



**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS CAMADAS DE FIBRA DE CARBONO EM
REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUJEITOS A CONFINAMENTO**

BELO HORIZONTE
2014



GABRIEL FARIA NOGUEIRA
OLÍVIA CRISTINA DE MEDEIROS SILVA
OTÁVIO GOMES RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS CAMADAS DE FIBRA DE CARBONO EM
REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUJEITOS A CONFINAMENTO**

Projeto de pesquisa desenvolvido para
apresentação de Trabalho de Conclusão do Curso
de Pós Graduação em Patologia nas Obras Civis
para obtenção do grau de especialista.

Prof. Orientador: Dr. Rodrigo Moysés Costa

BELO HORIZONTE
2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, nossa gratidão pela oportunidade de estudar e nos superar a cada dia.

Aos nossos familiares por compreender nossa ausência e sempre nos apoiar.

Ao laboratório Lab.Con, em especial ao Engenheiro Marcelo Fonseca Araujo, que viabilizou nossos ensaios e comprou nossa ideia contribuindo para as conclusões deste projeto.

A Solução Engenharia através de seu Diretor e Co-orientador deste trabalho, Otávio de Borba Vieira, pelo patrocínio com a fibra de carbono, resinas e mão de obra para preparação dos CP's

Ao estatístico e futuro engenheiro Thiago Moura Queiroz e Oliveira pela valiosa análise estatística e explicações.

Ao nosso orientador, Dr. Rodrigo Moyses pela colaboração dada e ensinamentos compartilhados.

Aos professores do curso de Patologia das Obras Civis pela dedicação e experiência dividida com profissionalismo e excelência.

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS CAMADAS DE FIBRA DE CARBONO EM REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUJEITOS A CONFINAMENTO

Por

GABRIEL FARIA NOGUEIRA
OLÍVIA CRISTINA DE MEDEIROS SILVA
OTÁVIO GOMES RIBEIRO

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO
IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS PROFESSORES A SEGUIR
MENCIONADOS.

Belo Horizonte (MG) ____ de ____ de ____.

Rodrigo Moysés Costa, Dr

Ubirajara Alvim Camargos, Esp

Otávio de Borba Viera, Esp

RESUMO

O presente trabalho avalia a eficiência das camadas de fibra de carbono em reforço de elementos estruturais sujeitos a confinamento.

A metodologia aplicada foi o programa experimental, com ensaios de grupos de 3 corpos de prova de concreto, reforçados com camadas de fibra de carbono e avaliados o incremento de resistência através de ensaio de compressão axial.

Através do experimento foi possível verificar um incremento de resistência da ordem de 190% para o grupo de corpos de prova em que foram utilizadas 4 camadas de PRFC, sendo que com 5 camadas chegamos ao limite da prensa de 200 toneladas.

Palavras-chave: reforço estrutural, compressão elementos estruturais, confinamento, compósitos de fibra de carbono.

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão	15
Figura 2 – Ensaio de tração direta	16
Figura 3 – Ensaio de tração por compressão diametral	17
Figura 4 – Ensaio de tração na flexão.....	17
Figura 5 – Diagrama de esforços solicitantes.....	18
Figura 6 – Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal	19
Figura 7 – Módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).....	19
Figura 8 – Deformações longitudinais e transversais	20
Figura 9 – Ilustração de algumas situações de confinamento	27
Figura 10 – Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com PRF e arredondamento dos cantos	28
Figura 11 – Possíveis esquemas de arranjo de reforço transversal	29
Figura 12 – Prensa hidráulica e elétrica digital Solocap/Tecnotest Modelo KG-70.....	33
Figura 13 – Nível de avaliação do desempenho do ensaio	42
Figura 14 – Coeficiente d_2	43
Figura 15 – Tabela de resultado de ensaios de CP's sem camada de PRFC	43
Figura 16 – Tabela de resultado de ensaios de CP's com uma camada de PRFC	45
Figura 17 – Tabela de resultado de ensaios de CP's com duas camadas de PRFC...	46
Figura 18 – Tabela de resultado de ensaios de CP's com três camadas de PRFC.....	47
Figura 19 – Tabela de resultado de ensaios de CP's com quatro camadas de PRFC.	48
Figura 20 – Tabela de resultado de ensaios de CP's com cinco camadas de PRFC ..	49
Figura 21 – Gráfico dos resultados dos ensaios e média de resistência por grupo de CP's.....	51
Figura 22 – Gráfico do ganho médio de resistência por grupo de CP's.....	52
Figura 23 – Gráfico do ganho médio % de resistência por grupo de CP's.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição da resistência à compressão por grupo	53
Tabela 2 – Comparações da resistência à compressão entre os grupos	54
Tabela 3 – Comparações de resistência à compressão dois a dois	54
Tabela 4 – Comparações da resistência à compressão entre os grupos dois a dois...	55

