm <sup>3</sup>
Espessura de Projeto	0,111mm	0,167 mm	1,165 mm
Resistência à tração	3.550 MPa	3.550 MPa	3.000 MPa
Módulo de elasticidade (E)	235 GPa	235 GPa	380 GPa
Alongamento na ruptura	1,5 ‰	1,5 ‰	0,8 ‰

Quadro 3.1 – Características da fibra de carbono *Anchortec*.

As diferentes unidades de cada propriedade são apresentadas em função da massa unitária (Fosfiber C – N 200 = 200g/m<sup>2</sup> e Fosfiber C – N 300 = 300 g/m<sup>2</sup>). Já a fibra de carbono Fosfiber C – H 300 apresenta massa unitária de 300 g/m<sup>2</sup>, módulo de tração superior às anteriores e módulo de deformação igual a 380 GPa.

O Quadro 3.1 apresenta as propriedades da fibra de carbono fornecida pelo representante denominado *Anchortec*. É possível observar que os dados fornecidos por este representante são bem semelhantes aos do representante *Mc-Bauchemie*, onde também são

apresentadas propriedades como massa unitária, resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento na ruptura, entre outras.

<b>Função</b>	<b>Reforço</b>
Base química	Carbono de alta resistência
Aspecto	Fibra
Largura da lâmina	610 mm
Espessura nominal	0,165 mm
Peso específico	300 g/m <sup>2</sup>
<b>Resistência à tração</b>	
Por unidade de área	3.800 MPa
Por unidade de largura	0,625 kN/mm/capa
<b>Módulo de elasticidade</b>	
Por unidade de área	227 GPa
Por unidade de largura	38 kN/mm/capa
Alongamento na ruptura	1,7‰

Quadro 3.2 – Características da fibra de carbono SIKA.

No Quadro 3.3 são apresentadas as características da fibra de carbono fornecidas pelo representante BASF. Como é possível observar, são apresentadas, como nas anteriores, módulo de elasticidade, alongamento na ruptura, resistência à tração, entre outras.

<b>Propriedades da fibra</b>	<b>Valores</b>
Resistência à tração ( $\sigma$ )	3.900 MPa (nominal)
Módulo de Elasticidade (E)	230 GPa
Alongamento na ruptura ( $\epsilon$ )	1,5‰ (nominal)
Gramatura	300 $\pm$ 15 g/m <sup>2</sup>
Espessura do tecido	0,166 mm
Densidade da fibra	1,79 g/cm <sup>3</sup>

Quadro 3.3 – Características da fibra de carbono BASF.

No Quadro 3.3 (representante BASF) são apresentadas, diferentemente dos demais representantes já descritos, as características da fibra na forma de compósito, isto é, as propriedades da fibra com adesivo epóxi *Mc-Bauchemie*. Os valores apresentados, assim como os apresentados pelo representante *Anchortec*, são em função da massa unitária da fibra.

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Módulo de Elasticidade (E)	GPa	235
Resistência à tração admissível	MPa	3.550
Limite de deformação	‰	1,5
Espessura da camada	mm	0,165
Densidade da Manta	g/m <sup>2</sup>	300

Quadro 3.4 – Características da fibra de carbono *Mc-Bauchemie*.

Em relação às propriedades citadas nos quadros 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 é possível observar as diferenças numéricas entre os valores apresentados. No Quadro 3.1, o módulo de elasticidade apresentado para a fibra de carbono com massa unitária igual a 300 g/m<sup>2</sup> é de 235

GPa (*Anchortec*); no Quadro 3.2, o módulo de elasticidade, também para massa unitária igual a 300 g/m<sup>2</sup>, é igual a 227 GPa (SIKA) e para a fibra de carbono de massa unitária de 300 g/m<sup>2</sup>, da *Mc-Bauchemie*, é de 235 GPa. As resistências à tração são de 3550 MPa (*Anchortec*), 3800 MPa (SIKA), 3550 MPa (*Mc-Bauchemie*) e 3900MPa (BASF).

Para os valores numéricos de alongamento na ruptura comparados com massas unitárias iguais a 300 g/m<sup>2</sup> dos mesmos fabricantes, têm-se, respectivamente, os valores de 1,5‰, 1,7‰, 1,5‰ e 1,5‰, não havendo uma diferença entre o primeiro e os dois últimos representantes, tendo apenas o representante SIKA uma diferença de 0,2% em relação aos demais.

### **3.2 Campos de aplicação da fibra de carbono**

Os principais campos da aplicação de fibra de carbono são:

- Reforço estrutural de alta resistência à tração em concreto armado e alvenaria;
- Redução na abertura de fissuras;
- Confinamento de pilares e vigas;
- Reabilitação da capacidade portante de estruturas deterioradas ou danificadas estruturalmente;
- Adequação às mudanças de utilização de elementos sujeitos ao aumento de cargas e/ou às mudanças de geometria;
- Adequação de estruturas a novas exigências normativas;
- Correção de erros de projeto e/ou execução;

- Frequentemente aplicado em pilares, vigas e lajes de pontes, de estruturas industriais, de estacionamentos e de edifícios em geral, em muros, estruturas aporticadas e reticuladas, em estruturas de subsolos de garagens, muros de arrimo, poços de elevador e paredes diafragma. Como reforço de estruturas em áreas com perigo de explosão, paredes cisalhadas por recalque diferencial ou por deformações térmicas, em tubulações, túneis, chaminés, entre outros;
- Prevenção de danos estruturais causados por terremotos; e
- Em obras de restauração ou reformas em geral.

Mesmo tendo diversos campos de aplicação da fibra de carbono como reforço estrutural, a correção de erros de projetos, a adequação às mudanças de utilização e a reabilitação da capacidade portante de estruturas deterioradas são as propriedades mais importantes de sua utilização.

### **3.3 Vantagens e desvantagens do emprego de reforço estrutural com fibra de carbono**

Têm-se como vantagens, no uso de reforços estruturais realizados com fibra de carbono, as descritas abaixo.

- Aumento das resistências à flexão, ao cisalhamento, à compressão, ao impacto, à fadiga;
- Manutenção de seções originais de peças reforçadas;

- Manutenção ou incremento de cargas de edificações;
- Facilidade no manuseio, instalação e limpeza da obra;
- Velocidade na execução do reforço;
- Qualidade nos reforços estruturais;
- Redução de custos com paralisações e manutenção;
- Utilização multifuncional para qualquer tipo de reforço; e
- Grande versatilidade em recuperações estruturais, em função de geometrias e elementos estruturais.

Por outro lado, as desvantagens no uso de reforços estruturais realizados com fibra de carbono são:

- Custo alto em relação aos métodos de reforços convencionais;
- Necessidade de mão de obra especializada para o dimensionamento e aplicação;
- Falta de confiabilidade entre engenheiros tradicionais;
- Não possui norma brasileira para aplicação e dimensionamento;
- Utilização em concreto com resistência à compressão superior à 15 MPa;
- A manta de fibra de carbono e os adesivos estruturais são importados;
- Material altamente flexível; e

- Resistência ao fogo é determinada pela qualidade da resina utilizada, a temperatura vítrea se situa entre 60° C a 80°C.

O custo da fibra de carbono pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Custo da aplicação do sistema de reforço com fibras de carbono em vigas (2011).

<b>Propriedade</b>	<b>Custo (R\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo Médio (R\$/m<sup>2</sup>)</b>
Módulo padrão	251,31 a 301,57	276,44

# 4

Neste capítulo serão apresentados os materiais, os procedimentos e as metodologias caracterização dos materiais que foram utilizadas no desenvolvimento desta dissertação. O fluxograma apresentado na Figura 4.1. ilustra os procedimentos adotados.

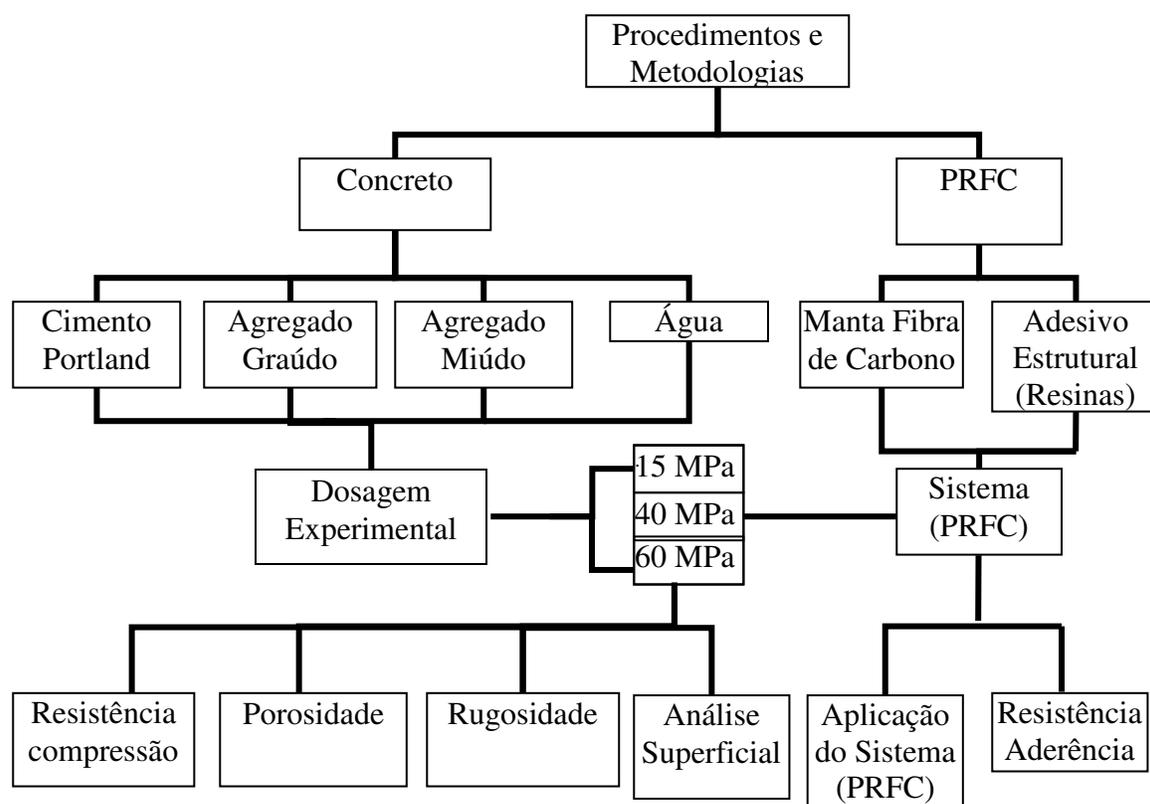


Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos utilizados nesta dissertação.

Os ensaios realizados buscam avaliar a aderência entre o sistema de reforço com a fibra de carbono em concreto com resistência à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa e analisar os tipos de rupturas ocasionadas neste sistema, além de estudar a porosidade, a rugosidade e a característica de superfície ou de textura, características físicas do concreto.

## **4.1 Materiais**

Para a pesquisa experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland Composto – CP II E– 32;
- Agregado graúdo: origem da região de Campinas – SP;
- Agregado miúdo: areia natural de rio;
- Aditivo superplastificante (Gleniun 51).

Todos os materiais foram selecionados e armazenados a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , visando manter suas propriedades iniciais, além de serem coletados de um único lote.

### **4.1.1 Cimento Portland**

No trabalho foi empregado Cimento Portland Composto, com adição de escória granulada de alto forno (CP II E-32), cujas propriedades físicas, mecânicas e químicas encontram-se nas tabelas 4.1. e 4.2.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas, mecânicas e químicas do cimento (CPII –E 32).

<b>Material</b>	<b>Propriedades</b>	
Cimento CP II E 32	Finura peneira #200-0,075 mm (%)	$\leq 12,0$
	Finura área específica (m <sup>2</sup> /kg)	$\geq 260$
	Tempo de início de pega (h)	1
	Expansibilidade a quente (mm)	$\leq 5$
	Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	$\geq 10,0$
	Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	$\geq 20,0$
	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	$\geq 32,0$
	Resíduo Insolúvel (RI)	$\leq 2,5$
	Perda ao fogo (PF)	$\leq 6,5$
	Óxido de magnésio (MgO)	$\leq 6,5$
	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	$\leq 4,0$
	Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	$\leq 5,0$

Tabela 4.2 – Composição do cimento (CPII –E 32).

<b>Composição – Componentes (% em Massa)</b>				
<b>SIGLA</b>	<b>Clinker +sulfato de cálcio</b>	<b>Escória Granulada de alto forno</b>	<b>Material Pozolânico</b>	<b>Material Carbonático</b>
CP-II E	94-56	6-34	0	0-10

### 4.1.2 Agregados

Areia natural de rio, adquirida na região de Campinas, São Paulo, foi utilizada como agregado miúdo.

No agregado miúdo, foram realizados ensaios de composição granulométrica de acordo NBR 7211 – NBRNM 248 (2003a), massa específica - NBRNM 52 (2003b) e massa unitária - NBRNM 45 (ABNT, 2003c).

As propriedades físicas dos agregados miúdos e graúdos podem ser observadas no Quadro 4.1 e Figura 4.2.

Material	Propriedades	Resultados
Agregado miúdo	Módulo de finura (%)	2,2
	Dimensão máxima característica (mm)	2,4
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,6
	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,6
Agregado Graúdo	Dimensão máxima característica (mm)	19,0
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,9
	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,6

Quadro 4.1 – Propriedades físicas dos agregados.

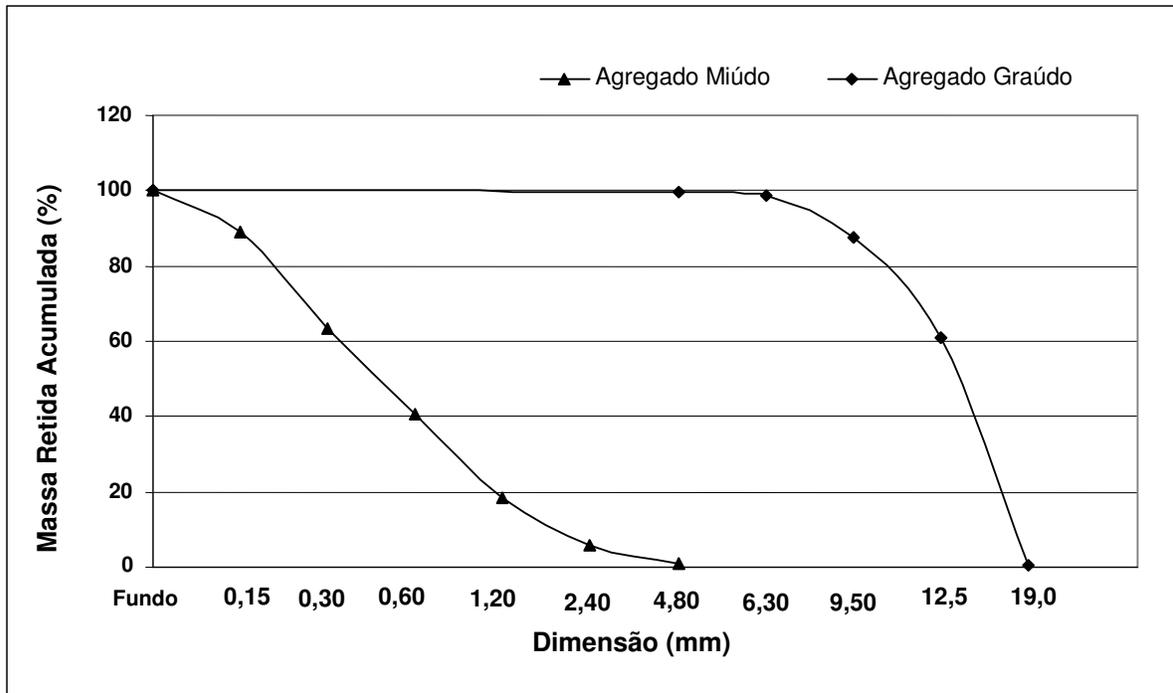


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica dos agregados.

### 4.1.3 Aditivo químico

O aditivo químico utilizado é classificado pela NBR 11780 (ABNT,1992) como superplastificante (SP). De acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante, as características do produto são as seguintes: produto líquido, de cor marrom, à base de melanina e isentos de cloretos. A quantidade recomendada pelo fabricante para o uso do aditivo é de 0,58% a 1,74%. Na mistura, foi utilizado 0,9% em massa para amostras de 60MPa. As demais amostras não utilizaram o aditivo.

## 4.2 Execução das misturas de concreto

Foram moldadas três placas de madeira com dimensões de 30cmx30cmx5cm (comprimento, largura e espessura) e oito corpos cilíndricos metálicos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada amostra com resistência de dosagem para 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa, totalizando uma quantidade de trinta e três corpos-de-prova.

A dosagem correspondeu a 1(uma) parte em massa de cimento, a 3(três) partes de agregado miúdo (areia) e a 3(três) partes de agregado graúdo para o concreto 15 MPa com relação água/cimento de 0,63 (1:3:3:0,63); a 1(uma) parte em massa de cimento, a 2(duas) partes de agregado miúdo (areia) e a 3(três) partes de agregado graúdo para o concreto 40MPa com relação água/cimento de 0,40 (1:2:3:0,40); e a 1(uma) parte em massa de cimento, 2 (duas) partes de agregado miúdo (areia) e 2,3 partes de agregado graúdo, utilizando a relação água/cimento de 0,33 e super-plastificante na quantidade de 0,9% (1:2:2,3:0,33) para o concreto 60 MPa, conforme ilustram os cálculos apresentados no Anexo 6 (HELENE & TERZIAN, 1993). A Figura 4.3 ilustra as amostras em moldes de cilíndricos e placas.

Para a preparação das placas foi empregada a mesa vibratória, num tempo de exposição de 10 s. (dez segundos) por lote de concretagem. As placas foram moldadas com essas dimensões devido à adaptação aos aparelhos de ensaio, de rugosidade, morfologia e principalmente ao *pull-out*. Os corpos cilíndricos foram moldados para o ensaio de resistência à compressão e porosidade. O lote de três placas e oito corpos cilíndricos para concreto de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa enquadra-se ao número de amostras para os ensaios citados acima.



Figura 4.3 - Amostras cilíndricas e placas.



Figura 4.4 – Amostras preparadas, a serem ensaiadas.

### **4.3 Cura do concreto**

#### **4.3.1 Cura por imersão por 7 (sete) dias**

As amostras foram moldadas em fôrmas de madeira e retiradas após 24 h. Estas foram colocadas imersas em água saturada de cal, em temperatura ambiente  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , por 7 (sete) dias, segundo procedimento da NBR 5739 (ABNT, 1994). Após a permanência, as amostras foram retiradas e deixadas no ambiente do laboratório e ensaiadas.

### **4.4 Ensaio realizados**

Nos corpos-de-prova cilíndricos, 10cm x 20cm, foram determinadas as propriedades mecânicas e o índice de vazios. Nas placas, 30cmx30cmx5cm, foram medidos os valores de rugosidade e analisada a característica de textura superficial do substrato. Em seguida, foram colados os sistemas de reforços de fibras de carbono para os ensaios de resistência de aderência e, por fim, foram classificados os tipos de rupturas.

#### **4.4.1 Resistência à compressão axial**

A resistência à compressão axial foi avaliada por meio de corpos-de-prova cilíndricos, 10cm x 20cm, segundo procedimento da NBR 5739 (ABNT, 1994b). Para cada série de amostras de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa foram ensaiadas duas amostras nas idades 7(sete), 28(vinte e oito) e 76(setenta e seis) dias.