LISTA DE FOTOS

Fotos 1 e 2 – Recebimento do concreto e lacre do caminhão	20
Fotos 3 e 4 – Determinação do abatimento do concreto através do <i>slump test</i>	21
Fotos 5 e 6 – Determinação do abatimento do concreto através do <i>slump test</i>	21
Fotos 7 e 8 – Moldagem de CP's	24
Foto 9 – Identificação e acondicionamento dos CP's	25
Foto 10 – Início do processo de cura úmida dos CP's	26
Foto 11 – Preparação do primer	27
Foto 12 – Aplicação do primer	27
Foto 13 – Resina de Saturação.....	27
Foto 14 – CP's com resina aplicada.....	27
Foto 15 – Fibras de Carbono cortadas.....	28
Foto 16 – Primeira camada de fibra	28
Foto 17 – Aplicação da Segunda Camada de Fibra	28
Foto 18 – CP's confinados	29
Foto 19 – CP's confinados separados por grupo de camadas	29
Foto 20 – CP's confinados com fibra de carbono e retificados.....	30
Foto 21 – Tela de leitura da prensa	30
Foto 22 – CP antes do início rompimento	34
Foto 23 – Início do rompimento do CP.....	34
Foto 24 – Rompimento de um CP com uma camada de reforço de fibra	35
Foto 25 – Rompimento de um CP com duas camadas de reforço de fibra.....	36
Foto 26 – Rompimento de um CP com três camadas de reforço de fibra	37
Foto 27 – Rompimento de um CP com quatro camadas de reforço de fibra	38
Foto 28 – CP com cinco camadas antes do rompimento	40
Foto 29 – Rompimento do CP com cinco camadas de reforço de fibra.....	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1. Objetivo geral	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3 JUSTIFICATIVAS	2
1.3.1. Tecnológicas	2
1.3.2. Econômicas	2
1.3.3. Sociais	2
1.3.4. Ecológicas	3
1.4 HIPÓTESE	3
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 CONCRETO	4
2.1.1. Massa específica	4
2.1.2. Propriedades mecânicas	4
2.1.3. Resistência à compressão	4
2.1.4. Resistência à tração	6
2.1.5. Módulo de elasticidade	8
2.1.6. Coeficiente de Poisson	10
2.1.7. Módulo de Elasticidade Transversal	11
2.1.8. Estados múltiplos de tensão	11
2.1.9. Estrutura interna do concreto	11
2.1.10. Deformações	12
2.1.10.1. Retração	12
2.1.10.2. Expansão	12
2.1.10.3. Deformação imediata	12
2.1.10.4. Fluência	12

2.1.10.5. Deformações térmicas.....	13
2.1.11. Fatores que influem nas propriedades do concreto	13
2.2 ENSAIO DE CORPO DE PROVA À COMPRESSÃO AXIAL.....	13
2.3 SISTEMA DE REFORÇO ESTRUTURAL EM FIBRA DE CARBONO.....	14
2.3.1. Fibra de Carbono	14
2.3.2. Resinas de colagem.....	15
2.4 CONFINAMENTO	16
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	19
3.1 MATERIAIS	20
3.2.1. Concreto.....	20
3.2.2. Polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC)	22
3.2 EQUIPAMENTO	22
3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	23
3.4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO	29
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	31
3.5.1. Descrição do estudo.....	31
3.5.1.1. Etapas das análises estatísticas	32
4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	34
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS	34
4.2 Análise geral dos resultados	41
4.3 RESULTADOS ESTATÍSTICOS	43
4.3.1 Análise descritiva	44
4.1.2. Comparações entre os grupos.....	44
4.2.2. Validação dos ensaios.....	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	46
5.1 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
7 ANEXOS.....	48