#### 4.4.2 Determinação da absorção total de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio de índice de vazios, absorção total de água e o de determinação das massas específicas das amostras seca, saturada e real foi realizado segundo a NBR 9778. (Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção total de água, índice de vazios e massa específica) (ABNT, 2005). Foram utilizadas duas amostras de cada resistência totalizando seis amostras, com idade 28(vinte e oito) dias, as mesmas foram colocadas na estufa a uma temperatura de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  para eliminar a água das amostras. As amostras foram pesadas em balança digital.

Para as determinações de absorção total (A), índice de vazios ( $I_v$ ), massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ), massa específica da amostra saturada ( $\rho_{SAT}$ ) e massa específica real ( $\rho_r$ ). As médias aritméticas de dois valores foram determinadas, conforme descrito nas equações (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) e (4.5). As figuras 4.5 e 4.6 ilustram as amostras sendo submetidas em estufa e o processo de pesagem.

$$A = \frac{m_{SAT} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.1)$$

$$I_v = \frac{m_{SAT} - m_s}{m_{SAT} - m_i} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{SAT} - m_i} \quad (4.3)$$

$$\rho_{SAT} = \frac{m_{SAT}}{m_{SAT} - m_i} \quad (4.4)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (4.5)$$

onde:

$m_{SAT}$  = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa;

$m_i$  = massa da amostra saturada imersa em água após fervura.



Figura 4.5 – Amostras sendo submetidas em estufa.



Figura 4.6 – Pesagem das amostras.

#### **4.4.3 Rugosidade do substrato de concreto**

A análise de rugosidade foi realizada para avaliar as características das superfícies dos concretos com resistência de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa.

Em cada amostra (placa) foram marcadas seis posições paralelas nos dois sentidos, totalizando doze posições de medições no campo de medição, comprimento de leitura ( $l_r$ ), (*cut-off*) de 5 cm conforme pode ser observado na Figura 4.7. As amostras permaneceram em ambiente de laboratório (temperatura média de 25° C) com idade de 76(setenta e seis) dias.

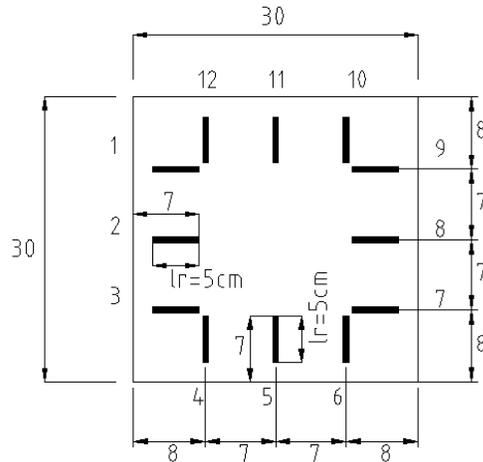


Figura 4.7 – Esquema do campo de medição da rugosidade de cada amostra.

Quando submetidas à análise de rugosidade, foram avaliados os picos mínimo e máximo de rugosidade, ou seja, dois parâmetros de dados o Ra e Rz (*roughness*).

Para avaliar a rugosidade estabelece-se um comprimento  $l_c$ , (*cut-off*) que de acordo com a norma ISO 1302/2002, deve medir 5 comprimentos de amostragem. São utilizados dois sistemas básicos de medida: linha média e o envolvente. No Brasil, pelas Normas ABNT NBR 6405/1988 e NBR 8404/1984, adota-se o sistema de linha média. Este sistema é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem, conforme ilustra a Figura 4.8.

Pode-se observar que as áreas A1 e A2, acima da linha média, são iguais à área abaixo da linha média, A3.

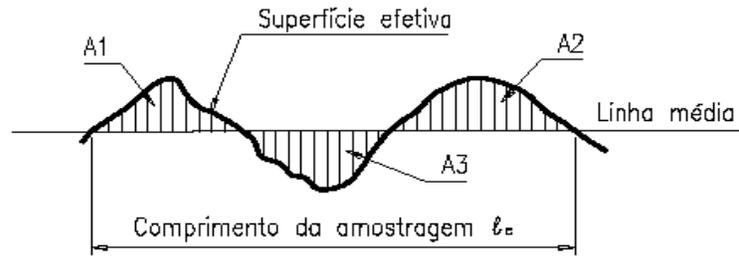


Figura 4.8 – Ilustração do sistema de medição da rugosidade da linha média.

Os parâmetros de rugosidade são denominados de Ra e Rz, parâmetros bidimensionais, e descrevem o perfil de rugosidade da amostra (ISO 1302/2002).

1. Ra: é o parâmetro mais utilizado. Matematicamente é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso ( $lm$ ). Essa grandeza corresponde à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $lm$ ), conforme ilustrado na Figura 4.9. O cálculo de Ra pode ser descrito pela Equação 4.6.

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = (\mu m) \quad (4.6)$$

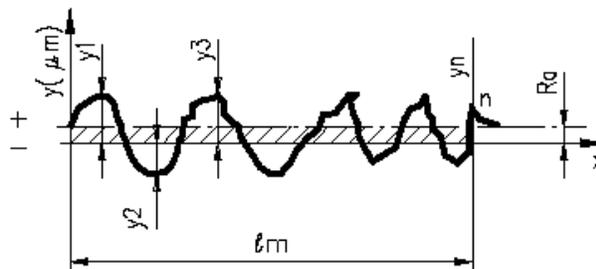


Figura 4.9 – Sistema de medição da rugosidade Ra.

2.  $R_z$ : corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ). Rugosidade parcial ( $Z_i$ ) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (*cut-off*). Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem ( $l_r$ ), conforme ilustrado na Figura 4.10. O cálculo de  $R_z$  pode ser descrito pela Equação 4.7.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} = (\mu m) \quad (4.7)$$

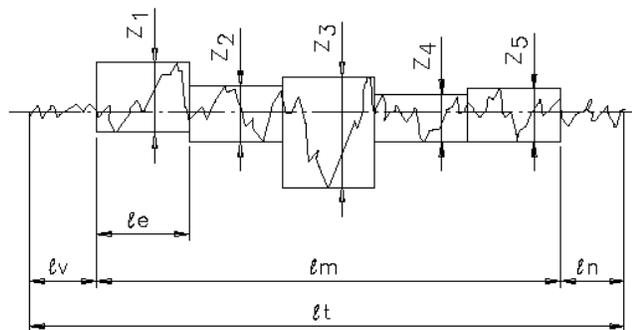


Figura 4.10 – Sistema de medição da rugosidade  $R_z$ .

O equipamento utilizado foi um rugosímetro – Form Talysurf com software Asphesic Form, de acordo com a ISO 4287/1997 – A Figura 4.11 apresenta o aparelho.



Figura 4.11 – Rugosímetro e *software* – *Form Taysurf* e *Asphesic Form*.

#### **4.4.4 Análise da superfície do substrato de concreto**

O estereomicroscópico microscópio SMZ 800 C-OS *Plain Focusing* da marca Nikon foi usado para avaliar a característica de superfície das amostras de concreto de resistência 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa, com idade de 76 (setenta e seis) dias, conforme observa-se na Figura 4.12. As placas de 30x30x5cm permaneceram em ambiente de laboratório (temperatura média de 25° C), e foram escolhidos os mesmos pontos de medição da rugosidade, o que é observado no esquema apresentado na Figura 4.7.



Figura 4.12 – Estereomicroscópio SMZ 800.

#### 4.4.5 Metodologia para a aplicação da manta de PRFC

Para a aplicação da manta de PRFC foram realizados os seguintes procedimentos:

- Corte da manta nas dimensões das placas;
- Regularização das imperfeições com lixa grossa;
- Limpeza da superfície das amostras de concreto com água potável e secagem em estufa a 50°C. As mesmas foram retiradas da estufa e deixadas à temperatura ambiente por 24h;
- A regularização dos poros por aplicação de uma resina epóxi de baixa viscosidade seguindo um tempo de trabalhabilidade de 20(vinte) minutos a uma temperatura de 25°C, conforme ilustra a Figura 4.14;

- O nivelamento da superfície do concreto através da aplicação de pasta adesiva epóxi com utilização de uma espátula seguindo um tempo de trabalhabilidade de 40 (quarenta) minutos a uma temperatura de 25°C;
- Aplicação da resina de impregnação (saturante) sobre a superfície do concreto com rolo de pêlo curto ou pincel seguindo um tempo de trabalhabilidade de 45(quarenta e cinco) minutos a 25°C; (Figura 4-15).
- Aplicação da manta de PRFC com auxílio de um rolo pesado; e
- Retirada do plástico de proteção da manta e aplicação de uma nova “demão” de resina de impregnação para a saturação da manta de PRFC, cuidando para que fosse retirado o excesso de resina. (Figura 4-16).



Figura 4.13 – Materiais para aplicação do adesivo estrutural.



Figura 4.14 - Ilustração do adesivo epóxi.



Figura 4.15 – Ilustração da resina de impregnação – Saturante.



Figura 4.16 – Manta na placa de concreto.

#### **4.4.6 Ensaio de aderência do concreto**

O ensaio de aderência ou arranque, também chamado “*Pull-out*”, segundo NBR 14050, consiste em aplicar uma tensão de tração perpendicular à seção transversal do reforço com fibra de carbono, para determinar a resistência de aderência e avaliar os tipos de rupturas do sistema de reforço com fibra de carbono no substrato de concreto. Para o ensaio foi utilizado o aparelho DYNATESTE –DIN 001 com uma capacidade máxima de carga de 20 kN, segundo as especificações prescritas pela ASTM D4541. (Figura 4.17); idade das amostras 90(noventa) dias.

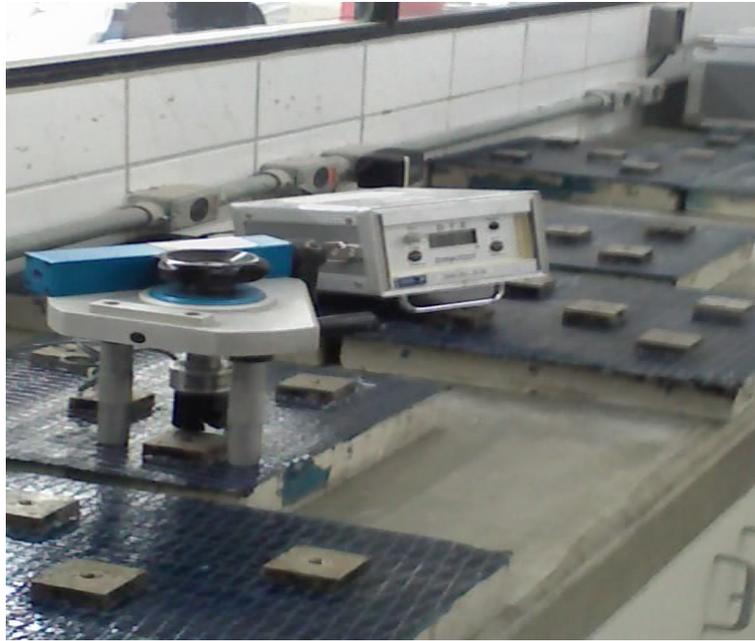


Figura 4.17 – Equipamento do dinamômetro –DYNATESTE.



Figura 4.18 - Amostras prontas para o ensaio.

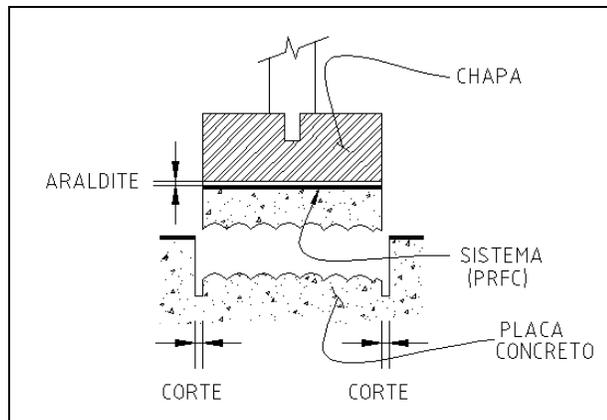


Figura 4.19 - Ilustração da colagem da chapa na placa de concreto.

Este ensaio foi realizado utilizando três amostras de cada classe de resistência à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa. Em cada amostra foram coladas 5(cinco) chapas de aço, 40mm x 40mm x 12,5mm com o adesivo estrutural (Araldite Hobby), totalizando 15 chapas; conforme ilustrado na Figura 4.19. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 25°C.

#### **4.4.7 Propriedades do compósito de fibra de carbono**

A manta de PRFC utilizada é fornecida em rolos de 500 mm de largura por 50m de comprimento, com espessuras de 0,111 a 1,165mm. A unidade de peso ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).

As características gerais do material composto PRFC, segundo o fabricante, são fornecidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Propriedades da manta de PRFC-CF 130 F C elevada tração unidirecional.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Módulo de Elasticidade	GPa	235
Tensão de tração admissível	GPa	3,55
Limite de deformação	%	1,5
Espessura da camada	mm	0,165
Densidade da Manta	g/m <sup>2</sup>	300

As resinas utilizadas para adesão do composto PRFC com o substrato (concreto) são à base de epoxídicos, ésteres de vinil e poliésteres.

As características das resinas utilizadas no trabalho experimental são indicadas nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.4 – Propriedades da resina de imprimação TEC-POXI PR segundo fabricante.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Aspecto/Cor	-	Incolor
Viscosidade	CF4	65 a 75 s
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	1,050
Sólido por volume	%	98
<i>Pot Life</i>	CF4	65 a 75 s
Peso específico	min	40
Secagem ao toque	h	4
Secagem ao manuseio	h	6
Secagem completa	h	10
Cura inicial	dias	7
Alongamento por ruptura	mm/mm	0,218
Resistência à tração	MPa	18 a 22 após 24 horas
Rugosidade do substrato	mícron	60 a 80

Tabela 4.5 – Propriedades da massa de regularização e colagem TEC-PUTTY, segundo o fabricante.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Viscosidade	-	Pasta cinza tixotrópica
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	1,75 a 1,85
<i>Pot Life</i> (à 25° C)	h	1
Cura inicial	h	4

Tabela 4.6 – Propriedades da resina de epoxídica TEC-POXI, segundo o fabricante.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Aspecto/Cor		Azul Transparente
Viscosidade	CF4	70 a 80 s
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	1,055
Sólido por volume	-	Sólido por Volume
<i>Pot Life</i>	min	40
Secagem ao toque	h	4
Secagem ao manuseio	h	6
Secagem completa	h	10
Cura inicial	dias	7
Alongamento por ruptura	mm/mm	0,300
Resistência à tração	MPa	52 a 58 após 24 horas
Resistência à compressão	MPa	60
Aderência	MPa	1,5

# **5**

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados nesta dissertação. Serão apresentados os resultados das propriedades do concreto como: resistência à compressão axial, porosidade, rugosidade, resistência de aderência e microscopia ótica.

### **5.1 Propriedades mecânicas do concreto**

#### **5.1.1 Resistência à compressão axial**

No Quadro 5.1, apresentam-se os resultados da resistência à compressão axial das amostras preparadas e curadas por 7(sete), 28(vinte e oito) e 76(setenta e seis) dias, respectivamente.

<b>Denominação dos Corpos de prova</b>	<b>Tempo de cura (dias)</b>	<b>Resistência à compressão alcançada (MPa)</b>
15 MPa	7	10,9 ± 0,2
	28	15,8 ± 0,2
	76	16,0 ± 0,2
40 MPa	7	27,7 ± 0,2
	28	40,1 ± 0,2
	76	40,4 ± 0,2
60 MPa	7	40,2 ± 0,2
	28	60,8 ± 0,2
	76	61,1 ± 0,2

Quadro 5.1 Os valores médios de resistência à compressão alcançados das amostras após 7, 28 e 76 dias de cura.

Os resultados de resistência à compressão axial foram superiores para os concretos ensaiados após 28 dias em comparação aos ensaiados após 7 dias. Esse comportamento pode ser explicado pela ocorrência de um maior grau de hidratação no concreto de 28 dias (METHA & MONTEIRO, 1994).

As amostras de concretos com menor relação água/cimento (*a/c*), assim como os de maiores idades de hidratação (tempo de cura), foram as que apresentaram maior valor de resistência à compressão axial, conforme pode ser visualizado na Figura 5.1.

A comparação entre os tempos de cura, 7 dias e 28 dias, demonstrou que o concreto de 60 MPa apresentou a maior variação de resistência à compressão entre as diferentes relações água/cimento (*a/c*) de 51 %. Esse resultado pode ser explicado por possuir maior quantidade de cimento, conforme ilustra a Figura 5.1.

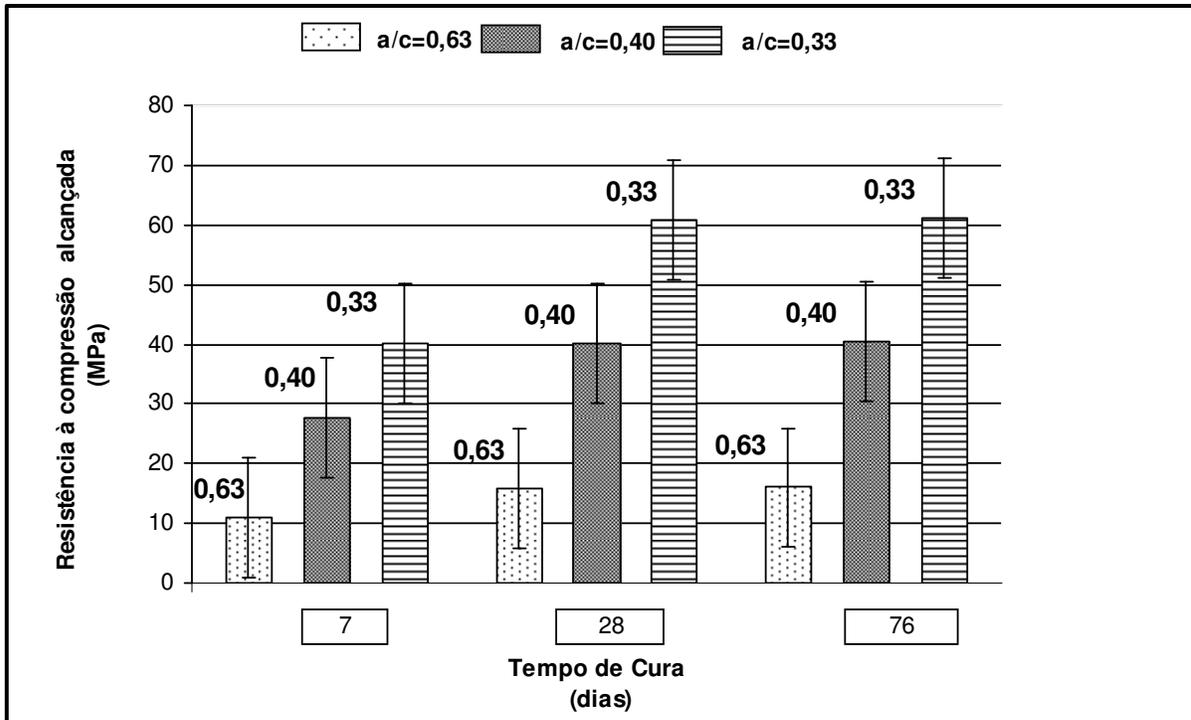


Figura 5.1 – Resultados médios da resistência à compressão em função dos diferentes tempos de cura.

### 5.1.2 Absorção de água

Conforme podem ser observados na Figura 5.2, os resultados da absorção de água das amostras de concreto avaliadas obtiveram uma diminuição na sua absorção com o aumento da resistência mecânica. Esse comportamento pode ser explicado pela menor porosidade de concretos com maior resistência à compressão. Isso também foi observado por METHA & MONTEIRO (1994), que avaliou o índice de vazios versus resistência.

De acordo com a Figura 5.2, a variação da resistência à compressão de 15 MPa para 60MPa mostrou uma diminuição da absorção de água de aproximadamente 43,4 %. É pertinente salientar que a absorção de água não é dependente única e exclusivamente da porosidade do concreto, mas, também, da interconectividade dos poros, também denominada

porosidade capilar, isto é, uma maior ou menor interconectividade desses poros pode interferir na absorção total de água do concreto. (MINDESS, 1984), (LOEDOLFF, 1987).

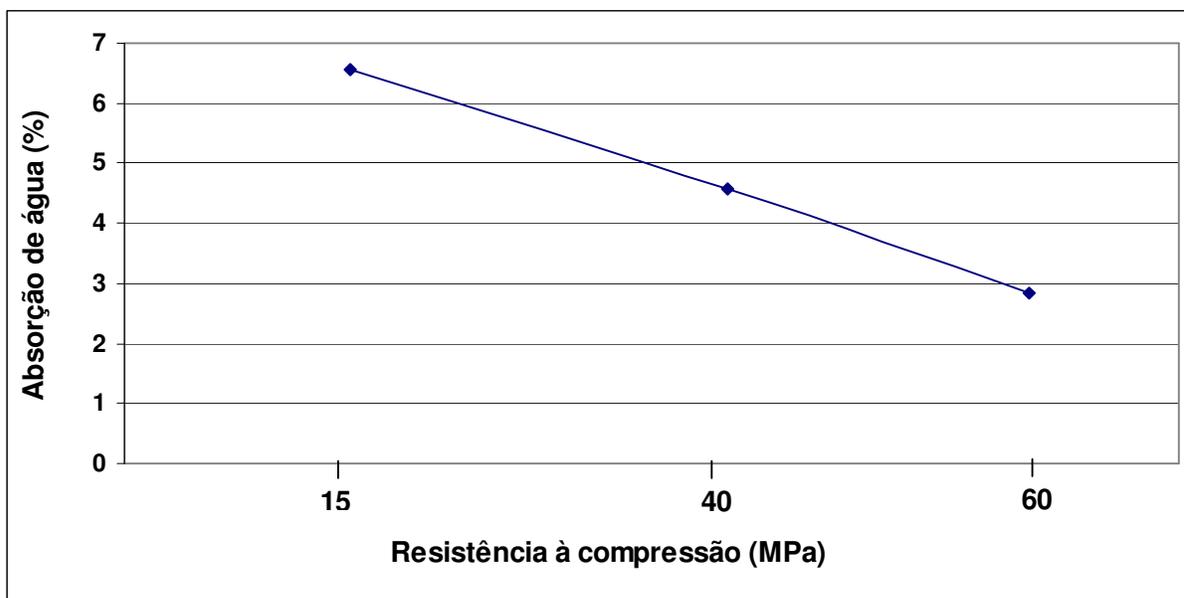


Figura 5.2 – Resultados médios de absorção de água em função da resistência à compressão.

### 5.1.3 Índice de vazios

De acordo com a Figura 5.3, o índice de vazios do concreto também diminuiu com o aumento da resistência à compressão do mesmo. A diminuição do índice de vazios deste substrato em concretos com maiores resistências pode ser explicada pelo fato do concreto com maior resistência possuir maior quantidade de cimento em sua microestrutura, acarretando, desta forma, um maior fator de empacotamento desses e diminuindo, assim, o número de vazios em sua massa.

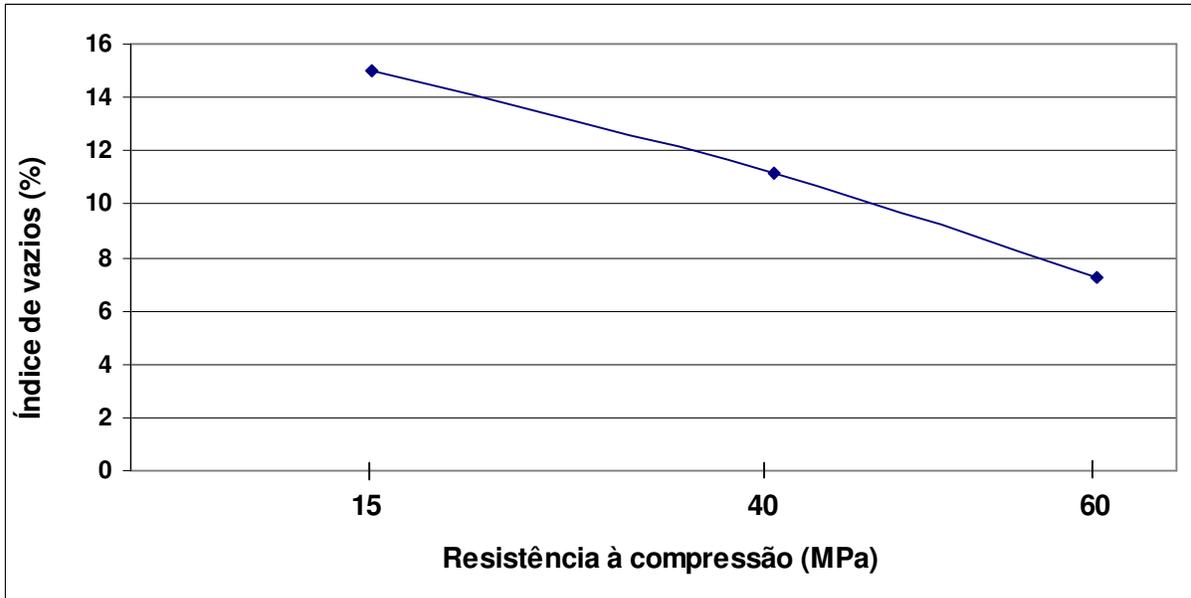


Figura 5.3 – Resultados médios do índice de vazios em função da resistência à compressão.

#### 5.1.4 Massa específica seca, real e saturada

A Figura 5.4 apresenta os resultados médios da massa específica seca do concreto em função da resistência à compressão. A partir dos resultados obtidos, as amostras com maior resistência à compressão foram as que obtiveram maior valor de massa específica seca, esse resultado também pode ser explicado devido à amostra com maior resistência possuir um maior fator de empacotamento. (CALLISTER JR.,1994).

Os mesmos comportamentos dos resultados da massa específica seca foram observados nos resultados de massa específica real em relação aos concretos com diferentes resistências à compressão. A amostra com maior resistência à compressão é a que apresentou o maior valor de massa específica real, conforme pode ser observado na Figura 5.5.

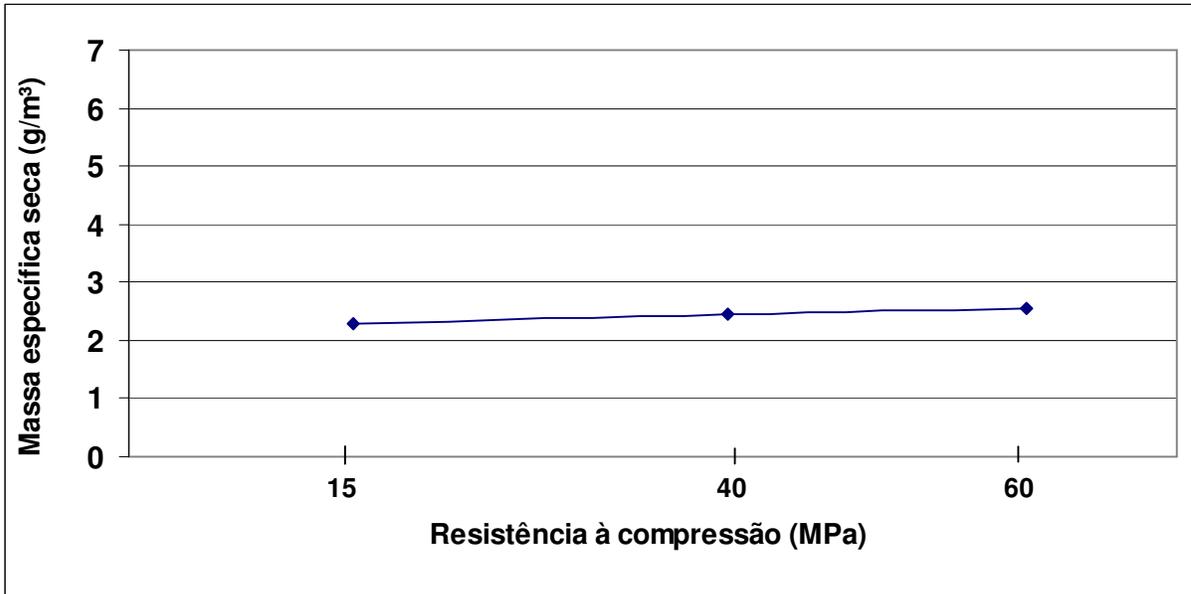


Figura 5.4 – Resultados médios de massa específica seca em função da resistência à compressão.

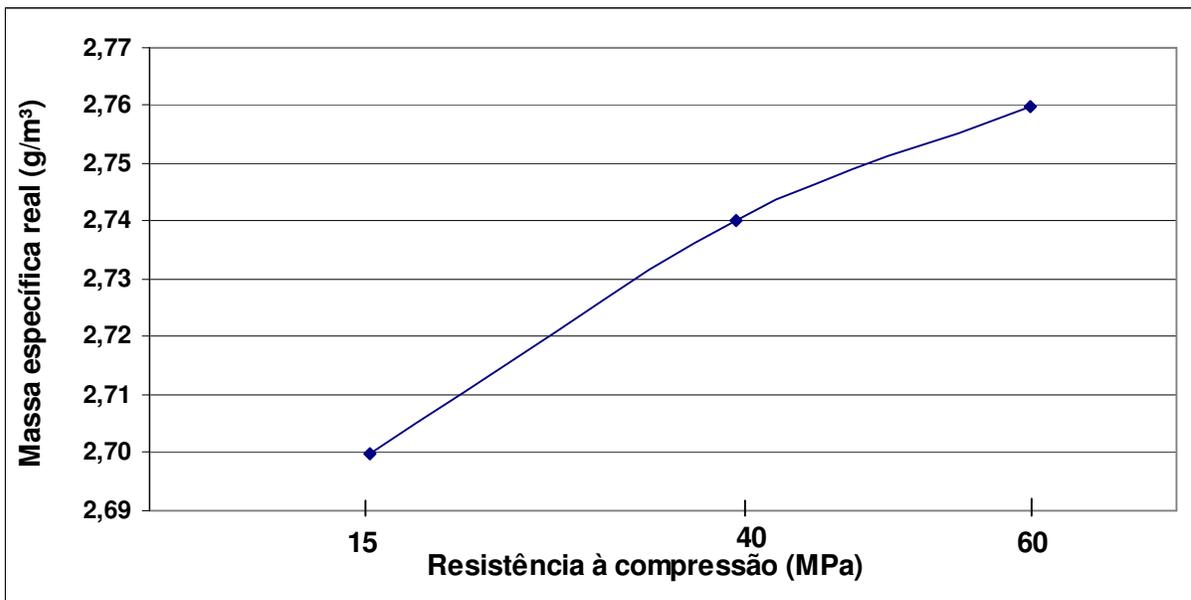


Figura 5.5 – Resultados médios de massa específica real em função da resistência à compressão.

É possível observar, de acordo com a Figura 5.6, que a massa específica saturada do concreto obteve menor valor na amostra com menor resistência à compressão, onde a variação da resistência à compressão de 15 MPa para 60 MPa mostrou uma redução da massa específica saturada de, aproximadamente, 6,5 %.

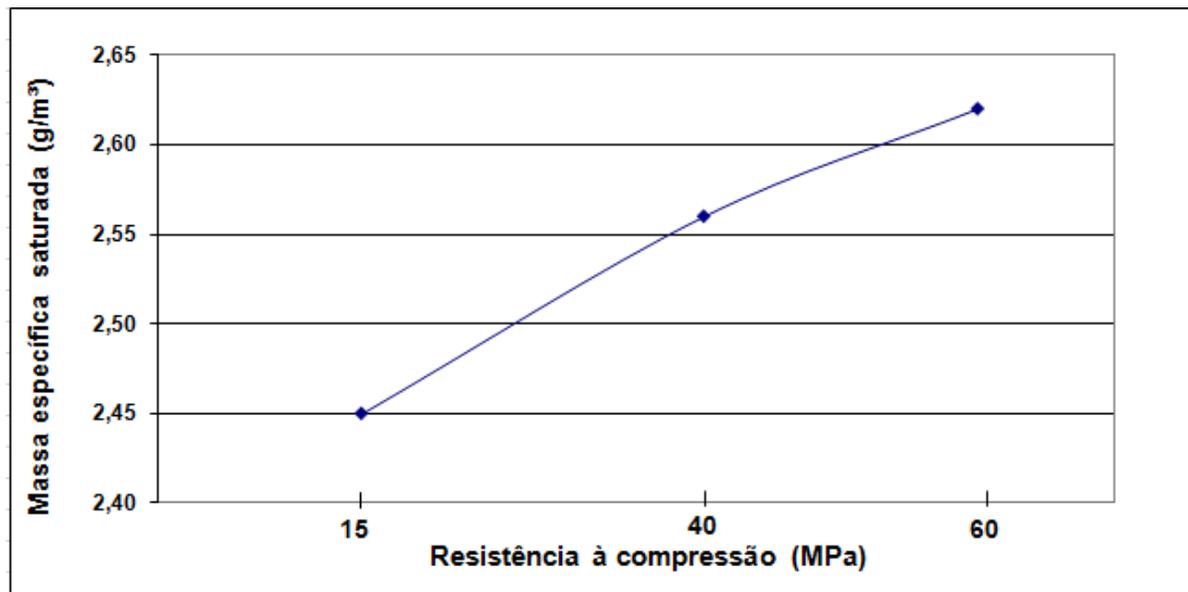


Figura 5.6 – Resultados médios de massa específica saturada em função da resistência à compressão.

Os resultados dos valores obtidos para as propriedades do concreto, tais como, absorção de água, índice de vazios, massa específica seca, massa específica real e massa específica saturada, demonstraram uma tendência inversa entre porosidade e resistência à compressão do concreto (METHA & MONTEIRO, 1994).

### 5.1.5 Rugosidade do concreto

O acompanhamento da rugosidade do concreto é expresso de uma maneira geral por empresas que fornecem o sistema de reforço com fibra de carbono, em micrometro ( $\mu\text{m}$ ), para

que a aplicação do sistema de reforço em superfícies de concreto apresente um bom desempenho.

Nas amostras submetidas a uma análise de rugosidade normalmente observa-se um perfil de comportamento onde há picos mínimo e máximo de rugosidade, sendo que dois parâmetros de dados, Ra e Rz, podem ser destacados.

Os resultados de rugosidade mostraram que a resistência à compressão axial do concreto influenciou nos resultados de rugosidade (Ra e Rz), conforme se pode observar nas figuras 5.7 e 5.8.

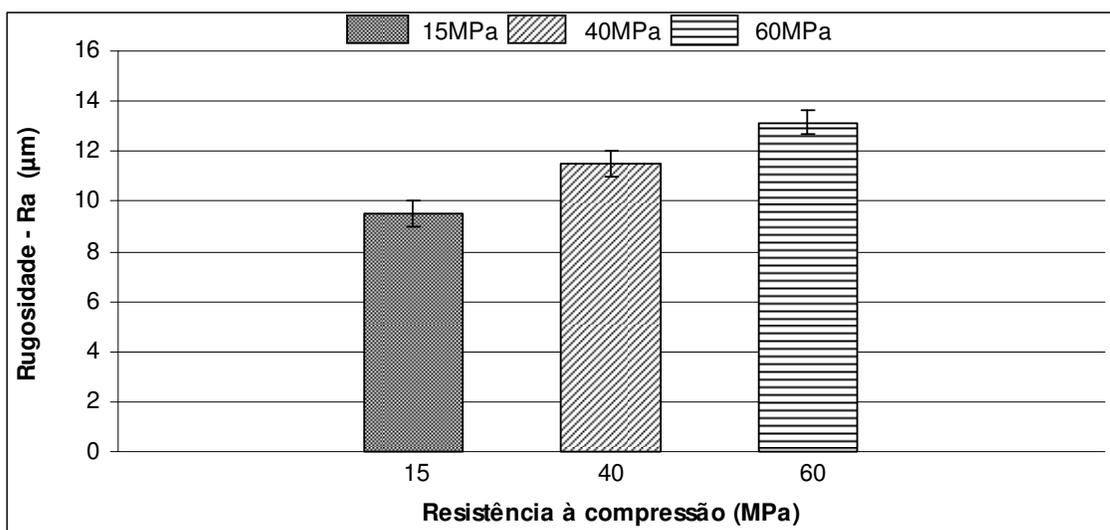


Figura 5.7 - Média aritmética das amostras em função da rugosidade Ra.

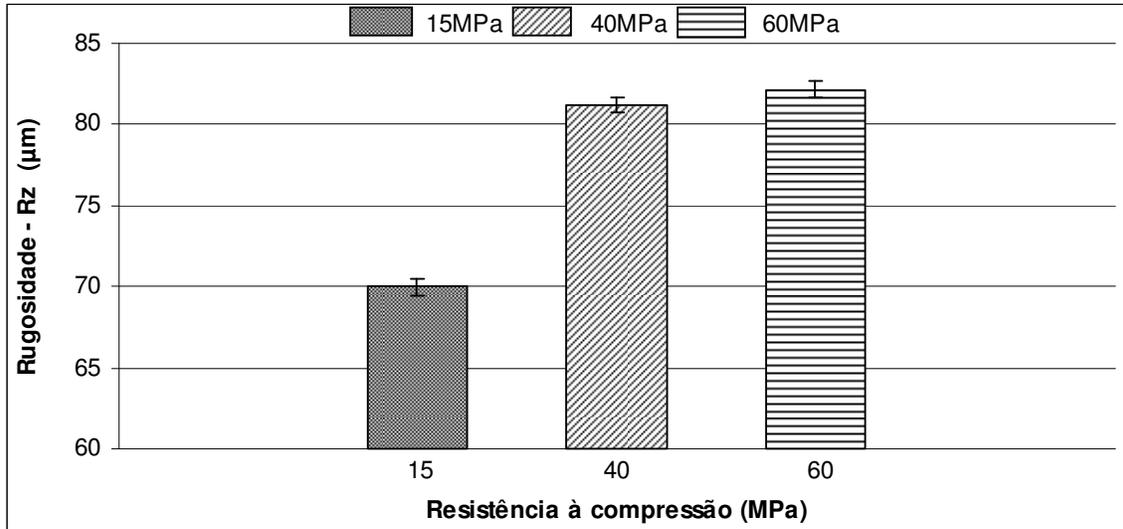


Figura 5.8 - Média aritmética das amostras em função da rugosidade Rz.

Por meio da média aritmética dos resultados das 36 amostras de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa, foi gerada a Equação (5.1) em que relaciona a resistência à compressão e o parâmetro de rugosidade Ra, ilustrado na Figura 5.9.

$$Ra = 1,8299 f + 7,7297 \quad (5.1)$$

onde:

Ra = parâmetro de rugosidade;

$f$  = resistência à compressão do concreto.

Na obtenção da expressão matemática, em que relaciona a resistência à compressão em função da rugosidade (Ra), o valor do coeficiente de correlação obtido foi de 99,69%, conforme pode ser observado na Figura 5.9. Sugere-se que um número maior de amostras seja avaliado para que uma melhor correlação seja estabelecida.

A correlação entre a resistência à compressão e a rugosidade do concreto (Rz) gerou a equação, visualizada em (5.2).

$$Rz = 6,0815 f + 65,615 \quad (5.2)$$

onde:

Rz = parâmetro de rugosidade;

$f$  = resistência à compressão do concreto.

A expressão matemática relacionando a resistência à compressão do concreto em função da rugosidade (Rz) gerou o valor do coeficiente de correlação de 80,9%, conforme pode ser ilustrado na Figura 5.10.

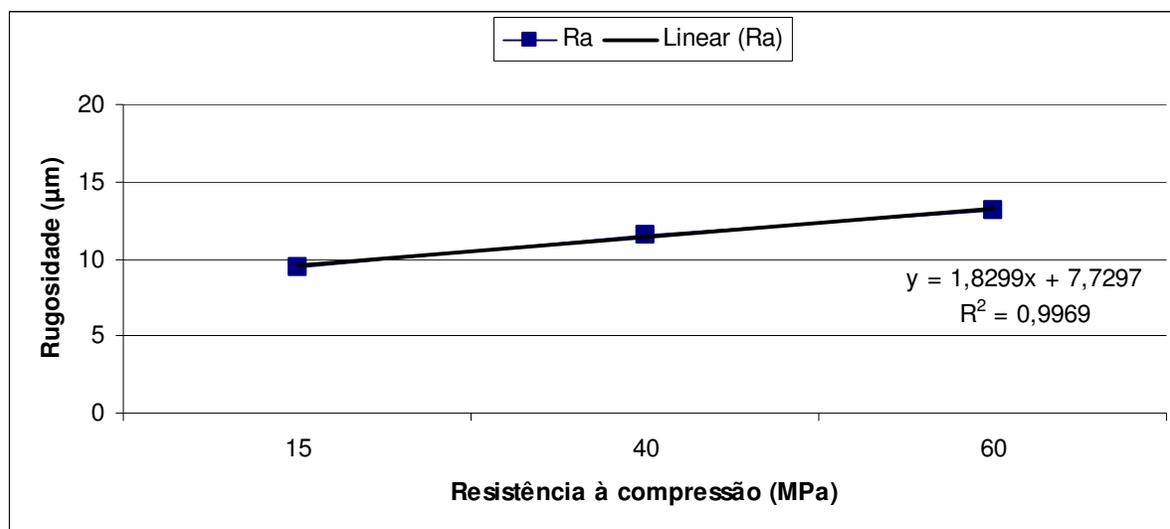


Figura 5.9 – Variação da média aritmética do parâmetro de rugosidade Ra em função da resistência à compressão.

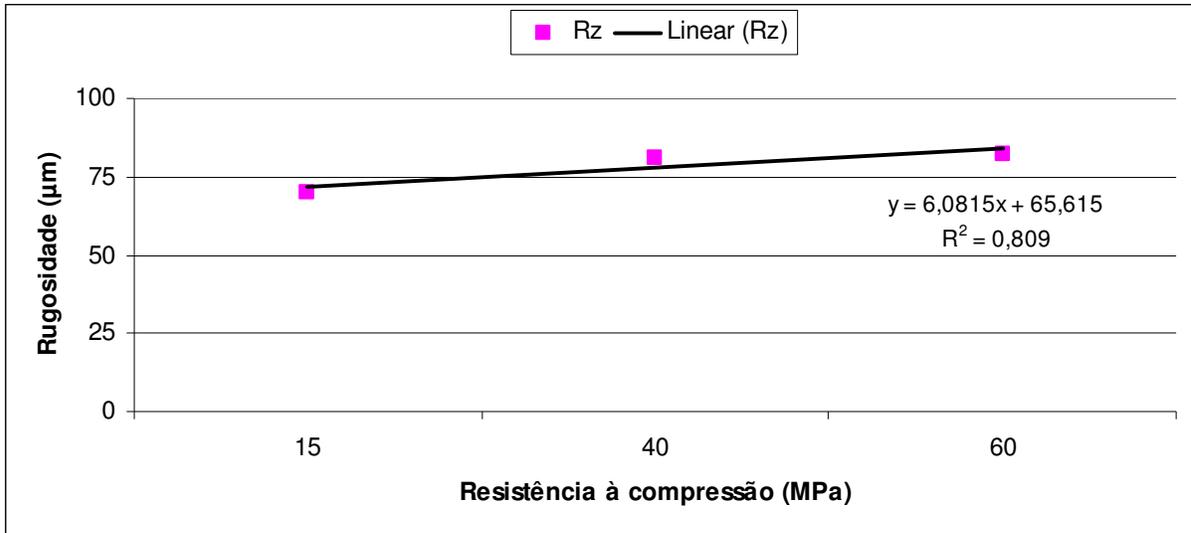


Figura 5.10 – Variação da média aritmética do parâmetro de rugosidade Rz em função da resistência à compressão.

### 5.1.6 Resistência de aderência

Para avaliar a resistência de aderência e analisar os tipos de rupturas do sistema de reforço com fibra de carbono e concreto, foi realizado o ensaio de aderência de acordo com a norma NBR 14050, após sete dias da aplicação do sistema de reforço na fibra de carbono, quando ocorre a cura total do adesivo estrutural. O ensaio foi realizado nos concretos de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa aos 90 dias.

No ensaio de resistência de aderência, as amostras apresentaram 5(cinco) tipos de rupturas, que foram classificadas abaixo:

- A- Ruptura no substrato.
- B- Ruptura na fibra de carbono.
- C- Ruptura no adesivo estrutural.

D- Ruptura na fibra de carbono e adesivo estrutural.

E- Ruptura na fibra de carbono e no substrato. (Figura 5.11)

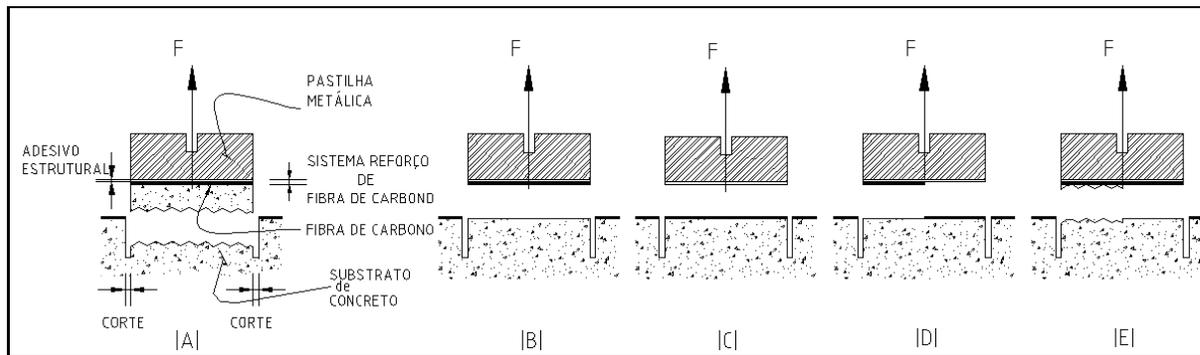


Figura 5.11 – Ilustração dos 5 tipos de rupturas entre o reforço com fibra de carbono e o substrato de concreto em seção.

Nas figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, apresentam-se as ilustrações dos tipos de rupturas ocorridos no ensaio de aderência.

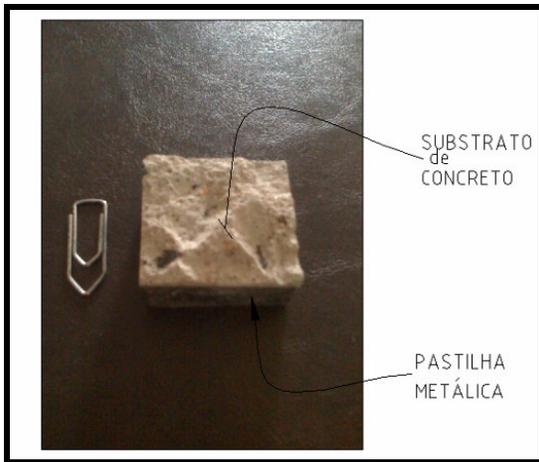


Figura 5.12 – Ilustração do tipo A.

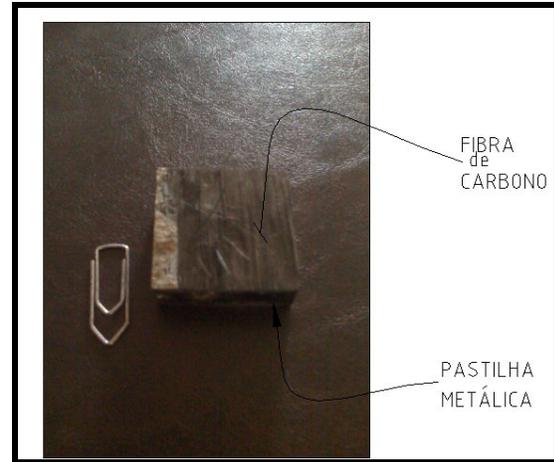


Figura 5.13 – Ilustração do tipo B.



Figura 5.14 – Ilustração do tipo C.



Figura 5.15 – Ilustração do tipo D.

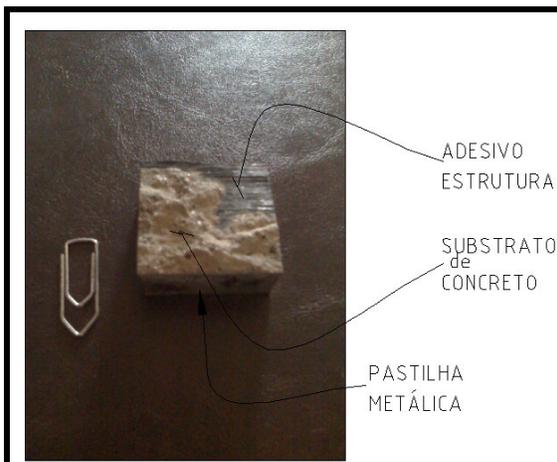


Figura 5.16 – Ilustração do tipo E.

Analisando os resultados do ensaio de aderência, conclui-se que o substrato de resistência de 15 MPa demonstrou uma ruptura do tipo A em quase 100% de sua totalidade (Figura 5.12). Em contrapartida aos substratos de 40 MPa e 60 MPa apresentaram resultados baixos de resistência de aderência, de acordo com o Quadro 5.2.

No substrato de resistência 40 MPa, o resultado de ruptura foi de três tipos: A, C e E (figuras 5.12, 5.14 e 5.16), sendo que um resultado superior ao de 15 MPa, de acordo com o Quadro 5.3.

No substrato de resistência 60 MPa o resultado de ruptura foi de quatro tipos: B, C, D e E, conforme é ilustrado nas figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16. Os resultados demonstraram que conforme aumenta a resistência do concreto, este apresenta mais tipos de rupturas em relação aos substratos de concreto de 15 MPa e 40 MPa, de acordo com os quadros 5.2 e 5.3.

O substrato de concreto de 60 MPa apresentou maior resultados de resistência de aderência entre a fibra de carbono e o concreto, conforme pode ser observado no Quadro 5.

Substrato	Amostra	Resistência (MPa)	Tipo da Ruptura
15 MPa	1	2,18±0,2	A
	2	2,46±0,2	A
	3	2,67±0,2	A
	4	2,17±0,2	A
	5	2,81±0,2	A
Substrato	Amostra	Resistência (MPa)	Tipo da Ruptura
15 MPa	6	2,15±0,2	A
	7	1,74±0,2	A
	8	2,13±0,2	A
	9	2,06±0,2	A
	10	2,46±0,2	A
Substrato	Amostra	Resistência (MPa)	Tipo da Ruptura
15 MPa	11	2,68±0,2	A
	12	2,90±0,2	A
	13	2,49±0,2	A
	14	2,60±0,2	A
	15	2,76±0,2	A

Quadro 5.2 – Resistência de aderência e classificação dos tipos de rupturas no substrato de 15 MPa.

Substrato	Amostra	Resultado (MPa)	Tipo da Ruptura
40 MPa	1	3,12±0,2	A
	2	3,04±0,2	A
	3	2,97±0,2	C
	4	1,92±0,2	A
	5	2,52±0,2	A
Substrato	Amostra	Resultado (MPa)	Tipo da Ruptura
40 MPa	6	2,72±0,2	E
	7	2,78±0,2	A
	8	2,54±0,2	A
	9	2,91±0,2	C
	10	2,46±0,2	E
Substrato	Amostra	Resultado (MPa)	Tipo da Ruptura
40 MPa	11	1,50±0,2	C
	12	2,78±0,2	C
	13	2,30±0,2	A
	14	2,39±0,2	E
	15	2,07±0,2	A

Quadro 5.3 - Resistência de aderência e classificação dos tipos de rupturas no substrato de 40 MPa.

Substrato	Amostra	Resultado (MPa)	Tipo da Ruptura
60 MPa	1	3,24±0,2	C
	2	3,52±0,2	E
	3	3,33±0,2	C
	4	3,84±0,2	D
	5	4,16±0,2	E
Substrato	Amostra	Resultado (MPa)	Tipo da Ruptura
60 MPa	6	2,36±0,2	C
	7	2,70±0,2	C
	8	2,69±0,2	C
	9	2,77±0,2	B
	10	2,79±0,2	C
Substrato	Amostra	Resultado (MPa)	Tipo da Ruptura
60 MPa	11	3,33±0,2	C
	12	3,04±0,2	C
	13	3,46±0,2	C
	14	3,26±0,2	E
	15	3,62±0,2	C

Quadro 5.4 – Resistência de aderência e classificação dos tipos de rupturas no substrato de 60 MPa.

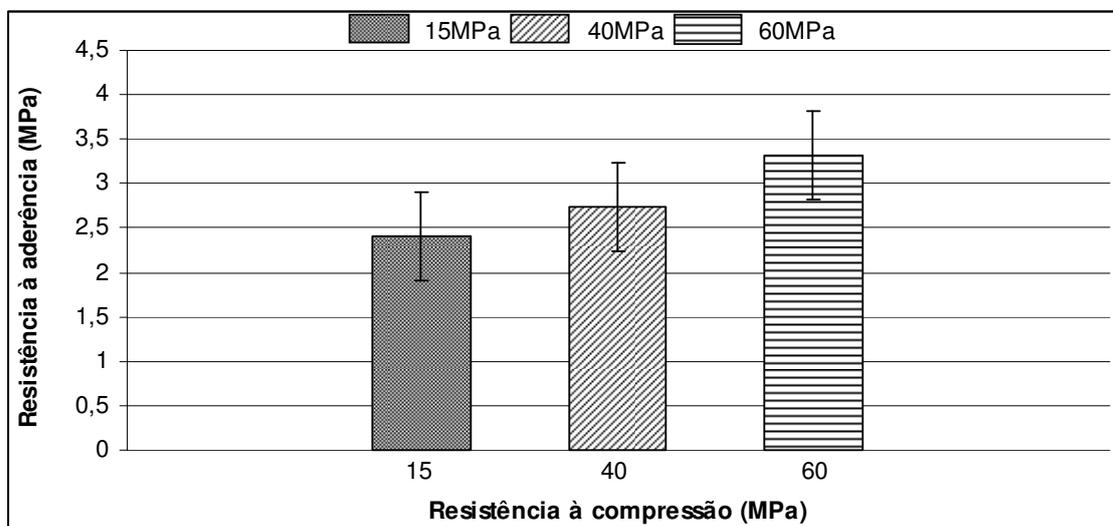


Figura 5.17 - Variação da média aritmética da resistência de aderência em função da resistência à compressão.

O resultado do ensaio de aderência mostrou que a resistência do concreto de 60 MPa obteve os maiores valores de aderência, conforme pode ser observado na Figura 5.17.

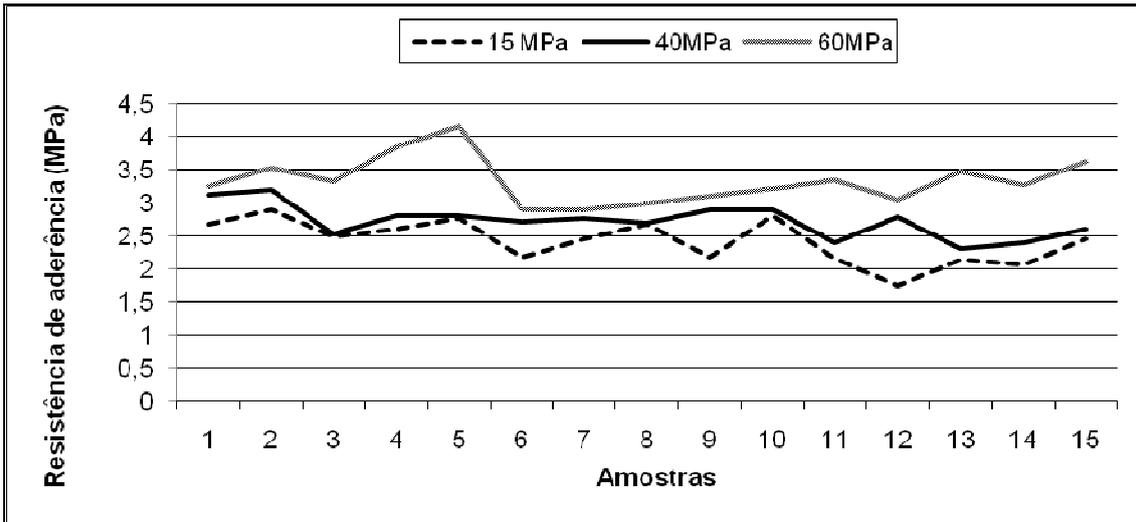


Figura 5.18 - Gráfico da variação da resistência do concreto em função da resistência de aderência.

Por meio dos resultados obtidos, foi gerada a Equação (5.3) que relaciona a resistência à compressão e a resistência de aderência, conforme pode ser observado na Figura 5.19.

$$f_a = 0,0199 f + 2,0565 \quad (5.3)$$

onde:

$f_a$  = resistência de aderência;

$f$  = resistência à compressão do concreto.

Para a obtenção da expressão matemática relacionada à resistência à compressão em função da resistência de aderência da fibra de carbono, o valor do coeficiente de correlação obtido foi alto, 94,64%, conforme pode ser observado na Figura 5.19.

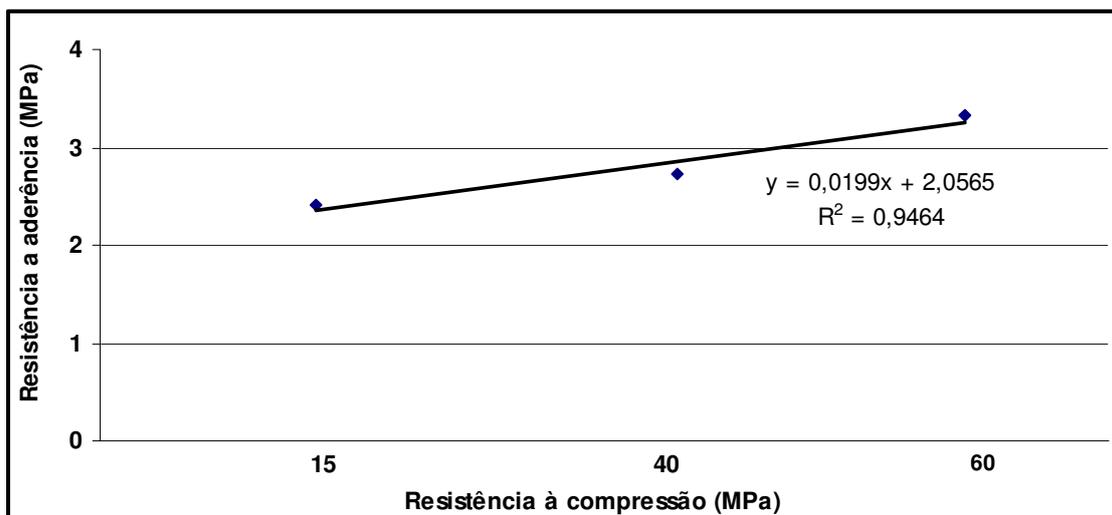


Figura 5.19 - Variação da média da resistência de aderência em função da resistência do concreto.

### 5.1.7 Análise morfológica do substrato de concreto

O microscópio óptico foi usado como ferramenta para observar a microestrutura da superfície do concreto.

A superfície dos concretos com resistência axial de 15 MPa, 40MPa e 60MPa foi ampliada em 3(três) vezes por meio do microscópio óptico. O tipo, a quantidade e a distribuição presentes nas amostras afetaram sua propriedade (METHA & MONTEIRO, 1994).

A superfície do concreto de 15 MPa apresentou uma cor clara devido à superioridade da composição de agregado miúdo em comparação a do cimento, conforme pode ser observado na Figura 5.20.

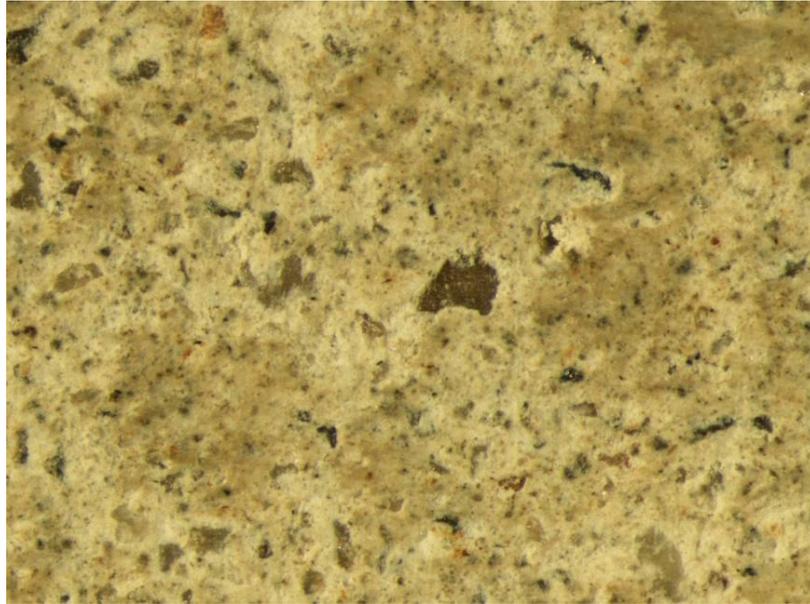


Figura 5.20 – Ilustração da superfície do concreto de 15 MPa.

A superfície do concreto de 40 MPa apresentou uma cor mais escura, quando comparada com as amostras de 15 MPa, conforme pode ser observado na Figura 5.21.

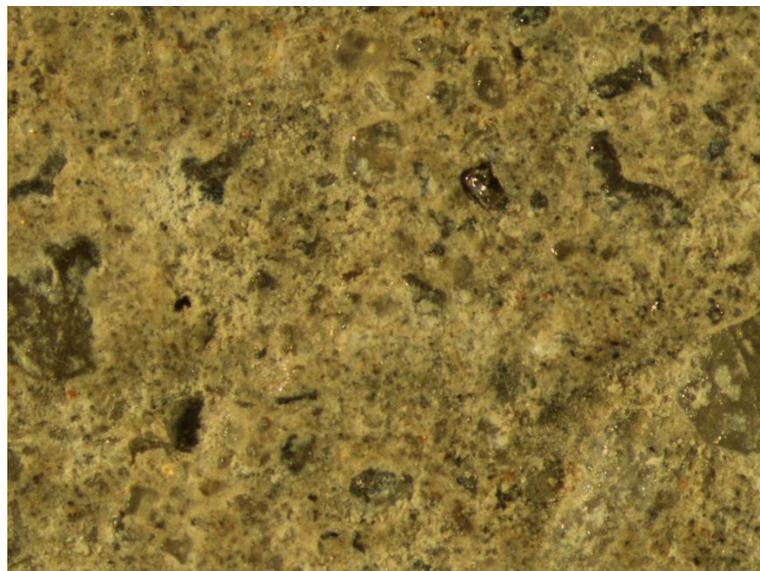


Figura 5.21 – Ilustração da superfície do concreto de 40MPa.

A superfície do concreto de 60 MPa apresentou uma cor mais escura, quando comparada com as amostras de 15 MPa e 40 MPa, além de apresentar uma superfície mais homogênea, conforme pode ser observado na Figura 5.22.

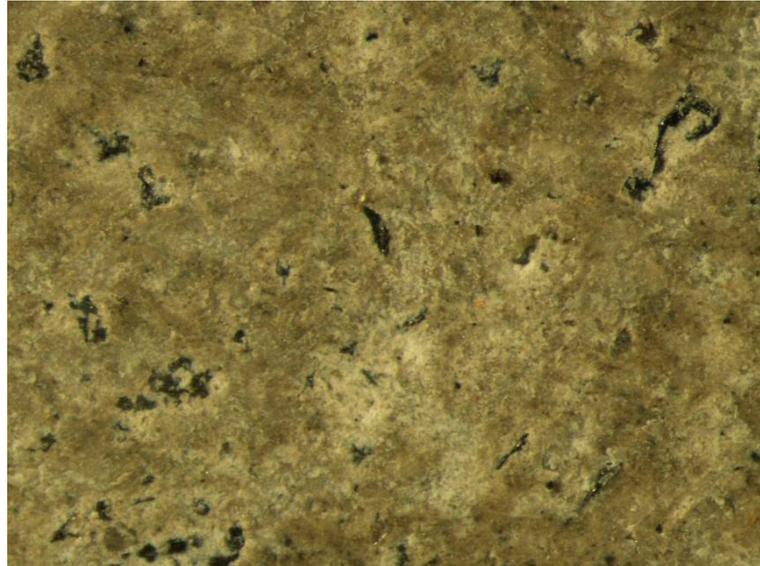


Figura 5.22 – Ilustração da superfície do concreto de 60 MPa.

As superfícies dos concretos foram ampliadas em 63(sessenta e três) vezes e foi avaliada a interface entre o agregado graúdo (brita) e os concretos com resistências à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa.

Essa análise mostrou que o agregado graúdo (brita), no concreto de 15 MPa, é envolvido pelo agregado miúdo, conforme pode ser observado na Figura 5.23.

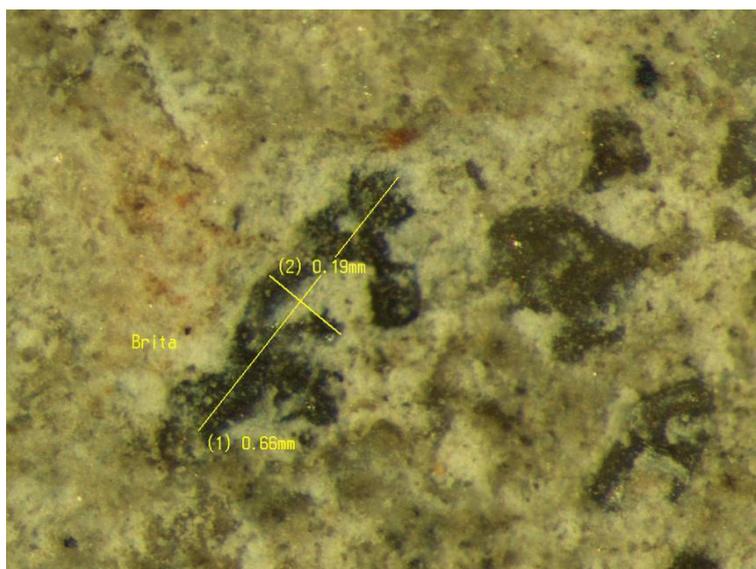


Figura 5.23 – Ilustração da superfície do concreto de 15 MPa.

No concreto de resistência axial 40 MPa, a medida do agregado graúdo (brita) foi inferior em relação ao concreto 15 MPa, conforme pode ser observado na Figura 5.24.

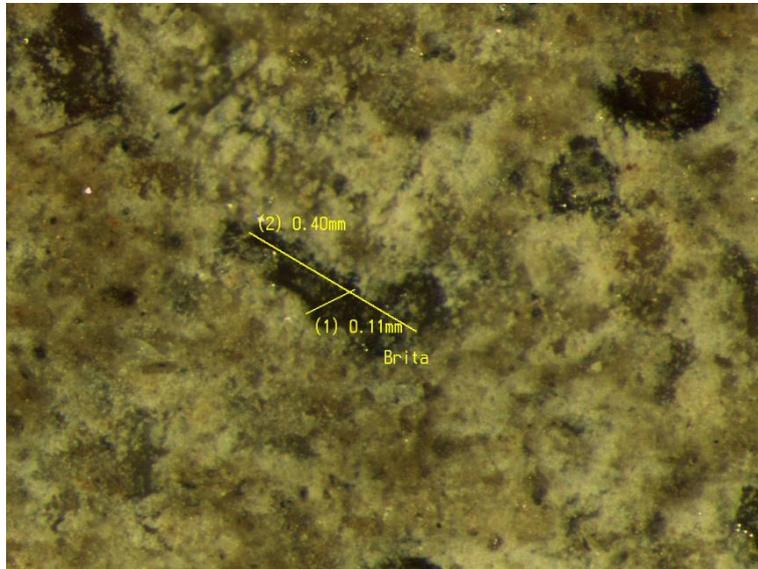


Figura 5.24 – Ilustração da superfície do concreto de 40 MPa

No concreto de resistência axial 60 MPa, a medida do agregado graúdo (brita) foi superior em relação aos concretos 15 MPa e 40 MPa, conforme pode ser observado na Figura 5.25.

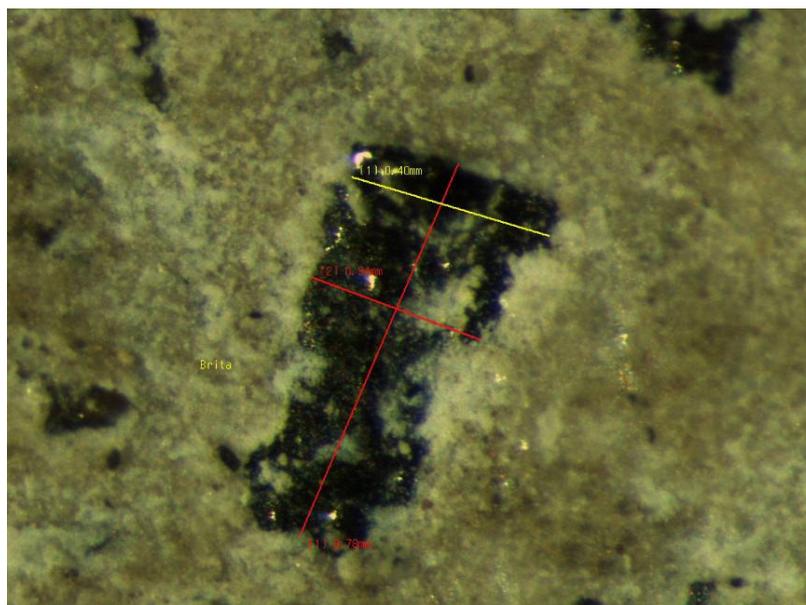


Figura 5.25 – Ilustração da superfície do concreto de 60 MPa.

# 6

## Conclusão

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, podem-se apresentar as seguintes conclusões:

- Na análise de rugosidade dos substratos com diferentes resistências, o sistema de medição da rugosidade Ra, foi o que apresentou maior variação sobre a resistência à compressão;

- Os sistemas de medição da rugosidade Ra e Rz, demonstraram divergência entre os resultados de medida micrometro.

- Os resultados de aderência mostram que quanto maior a resistência à compressão do substrato maior é a resistência de aderência do sistema de reforço com fibra de carbono;

- As amostras de 15 MPa apresentaram uma resistência de aderência superior a 1,74MPa, respeitando assim a norma americana (ACI 440.2R,2002), na qual é recomendada uma resistência de aderência de 1,4 MPa e resistência à compressão axial do substrato de 17 MPa;

- Os substratos de 15 MPa apresentaram somente um tipo de ruptura, devido o substrato de concreto apresentar baixa resistência à compressão. Enquanto, o substrato de 40 MPa apresentou três tipos de rupturas e o 60 MPa apresentou quatro tipos de rupturas;

- A resistência à compressão axial do substrato foi um fator predominante nos resultados na aderência do sistema de reforço com fibra de carbono;

Como sugestões para novas pesquisas pode-se citar:

- Ensaio de penetração do adesivo epóxi nos substrato de concreto de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa, por meio da microscopia eletrônica de varredura;

- Modificação das resistências à compressão das amostras de concreto, empregando-se resistências com menores intervalos, como por exemplo 20MPa, 25MPa, 30MPa e 35MPa com intuito de avaliar similaridades e tendências de comportamentos com o resultado obtido no presente estudo experimental; e

- Avaliação da resistência de cisalhamento do adesivo estrutural, por meio de ensaio de tração na flexão, na interface fibra/concreto na zona de tração de vigas de concreto submetidas à flexão.

# 7

## Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **“Standard Test Method For Coatings Using Portable Adhesions Testers”** ASTM/D 4541, American Society for Testing and Materials, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos de concreto. 1994b, 4 p.**

\_\_\_\_\_. **NBR 6405: Rugosidade das superfícies. 1988**

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. 2005.1984**

\_\_\_\_\_. **NBR 8404: Indicação do estado de superfície em desenhos técnicos.1984**

\_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2005, 4 p.**

\_\_\_\_\_. **NBR 11780: Aditivos para concreto de cimento Portland – procedimentos. Rio de Janeiro. 1992, 2 p.**

\_\_\_\_\_. **NBR 14050: Sistemas de revestimentos de alto desempenho, à base de resinas epoxídicas e agregados minerais. 1998**

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the desing and construction of externally bonded systems for strengthening concrete structures – ACI 440, 2002, 3 p.**

ACI – AMERICAN CONCRETE ISNTITUTE. **State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures – ACI 440R-96, Detroit, Michigan, EUA, 1996.**

AGUIRRE M. A. M. Manufacturing method for composite material e. g. composite material bar, finished bar, involves using linear microwave oven to start polymerization of thermosetting resin of core and protruberances. F02718 – 2010.

BERAHOU K. H.; ADDA BEDIA E. A.; BENYOUCEF S.; TOUNSI A.; BENGUEDIAB M. Interfacial stresses in damaged RC beams strengthened with externally bonded CFRP plate. **Materials Science and Engineering**, A432, pp. 12-19-2006.

BENGAR H. A.; MAGHSOUDI A. A.; Experimental investigations and verification of debonding strain of RHSC continuous beams strengthened in flexure with externally bonded FRPs. **Materials and Structures**. vol. 43. pp 815-837 – 2010.

CALLISTER JR. W. D. **Materials Science and Engineering: an introduction**. 4<sup>th</sup> ed. New York: Jonh Wiley, 1994, 372 p.

CLELAND D. J.; BASHEER L. Pull-off adhesion testing for concrete repairs. **Magazine of Concrete Research**, N<sup>o</sup>.10, pp 771-776 - 2007.

DEMIR C.; KOLCU K.; IIKI A. Effects of loading rate and duration on axial behavior of concrete confined by fiber-reinforced polymer sheets. **Journal of composites for construction**. vol 14. pp. 146-151-2010.

FITZWILLIAM J.; BISBY L. A.; Slenderness effects on circular CFRP confined reinforced concrete columns. **Journal of composites for construction**. vol 14. pp 280-288 – 2010.

GALLARDO. S. M. A. G. **Reforço à flexão em vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono**. . Campinas, 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 17-19 p.

GALVEZ. L. E. M. **Reforço Estrutural à força cortante em vigas de concreto armado por meio de colagem externa de mantas flexíveis de fibras de carbono**.

Campinas, 2003. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 14-15 p.

GODAT A.; QU Z.; LU X. Z.; LABOSSIÈRE P.; YE L. P.; NEALE K. W.; Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips. **Journal of composites for construction**. vol. 14 pp. 260-271- 2010.

**HELENE, P.; TERZIAN, P.** Manual de dosagem e controle do concreto. ed. Pini, 1993, 5 p.

**ISO 1302:** Geometrical product specification (GPS) –indication of surface texture in technical product documentation. 2002.

**ISO 4287:** Geometrical Product Specifications (GPS) –surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters. 1997

LOEDOLFF, G.F. Low porosity concrete. In pore structure and materials properties. **Proceedings of the first international RILEM congress**, vol. 1, pp. 1-8 1987.

MACHADO. A. P.; **Fibra de Carbono** ed. BASF The Chemical Company, 2006.

MALIK A.R.; FOSTER S. J. Carbon fiber-reinforced polymer confined reactive powder concrete columns-experimental investigation. *ACI Structural Journal*. vol. 107 pp. 263-271-2010.

MALVAR L. J.; JOSHI N. R.; BERAN J. A.; NOVINSON T. – Environmental Effects on the Short-Term Bond of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites. **Journal of Composites for Construction** vol. 10 pp. 1061-1091-2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. La. Ed. São Paulo: Pini, 1994, 10-35-43 p.

MINDESS, S. – Relationship between strength and microstructure for cement based materials: an overview. In: **Proceedings of the materials research society**, edited: J.F. Young, pp. 53-68 - 1984.

PASSOS L. **Contribuição ao estudo das propriedades físicas e mecânicas dos polímeros reforçados com fibra de carbono.** Campinas, 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 96 p.

SALLABERRY R. D. **Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado.** Rio Janeiro, 2005. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, 14 p.

SILVA. A. O. B. **Reforço à flexão de vigas de concreto de elevada resistência por meio da colagem de manta polimérica reforçada com fibras de carbono.** Campinas, 2001. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 169 p.

STEPHEN KURTZ P.E; BALAGURU P; HELM J. Experimental Study of Interfacial Shear Stresses in FRP-Strengthened RC Beams. **Journal of Composites for Construction**, vol 12, nº 3, Jun - 2008.

SUBRAMANIAM K, V.; CARLONI C.; NOBILE L. Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, vol 74, pp. 578-594 - 2007.

TRIANAFILLOU,T. “Strengthening of structure with advanced FRPS”, In: Progress structural engineering and materials, **ACI Structural Journal**.v.1,n.2, pp. 126-134-1998.

WINSLOW D.;LIU D. The pore structure of paste in concrete. **Cement and Concrete research**. vol.20, pp 227-235 - 1989.

WOO SK.; LEE Y. Experimental study on interfacial behavior of CFRP-bonded concrete. **Journal of civil engineering**. vol.14 pp.385-393 – 2010.

ZHAO HM.; WANG SG.; WU ZM.; CHE GJ; Concrete slab installed with carbon fiber heating wire for bridge deck deicing. **Journal of transportation engineering-ASCE**. vol. 136 pp. 500-509 – 2010.

## **ANEXO 1 – Glossário.**

### **A**

**Adesivo Estrutural** – agente de colagem resinoso utilizado para a transferência das cargas existentes entre os elementos aderentes; usado para colar as superfícies de dois materiais sólidos (chamados de “aderidos”) com o objetivo de produzir uma junta com elevada resistência ao cisalhamento.

**Agente de Cura** – catalisador ou agente reativo que, quando adicionado à resina, produz a sua polimerização. Também denominado endurecedor ou iniciador.

**Amina** – são uma classe de compostos químico orgânico nitrogenado derivado do amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

### **B**

**Bisfenol** – utilizado na fabricação de policarbonato.

### **C**

**Carbonização** – transformação de um corpo em carvão.

**Cargas cíclicas** – ciclo ou período de cargas.

**Camada** - a aplicação simples de uma lâmina ou tecido do material fibroso. Camadas múltiplas, quando moldadas juntas, produzem o que se denomina de laminado.

**Catalisadores** – substância que produz catalise química em que a velocidade de uma reação é influenciada pela simples presença de um agente que permanece intacto.

**Coefficiente de Expansão Térmica** – a medida da mudança relativa na dimensão linear em um material, devido ao aumento unitário na temperatura do mesmo.

**Composto** – a combinação de dois ou mais materiais que diferem entre si na composição e na forma, em escala macro. Os constituintes retêm suas identidades; eles não se dissolvem ou se misturam completamente, embora atuando em conjunto. Normalmente os componentes podem ser identificados fisicamente e exibir uma interface entre si.

**Concentração de Tensões** - a ampliação dos valores das tensões localizadas em regiões de colagem, recortes, entalhes, furos ou vazios no concreto comparativamente às tensões previstas nas formulas usuais da mecânica que não levam em considerações essas regularidades.

**Conteúdo de Resina** – a quantidade de resina em um laminado expresso seja pela porcentagem da massa total ou pelo volume geral,

**Cura** – processo que causa uma transformação irreversível nas propriedades das resinas através de reações químicas. A cura é tipicamente completada ou afetada pela adição de agentes ou aceleradores de cura, com ou sem temperatura ou pressão.

## **D**

**Degradação** - declínio da qualidade das propriedades mecânicas do material.

**Dúctil** - é a propriedade física dos materiais de suportar a deformação plástica, sob a ação de cargas, sem se romper ou fraturar

**Durabilidade** - a capacidade do material para resistir às intempéries, ataques químicos, abrasão e outras condições de serviço.

## **E**

**Eletrostática** – estudo das leis e fenômenos da eletricidade.

**Epocloridina** – resina epóxi.

**Exposição** - processo de expor materiais à atuação ambiental por um determinado espaço e tempo.

**Epóxi** - polímero com polimerização de endurecimento por calor contendo um ou mais grupos epoxidicos curados através de reações com fenóis, aminas polifuncionais, anidridos e ácidos carboxílicos. É uma importante resina nos compostos, também utilizado como adesivo estrutural.

**Extrusão** – técnica de conformação onde um material é forçado, por compressão, através de um orifício em uma matriz.

## **F**

**Fator de empacotamento** - índice que varia de 0(zero) a 1(um) e representa a fração do volume de uma célula unitária que corresponde a esferas sólidas assumindo o modelo da esfera atômica rígida. Tem como objetivo informar quantos átomos podem ser organizados numa estrutura cristalina e determinar a qualidade no empilhamento.

**Fibra** – termo genérico para se referir a materiais filamentosos; a menor unidade de um material fibroso. Frequentemente usado como sinônimo de filamento.

**Fibra de Carbono** - fibra produzida através do tratamento térmico de uma fibra precursora orgânica, tal como o poliacrilonitril(PAN), em um ambiente inerte.

**Frágil** - quando o material se rompe sem sofrer grande deformação.

## **H**

**Híbrido** - a combinação de duas ou mais fibras diferentes em um composto, como, por exemplo, fibra de carbono e fibra de vidro.

## **I**

**Impregnação** - é o processo de saturação dos interstícios das fibras de reforço ou de substrato com a resina.

**Inerte** - é o processo em que um corpo não sofre variação de velocidade ou uma substância não reage.

**Inibidor** - substância que retarda uma reação química. Também é utilizado em certos tipos de monômeros e resinas para prolongar o tempo permitido de estocagem.

**Interface** – a fronteira ou a superfície entre dois meios diferentes, fisicamente distintos entre si.

## L

**Lamina Unidirecional** – lâmina flexível composta de vários filamentos do material de fibra ordenados segundo uma orientação comum em um plano. Essa é a configuração de todos os sistemas de reforço que utilizam a fibras.

## M

**Matriz** - resina ou polímero obrigatoriamente homogêneo no qual o sistema de fibras do composto está embebido.

**Micro fissuras** - fissuras formadas nos compostos quando as tensões localizadas excedem a resistência matriz.

**Módulo de elasticidade** – é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido.

**Monômeros** – molécula que consiste em único mero.

## O

**Orientação das fibras** – orientação dos filamentos em uma lâmina de fibra seca expressa como uma medida angular que se mede relativamente ao eixo longitudinal dos elementos reforçados.

## P

**PAN** – Poliacrilonitril; fibra precursora utilizada para fabricação da fibra de carbono.

**PICTH** - precursor baseado no alcatrão do petróleo ou do carvão, utilizado para fabricação da fibra de carbono.

**Poliamida** – é um polímero termoplástico composto por monômeros de amida.

**Poliaminas** – são moléculas de natureza policatiônica, presentes nas plantas, animais e microorganismo.

**Polimerização** – reação química na qual as moléculas de monômeros se ligam uma às outras para formar moléculas maiores onde o peso molecular é múltiplo do das substâncias originais.

**Polímero** - O composto formado pela reação de moléculas simples que combinadas em condições controladas produzem material com alto peso molecular.

**Pós-Cura** - cura adicional pela elevação da temperatura objetivando aumentar o nível de ligação interna; utilizado para melhorar as propriedades finais do polímero ou do laminado.

**Pultrusão** - processo contínuo que combina injeção e extrusão para a fabricação de compostos que possuem uma seção transversal constante.

## **R**

**Reologia** – ramo da física que estuda a viscosidade, a plasticidade, a elasticidade e o escoamento da matéria em geral.

**Relaxação** - redução de carga ou tensão em um material sob estado constante de deformação.

**Resina** – componente do sistema polimérico que requer um catalisador ou um endurecedor para sua polimerização ou cura em utilização nos compostos.

**Ruptura** – falha que é acompanhada por uma deformação plástica significativa; freqüentemente associada com uma falha por fluência.

## **S**

**Substrato de Concreto** - o substrato de concreto é definido como o concreto original e qualquer material cimentício utilizado para reparação ou recomposição do concreto original. O substrato pode ser constituído unicamente do concreto original ou inteiramente de materiais utilizados para reparação ou da combinação do concreto

original e materiais de reparação. O substrato inclui a superfície sobre a qual será instalado o sistema composto.

## **T**

**Tecido** – arranjo de fibras tecidas juntas em duas direções. O tecido pode ser interlaçado ou não, comprimido ou costurado.

**Temperatura de Transição Vítrea** – ponto médio da variação de temperatura acima do qual os componentes resinosos da matriz polimérica do sistema composto mudam do estado frágil para o estado dúctil.

**Tempo Útil de Emprego** – refere-se ao período em que uma resina epoxídica, já catalisada, pode ser trabalhada com espátula ou rolete. Também é conhecido como tempo de trabalhabilidade.

**Termofixo** - resina formada por uma ligação cruzada de cadeias poliméricas, não podendo ser derretida ou reorganizada através da aplicação de calor.

**Termoplástico** – resina que não possui uma ligação cruzada podendo geralmente ser repetidamente derretida ou reorganizada através de aplicação de calor.

## **V**

**Viscosidade** – propriedade do fluido, responsável por sua resistência ao escoamento.

**Volátil** – pode reduzir a gás ou a vapor.

**ANEXO 2 - Determinação da absorção de água, índice de vazios, massa seca, massa real e massa saturada.**

	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)	Resistência	Absorção de água (%)
	3546,70	2231,30	3794,20	15 MPa	6,55
	3566,04	2249,50	3784,60		
Média	3556,37	2240,40	3789,40		
	3830,20	2441,00	4006,90	40 MPa	4,56
	3852,90	2459,40	4026,30		
Média	3841,55	2450,20	4016,60		
	3792,00	2411,50	3955,40	60 MPa	
	3849,80	2443,20	3903,60		
Média	3820,90	2427,35	3929,50		2,84

	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)	Resistência	Índice de Vazios (%)
	3546,70	2231,30	3794,20	15 MPa	15,04
	3566,04	2249,50	3784,60		
Média	3556,37	2240,40	3789,40		
	3830,20	2441,00	4006,90	40 MPa	11,18
	3852,90	2459,40	4026,30		
Média	3841,55	2450,20	4016,60		
	3792,00	2411,50	3955,40	60 MPa	
	3849,80	2443,20	3903,60		
Média	3820,90	2427,35	3929,50		7,23

	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)	Resistência	Massa Seca (g/cm <sup>3</sup> )
	3546,70	2231,30	3794,20	15 MPa	2,30
	3566,04	2249,50	3784,60		
Média	3556,37	2240,40	3789,40		
	3830,20	2441,00	4006,90	40 MPa	2,45
	3852,90	2459,40	4026,30		
Média	3841,55	2450,20	4016,60		
	3792,00	2411,50	3955,40	60 MPa	
	3849,80	2443,20	3903,60		
Média	3820,90	2427,35	3929,50		2,54

	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)	Resistência	Massa Real (g/cm <sup>3</sup> )
	3546,70	2231,30	3794,20	15 MPa	2,70
	3566,04	2249,50	3784,60		
Média	3556,37	2240,40	3789,40		
	3830,20	2441,00	4006,90	40 MPa	2,74
	3852,90	2459,40	4026,30		
Média	3841,55	2450,20	4016,60		
	3792,00	2411,50	3955,40	60 MPa	2,76
	3849,80	2443,20	3903,60		
Média	3820,90	2427,35	3929,50		

	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)	Resistência	Massa Saturada (g/cm <sup>3</sup> )
	3546,70	2231,30	3794,20	15 MPa	2,45
	3566,04	2249,50	3784,60		
Média	3556,37	2240,40	3789,40		
	3830,20	2441,00	4006,90	40 MPa	2,56
	3852,90	2459,40	4026,30		
Média	3841,55	2450,20	4016,60		
	3792,00	2411,50	3955,40	60 MPa	2,62
	3849,80	2443,20	3903,60		
Média	3820,90	2427,35	3929,50		

### ANEXO 3 - Resultado de resistência de aderência.

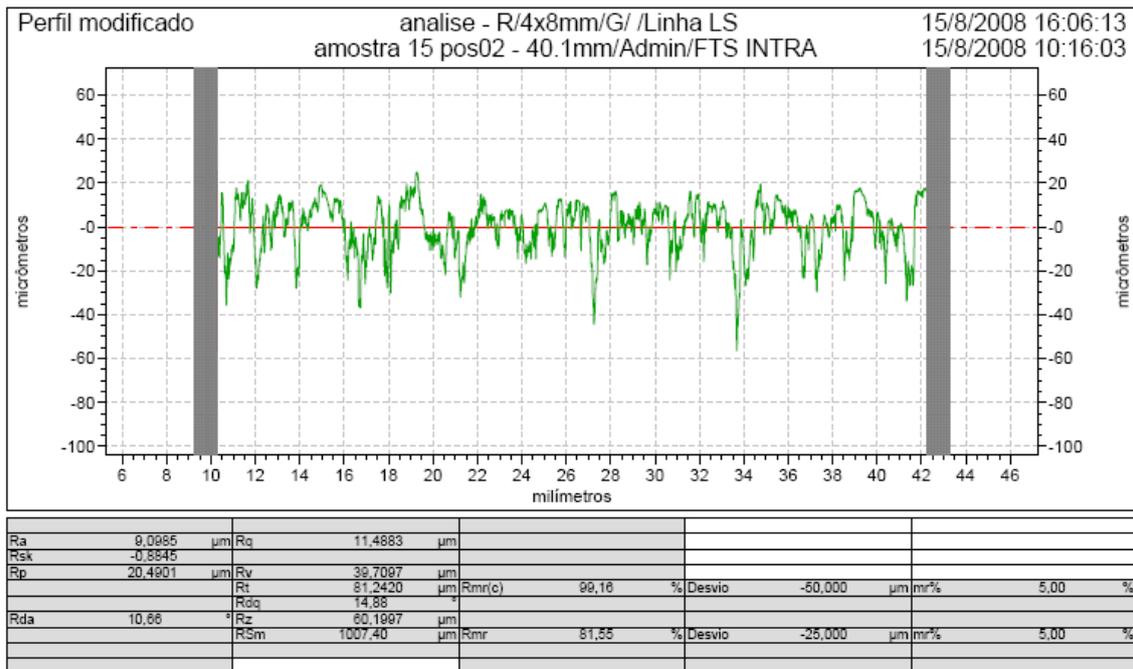
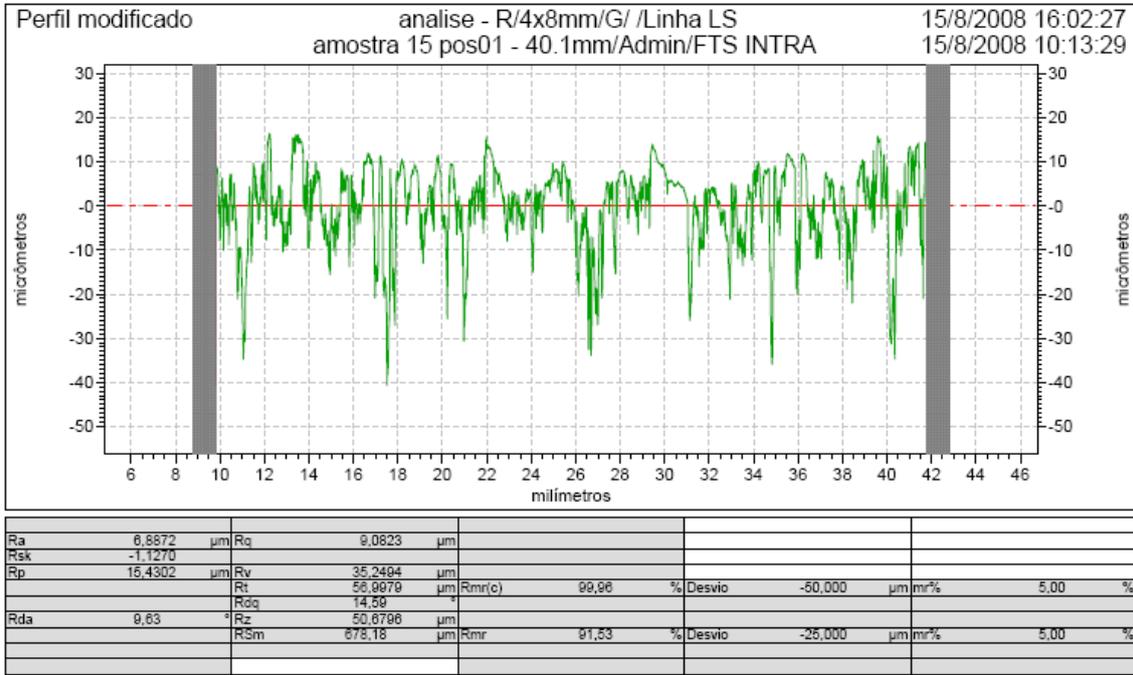
nºamostras	15 MPa	40 MPa	60MPa	resistência
1	2,18	3,12	3,24	Aderência (MPa)
2	2,46	3,04	3,52	
3	2,67	2,97	3,33	
4	2,17	1,92	3,84	
5	2,81	2,52	4,16	
6	2,15	2,72	2,36	
7	1,74	2,78	2,70	
8	2,13	2,54	2,69	
9	2,06	2,91	2,77	
10	2,46	2,46	2,79	
11	2,68	1,50	3,33	
12	2,90	2,78	3,04	
13	2,49	2,30	3,46	
14	2,60	2,39	3,26	
15	2,76	2,07	3,62	
	2,42	2,53	3,21	média

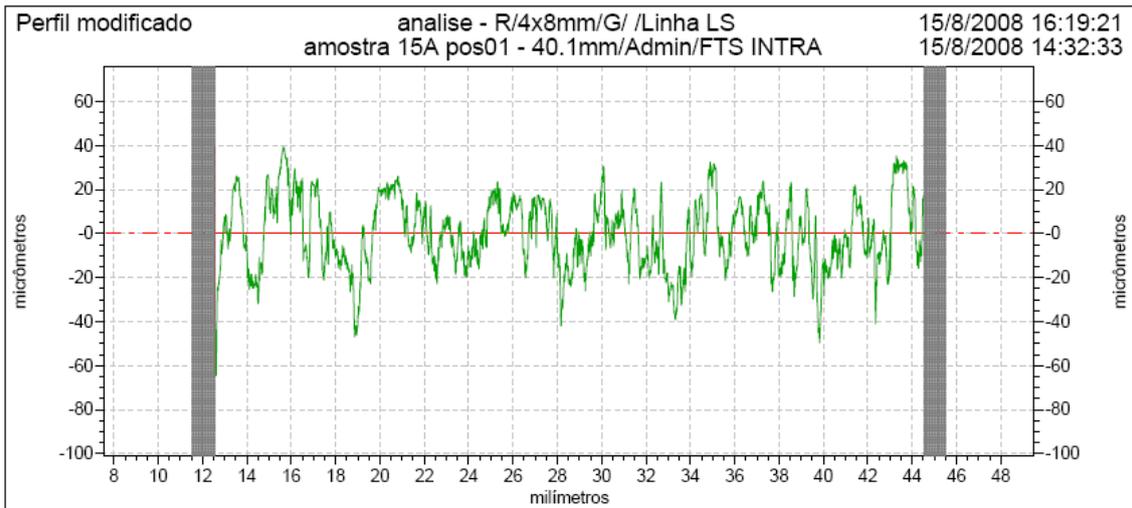
## ANEXO 4 - Resultado do ensaio de rugosidade.

	15MPa		40MPa		60MPa	
<b>Amostras</b>	<b>Ra</b>	<b>Rz</b>	<b>Ra</b>	<b>Rz</b>	<b>Ra</b>	<b>Rz</b>
<b>01</b>	6,8872	50,6798	7,6543	116,3278	16,5050	86,2986
<b>02</b>	9,0985	60,1997	10,5985	202,8831	14,9206	89,7635
<b>03</b>	5,6184	41,8121	10,7907	107,6908	11,3047	64,9993
<b>04</b>	6,6351	52,8258	7,3469	68,2127	16,3774	87,3194
<b>05</b>	7,7058	60,7128	11,0226	64,8597	12,4106	74,0999
<b>06</b>	6,4572	43,3648	11,8276	79,7193	8,8392	57,2462
<b>07</b>	9,5660	74,1467	21,2751	52,3594	10,7557	67,9528
<b>08</b>	9,8048	64,0777	15,4482	98,9592	12,7076	73,3770
<b>09</b>	10,6321	71,7698	10,6119	54,6046	14,1582	107,5637
<b>10</b>	12,9100	117,7897	10,7666	76,7618	11,6049	98,7046
<b>11</b>	8,5335	69,9678	8,7922	57,3204	13,4183	74,5687
<b>12</b>	8,1252	52,7833	12,4714	95,3284	11,7129	71,3149
<b>13</b>	13,2363	81,9665	11,8145	57,1273	10,2675	66,2462
<b>14</b>	11,0368	78,3708	11,2773	78,6491	14,2983	83,0329
<b>15</b>	15,1979	98,6231	9,7590	81,4520	12,8889	82,2641
<b>16</b>	8,5543	54,0158	11,1037	55,4907	12,1328	62,5861
<b>17</b>	11,5435	92,7103	8,0394	75,0646	14,4631	93,8459
<b>18</b>	8,4727	62,1660	8,3270	88,6586	14,6592	88,5434
<b>19</b>	14,1827	84,1606	12,6369	145,1908	10,3927	56,8803
<b>20</b>	15,1320	86,0108	9,0481	101,6161	11,3207	59,4208
<b>21</b>	11,7695	70,2603	15,4225	67,1456	11,6535	76,7148
<b>22</b>	17,5929	222,6329	10,7408	87,8970	11,2502	71,1169
<b>23</b>	9,8521	65,0772	6,1980	65,2185	12,0468	77,9215
<b>24</b>	8,2995	53,3543	9,2743	81,5845	17,0548	97,8540
<b>25</b>	7,0109	58,5214	14,9014	88,4583	16,1482	103,7163
<b>26</b>	8,8557	53,9701	32,5716	83,7105	19,0092	140,4533
<b>27</b>	6,8452	45,1772	20,9730	58,6048	15,1811	81,2260
<b>28</b>	9,6312	70,6700	10,0070	78,2514	18,4921	117,7851
<b>29</b>	6,6195	47,3373	8,5121	64,2803	14,0306	62,7484
<b>30</b>	7,0039	48,1402	8,1158	63,2101	20,1231	160,7365
<b>31</b>	8,7316	73,3284	9,3121	89,6996	10,2675	62,4587
<b>32</b>	8,6262	62,8297	11,5892	52,5795	13,1704	79,6047
<b>33</b>	10,2579	79,0579	9,1732	100,8361	10,2769	69,1166
<b>34</b>	6,9733	54,0296	6,2343	71,5690	11,0199	78,4309
<b>35</b>	7,7924	59,4765	6,8366	43,9384	8,9548	71,3056
<b>36</b>	6,8200	57,6110	13,7976	67,5898	9,9322	60,3045
<b>Média</b>	<b>9,5003</b>	<b>69,9897</b>	<b>11,5075</b>	<b>81,1903</b>	<b>13,1597</b>	<b>82,1534</b>

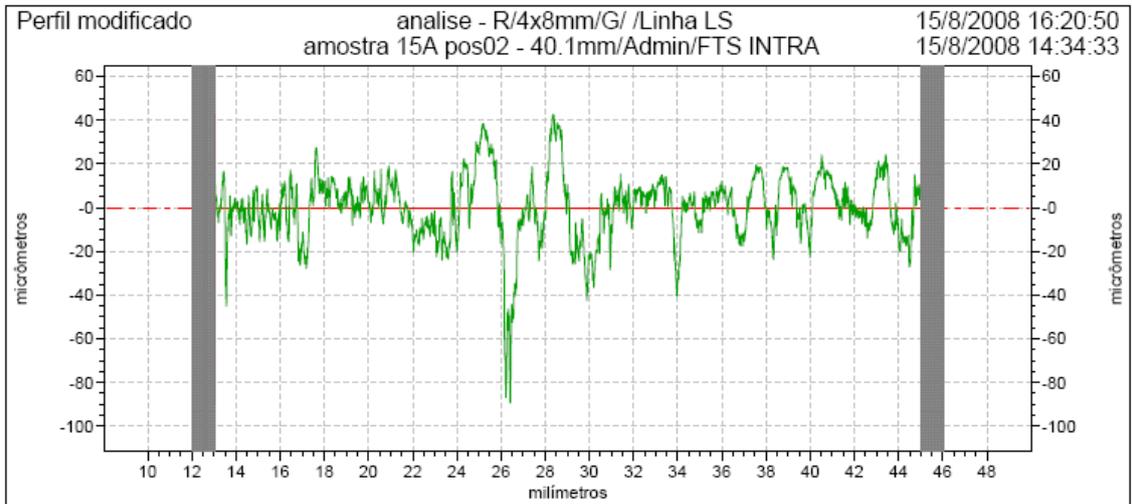
## ANEXO 5 – Gráficos de rugosidade.

### Gráfico de rugosidade nas amostras de resistência 15 MPa

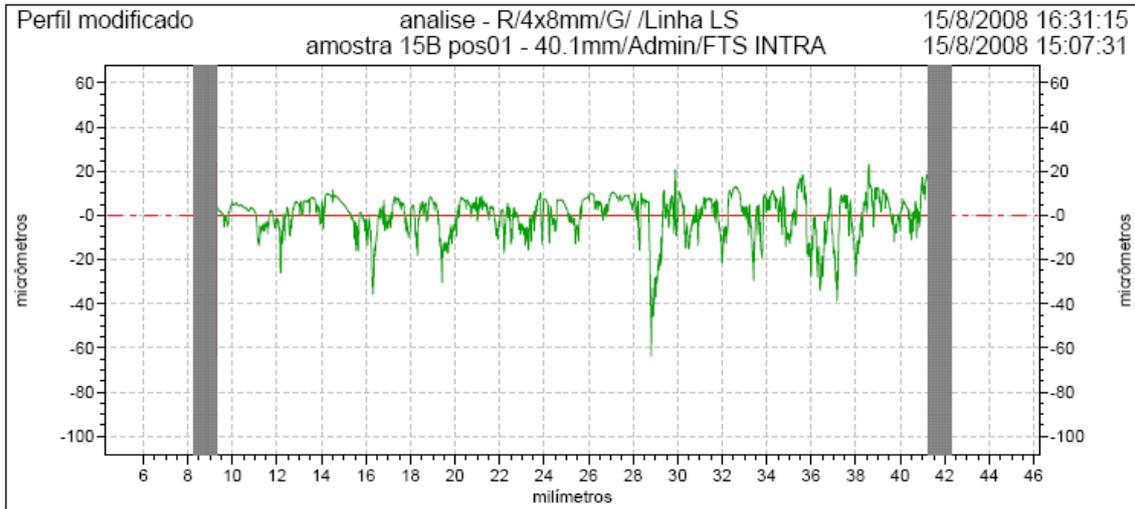




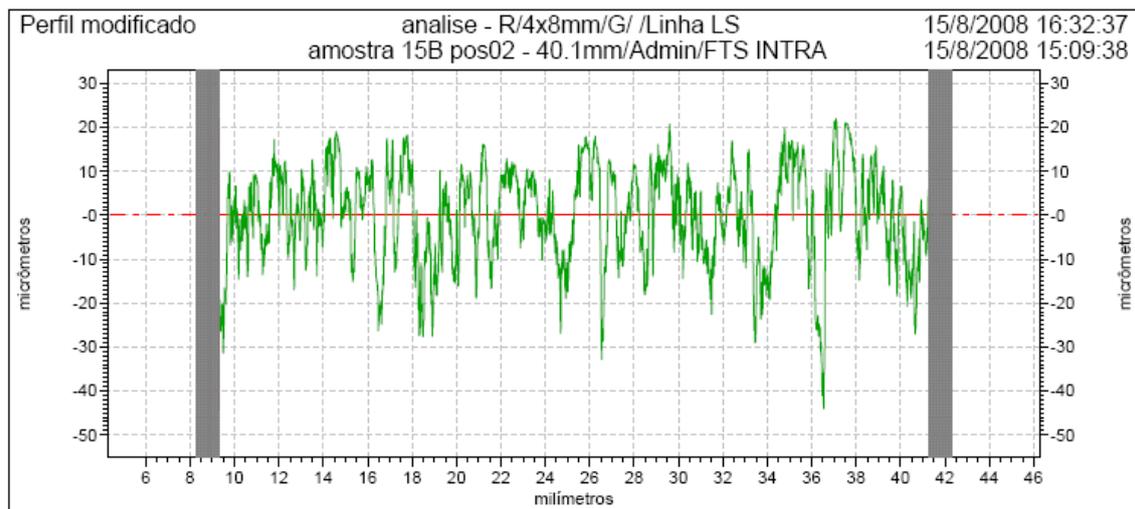
Ra	13,2363	μm	Rq	16,1509	μm				
Rsk	-0,1420								
Rp	33,2376	μm	Rv	48,7280	μm				
			Rt	103,5893	μm	Rmr(c)	95,07	%	Desvio
			Rdq	17,37	°				-50,000
Rda	12,87	°	Rz	81,9655	μm	Rmr	47,81	%	Desvio
			RSm	955,52	μm				-25,000
									μm
									mr%
									5,00
									%



Ra	11,0368	μm	Rq	15,1810	μm				
Rsk	-0,8364								
Rp	27,4013	μm	Rv	50,9895	μm				
			Rt	132,0101	μm	Rmr(c)	96,86	%	Desvio
			Rdq	15,75	°				-50,000
Rda	11,56	°	Rz	78,3708	μm	Rmr	62,50	%	Desvio
			RSm	1319,65	μm				-25,000
									μm
									mr%
									5,00
									%

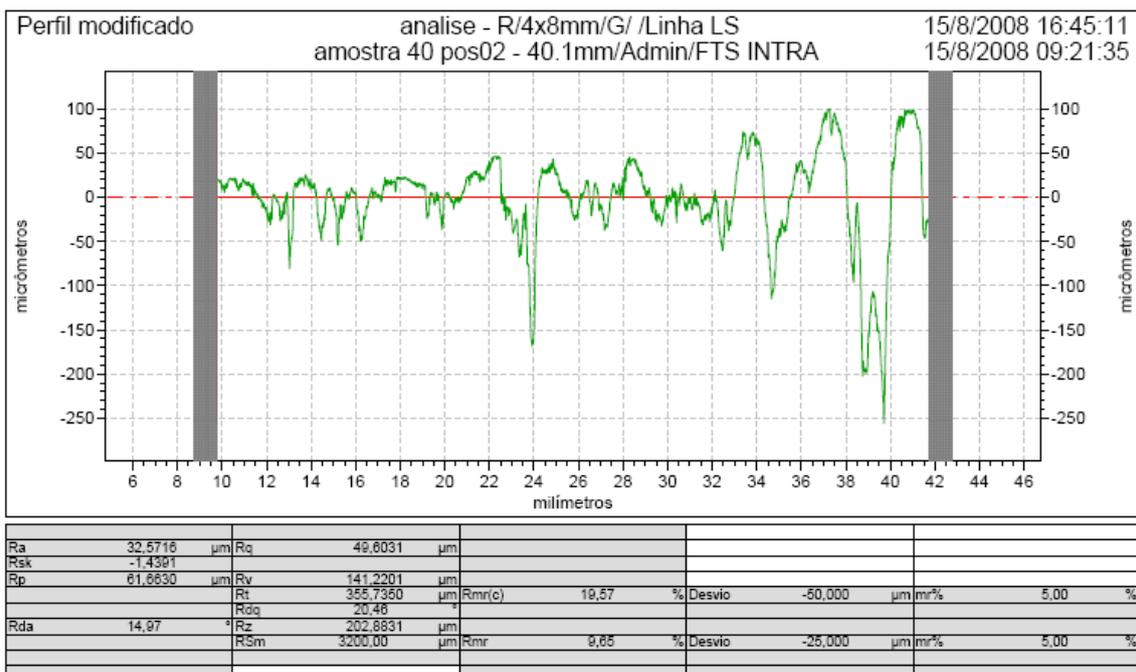
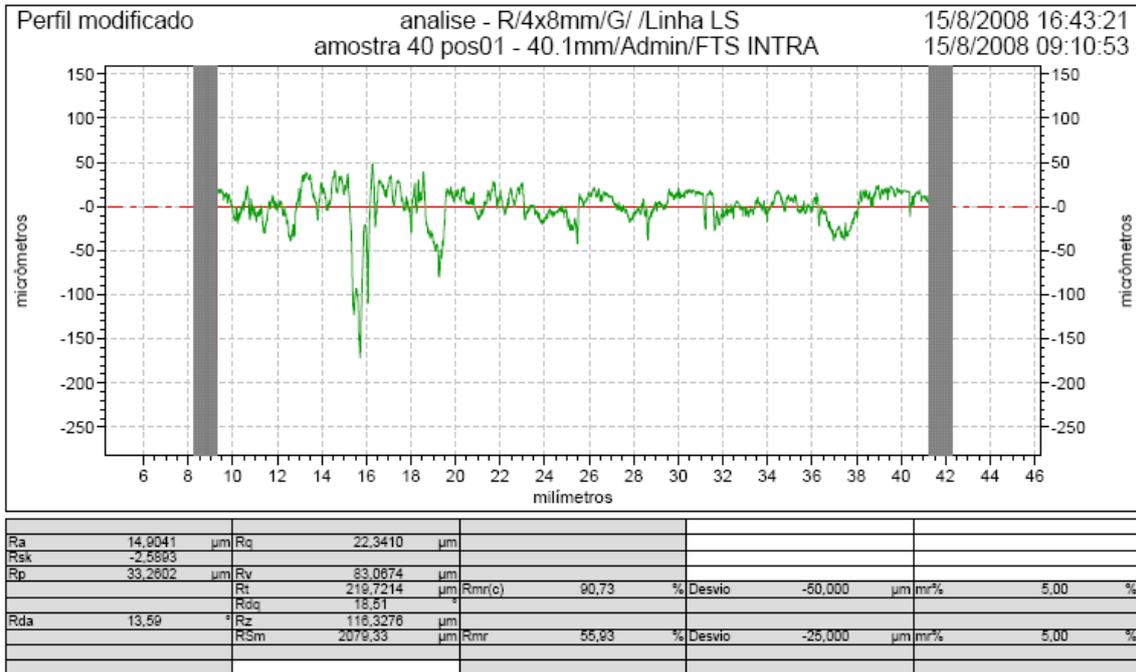


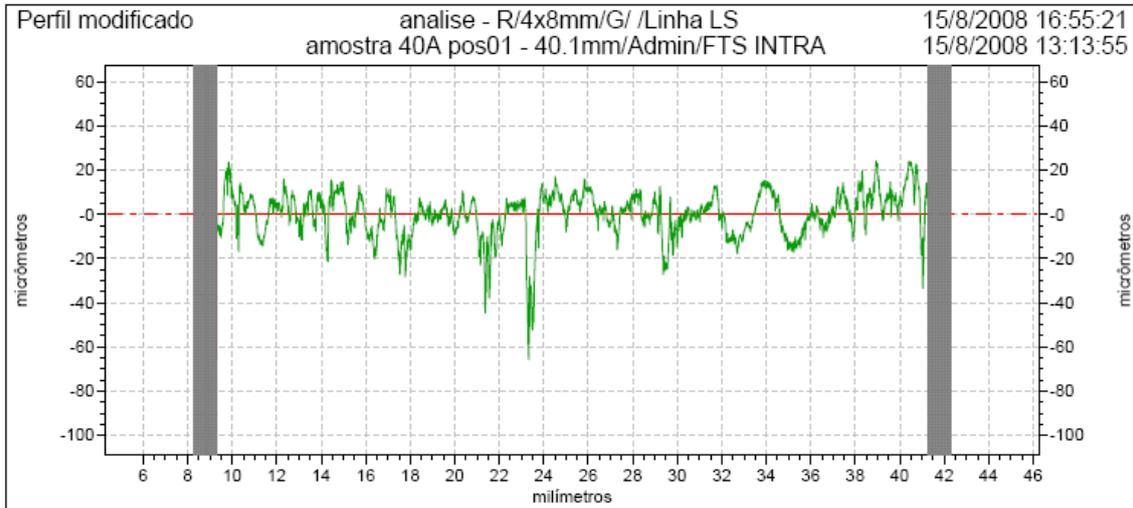
Ra	7,0109	µm	Rq	9,3882	µm				
Rsk	-1,5275								
Rp	16,3969	µm	Rv	42,1245	µm				
			Rt	86,8745	µm	Rmr(c)	99,56	% Desvio	-50,000
			Rdq	14,08	µm				µm/mr%
Rda	9,00	µm	Rz	58,6214	µm	Rmr	92,75	% Desvio	-25,000
			RSm	1020,00	µm				µm/mr%
									5,00
									%



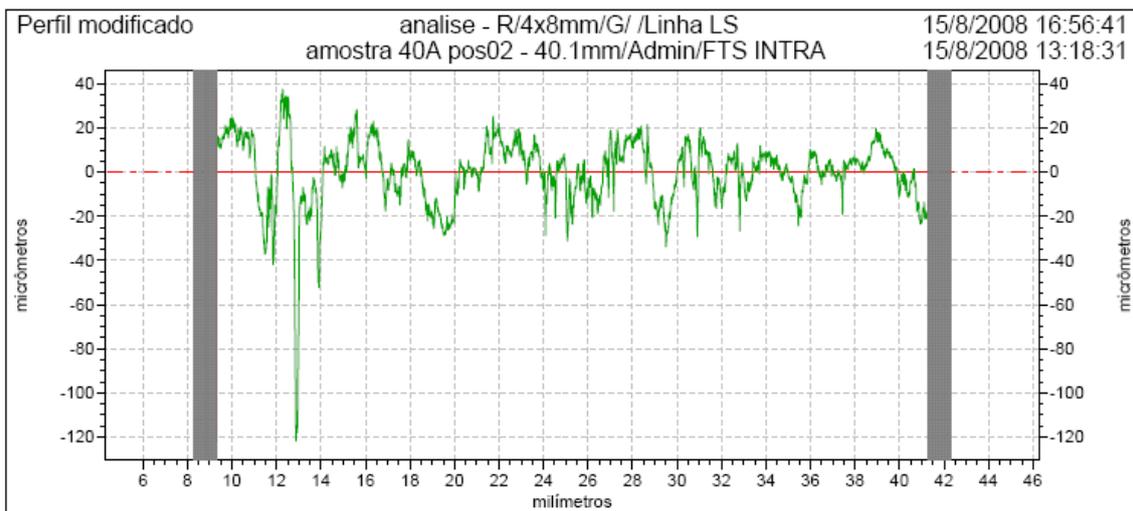
Ra	8,8557	µm	Rq	10,9155	µm				
Rsk	-0,5478								
Rp	20,0199	µm	Rv	33,9502	µm				
			Rt	66,0182	µm	Rmr(c)	99,58	% Desvio	-50,000
			Rdq	15,51	µm				µm/mr%
Rda	11,47	µm	Rz	53,9701	µm	Rmr	80,04	% Desvio	-25,000
			RSm	700,87	µm				µm/mr%
									5,00
									%

## Gráfico de rugosidade nas amostras de resistência 40 MPa



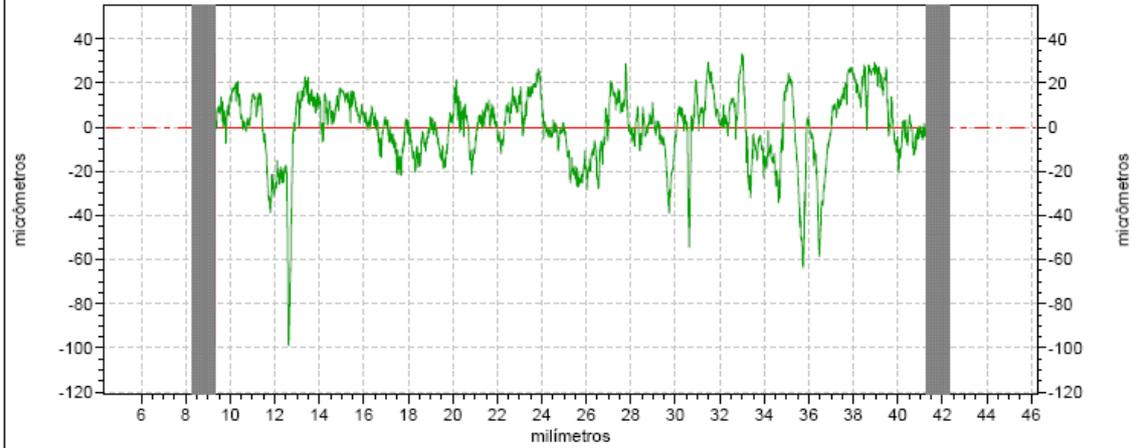


Ra	7,6543	μm	Rq	10,2925	μm				
Rsk	-1,2224								
Rp	20,2152	μm	Rv	36,9121	μm				
			Rt	89,8167	μm	Rmr(c)	99,05	%	Desvio
			Rdq	13,82	μm				-50,000
Rda	9,84	μm	Rz	57,1273	μm				μm
			RSm	1212,96	μm	Rmr	88,39	%	Desvio
									-25,000
									μm
									mm%
									5,00
									%



Ra	10,5985	μm	Rq	14,7738	μm				
Rsk	-2,0211								
Rp	25,9155	μm	Rv	52,7336	μm				
			Rt	159,1342	μm	Rmr(c)	98,36	%	Desvio
			Rdq	15,01	μm				-50,000
Rda	10,51	μm	Rz	78,8491	μm				μm
			RSm	2133,33	μm	Rmr	73,07	%	Desvio
									-25,000
									μm
									mm%
									5,00
									%

Perfil modificado analise - R/4x8mm/G/ /Linha LS  
amostra 40B pos01 - 40.1mm/Admin/FTS INTRA 15/8/2008 17:07:33  
15/8/2008 14:02:18



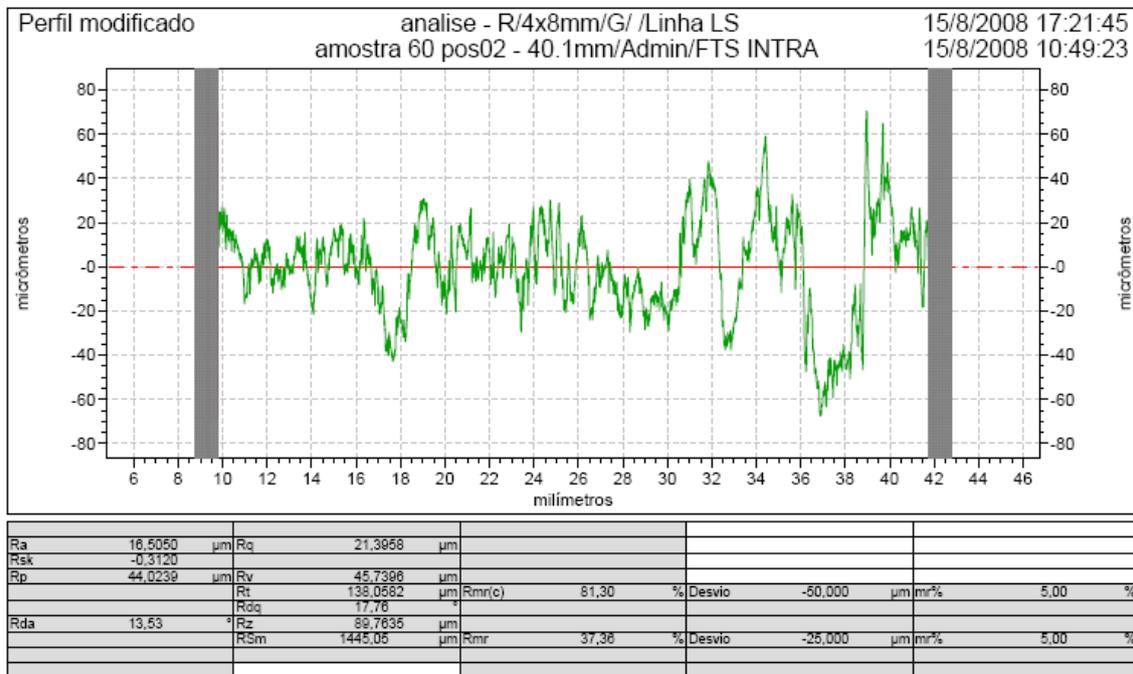
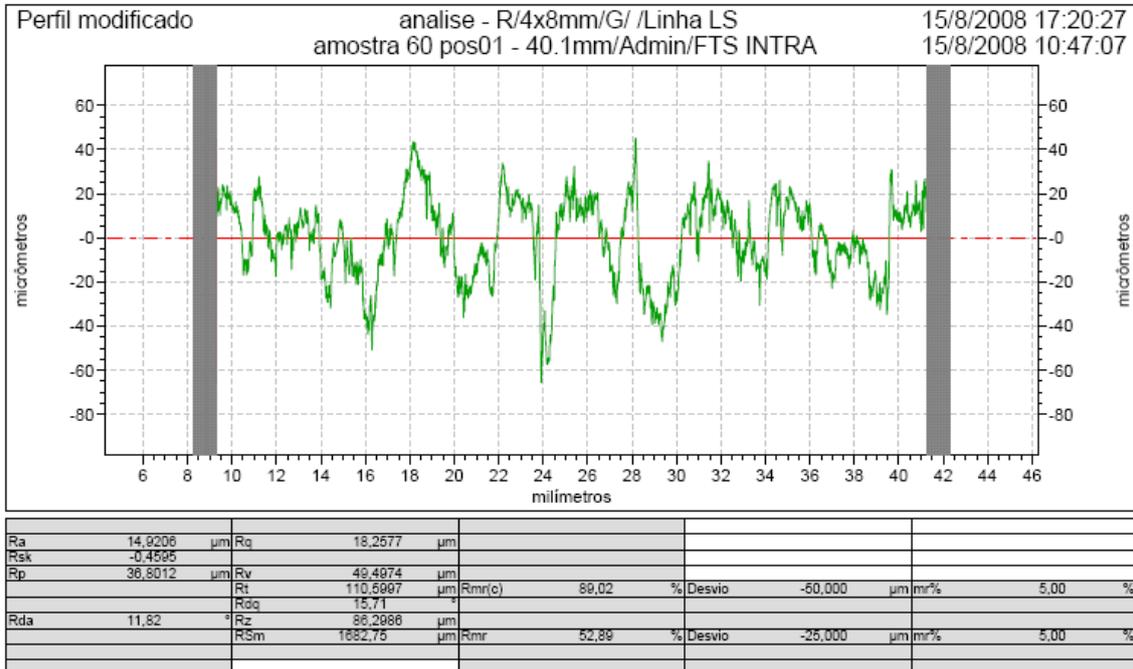
Ra	11,8145	μm	Rq	15,7567	μm				
Rsk	-1,1417								
Rp	27,9657	μm	Rv	60,4926	μm				
			Rt	132,0768	μm	Rmr(c)	95,49	% Desvio	-50,000
			Rdq	15,75	μm				5,00
Rda	11,66	μm	Rz	88,4583	μm	Rmr	82,02	% Desvio	-25,000
			RSm	2455,27	μm				5,00

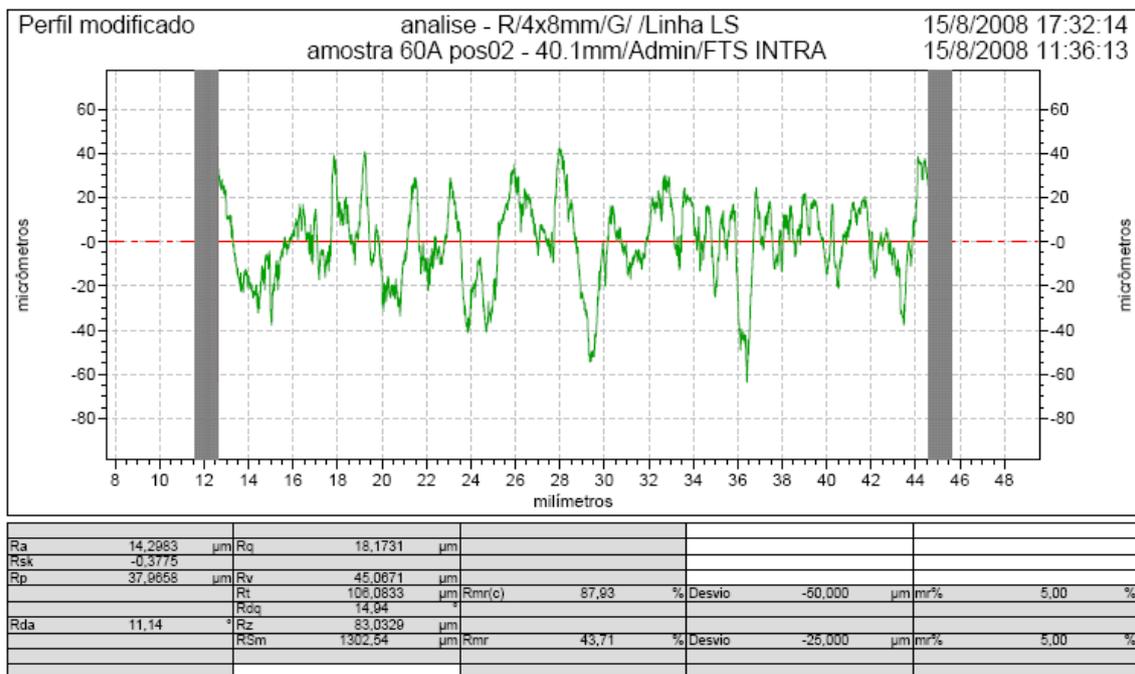
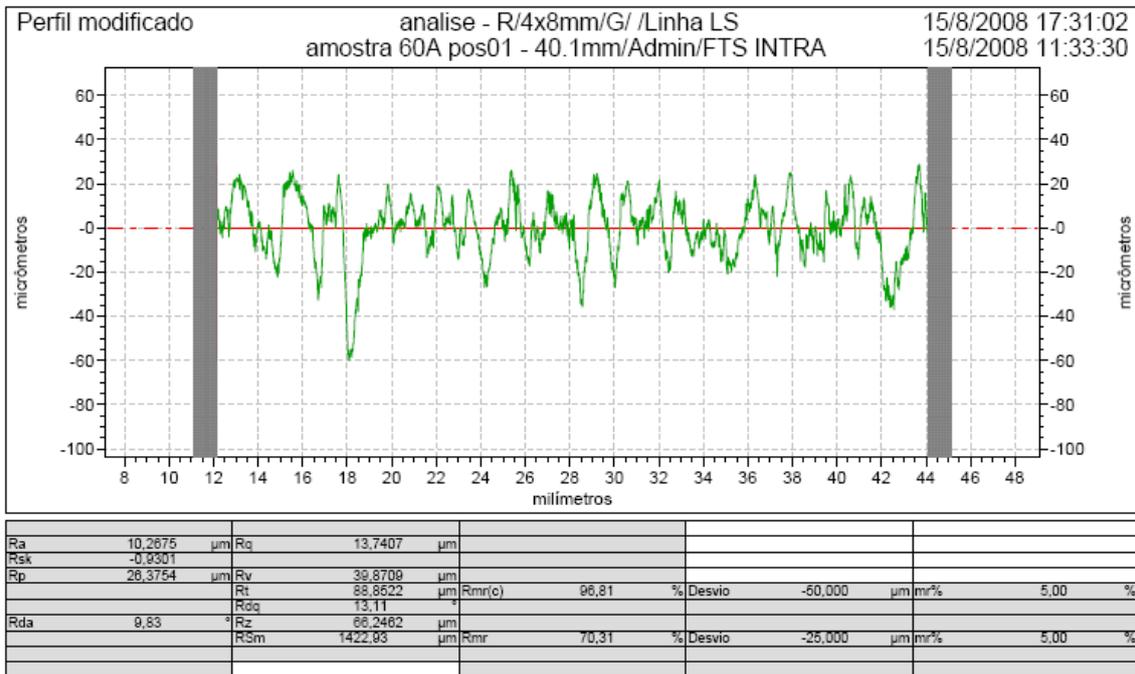
Perfil modificado analise - R/4x8mm/G/ /Linha LS  
amostra 40B pos02 - 40.1mm/Admin/FTS INTRA 15/8/2008 17:08:44  
15/8/2008 14:04:44

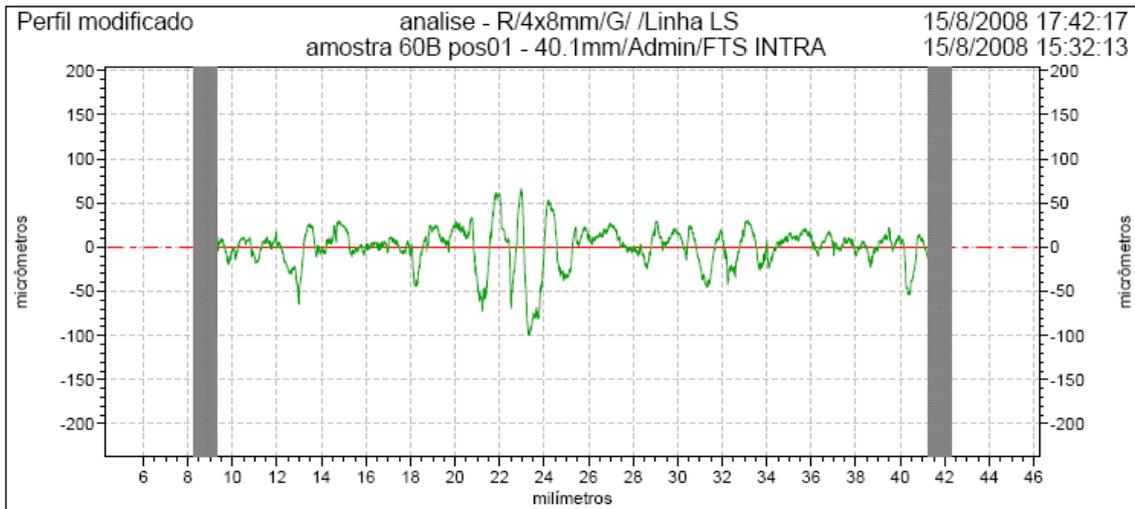


Ra	11,2773	μm	Rq	14,8731	μm				
Rsk	-1,0157								
Rp	28,4130	μm	Rv	54,2975	μm				
			Rt	121,4524	μm	Rmr(c)	96,48	% Desvio	-50,000
			Rdq	17,18	μm				5,00
Rda	13,03	μm	Rz	83,7105	μm	Rmr	85,74	% Desvio	-25,000
			RSm	1499,93	μm				5,00

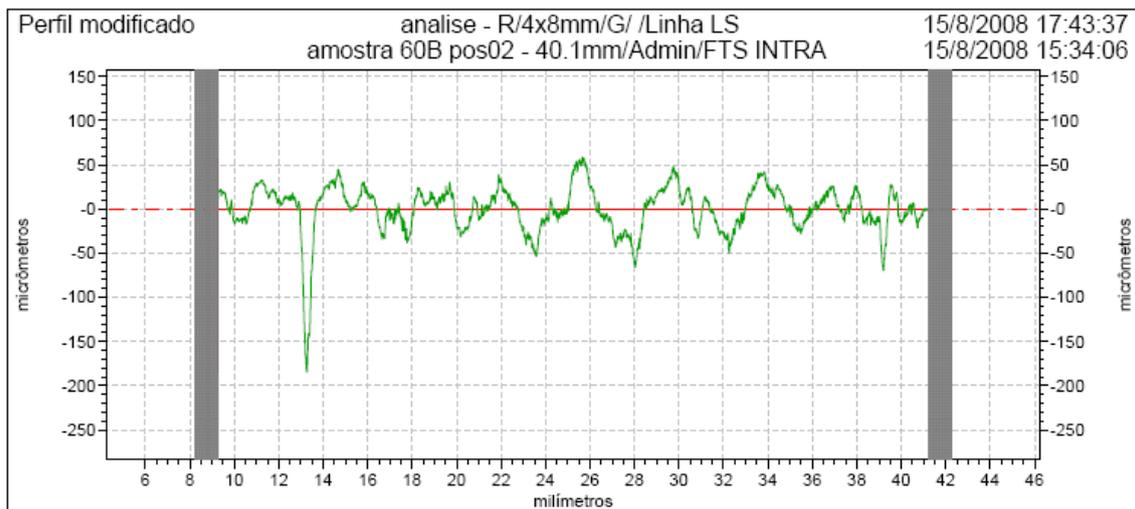
## Gráfico de rugosidade nas amostras de resistência 60 MPa







Ra	16,1482	μm	Rq	22,9504	μm				
Rsk	-1,0806								
Rp	37,8665	μm	Rv	65,8498	μm				
			Rt	168,0005	μm	Rmr(c)	85,89	% Desvio	-50,000
			Rdq	15,62	μm				5,00
Rda	11,34	μm	Rz	103,7183	μm	Rmr	54,07	% Desvio	-25,000
			RSm	1800,00	μm				5,00



Ra	19,0092	μm	Rq	26,7677	μm				
Rsk	-1,8471								
Rp	47,0245	μm	Rv	93,4287	μm				
			Rt	243,1210	μm	Rmr(c)	77,77	% Desvio	-50,000
			Rdq	15,91	μm				5,00
Rda	11,73	μm	Rz	140,4633	μm	Rmr	36,80	% Desvio	-25,000
			RSm	2285,71	μm				5,00

## ANEXO 6 - Dosagem do concreto: Quantitativo de materiais.

### DADOS DOS MATERIAIS

Tipo de cimento	CP II –E CLASSE 32
Massa específica do cimento (kg/dm <sup>3</sup> ) $\gamma_c$	3,14
Massa específica do agregado miúdo (kg/dm <sup>3</sup> ) $\gamma_a$	2,62
Massa específica do agregado graúdo (kg/dm <sup>3</sup> ) $\gamma_p$	2,9
Água proveniente do abastecimento público	1,0

c = proporção de cimento

a = proporção de agregado miúdo (areia)

p = proporção de agregado graúdo (brita)

x = relação água/cimento

$$c = \frac{1000}{\left(\frac{c}{\gamma_c}\right) + \left(\frac{a}{\gamma_a}\right) + \left(\frac{p}{\gamma_p}\right) + x}$$

Traços empregados

	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>	<b>Água</b>	<b>Plastificante</b>
Traço 15 MPa	1,00	3,00	3,00	0,63	-
Traço 40 MPa	1,00	2,00	3,00	0,40	-
Traço 60 MPa	1,00	2,00	2,30	0,33	0,9

<b>VOLUME</b>	<b>Traço 15 MPa</b>		<b>Traço 40 MPa</b>		<b>Traço 60 MPa</b>	
	<b>Qtd</b>	<b>Volume</b>	<b>Qtd</b>	<b>Volume</b>	<b>Qtd</b>	<b>Volume</b>
<b>CONCRETO (m<sup>3</sup>)</b>						
Placas 30x30x5	3	0,0135	3	0,0135	3	0,0135
Cilindros 10x20	8	0,0125	8	0,0125	8	0,0125
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>0,026</b>	<b>11</b>	<b>0,026</b>	<b>11</b>	<b>0,026</b>

$$c = \frac{0,0261}{\left(\frac{1}{3,14}\right) + \left(\frac{3}{2,62}\right) + \left(\frac{3}{2,9}\right) + 0,63} = 8,34 \text{kg}$$

$$c = \frac{0,0261}{\left(\frac{1}{3,14}\right) + \left(\frac{3}{2,62}\right) + \left(\frac{3}{2,9}\right) + 0,40} = 10,37 \text{kg}$$

$$c = \frac{0,0261}{\left(\frac{1}{3,14}\right) + \left(\frac{3}{2,62}\right) + \left(\frac{3}{2,9}\right) + 0,33} = 11,83 \text{kg}$$

	Consumo de Materiais				
	Cimento	areia	brita	agua	Plastificante (ml)
15MPa	8,34	25,02	25,02	5,25	-
40MPa	10,37	20,74	31,11	4,15	-
60MPa	11,83	23,66	27,21	3,90	106

$$c = \frac{1000}{\left(\frac{1}{3,14}\right) + \left(\frac{3}{2,62}\right) + \left(\frac{3}{2,9}\right) + 0,63} = 319,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c = \frac{1000}{\left(\frac{1}{3,14}\right) + \left(\frac{3}{2,62}\right) + \left(\frac{3}{2,9}\right) + 0,40} = 397,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c = \frac{1000}{\left(\frac{1}{3,14}\right) + \left(\frac{3}{2,62}\right) + \left(\frac{3}{2,9}\right) + 0,33} = 453,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

	Consumo de Materiais (m <sup>3</sup> )				
	Cimento	Areia	Brita	Água	Plastificante(l)
15MPa	319,5	958,5	958,5	201,2	-
40MPa	397,1	794,2	1.191,3	158,8	-
60MPa	453,2	906,4	1.042,3	149,5	4,08