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de reforço em estruturas de concreto armado vêm sendo largamente utilizadas na construção civil, devido a vários fatores, como falhas de projeto, erros de construção, falta de manutenção adequada e por vezes mudança do uso para o qual as estruturas foram projetadas. (SOUZA & RIPPER, 1998; BEBER, 2003; MILITITSKY et al., 2005)

Nos últimos anos, diversos materiais assim como novas tecnologias foram desenvolvidas na área de reforço das estruturas com o objetivo de aumentar cada vez mais a vida útil das mesmas. (BEBER, 2003)

Uma das mais notáveis técnicas envolve a utilização de materiais compósitos de fibra de carbono que, diferentemente do aço, não são afetados pela corrosão eletroquímica e resistem aos efeitos corrosivos de ácidos, álcalis, sais e outros agentes agressivos (HOLLAWAY, 1993). Os materiais compósitos podem resolver uma série de problemas dentro da área de reforços estruturais, tais como a diminuição do tempo de intervenção na estrutura. A combinação de fibras e polímeros permite que o elemento de reforço seja confeccionado para atender a uma solução particular, tanto em relação à sua geometria, quanto às suas propriedades mecânicas (BEBER, 1999).

O efeito de confinamento do concreto em pilares submetidos à compressão axial traz diversos benefícios ao seu comportamento estrutural, dentre os quais se destacam o aumento na resistência à compressão axial do concreto pela ação das pressões laterais, e a melhoria da ductilidade do elemento estrutural. Em função destas vantagens, o confinamento é uma das principais técnicas de reforço de pilares de concreto.

Diante deste assunto o projeto de pesquisa buscará avaliar a eficiência das camadas de fibra de carbono em reforço de elementos estruturais sujeitos a confinamento.

1.1 PROBLEMA

A partir de quantas camadas de reforço com fibra de carbono o ganho de resistência à compressão passa a ser irrelevante?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. **Objetivo geral**

Avaliar a eficiência do aumento do número de camadas de fibra de carbono para o reforço de elementos estruturais sujeitos a compressão.

1.2.2. **Objetivos específicos**

- a) Moldar corpos de prova, em um mesmo traço para servir como referência.
- b) Aplicar fibra de carbono nos corpos de prova até o limite de 12 camadas.
- c) Romper os corpos de prova.
- d) Analisar os resultados e avaliar o ganho de resistência de acordo com o aumento do número de camadas.

1.3 JUSTIFICATIVAS

1.3.1. **Tecnológicas**

No reforço estrutural em fibra de carbono ainda é considerado uma intervenção de alto custo. Assim sendo é importante aumentar o conhecimento sobre este assunto para possibilitar análises de custo benefício a partir do número de camadas na implantação deste tipo de solução, auxiliando calculistas, projetistas e executores na tomada de decisão.

1.3.2. **Econômicas**

Comprovando que a partir de determinada camada o ganho de resistência é irrelevante pode-se economizar recursos materiais e viabilizar o reforço com fibra de carbono.

1.3.3. **Sociais**

Reabilitando e garantindo a continuidade da utilização de uma estrutura já construída causando menor impacto para usuários

1.3.4. Ecológicas

Redução de utilização de fibras e resinas.

1.4 HIPÓTESE

A aplicação do reforço estrutural em fibra de carbono tem um limite em que o aumento do número de camadas não é proporcional/vantajoso ao ganho de resistência à compressão.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Programa experimental, compreendido por 39 corpos de prova (CP's) de concreto no formato cilíndrico 15x30cm com as seguintes configurações: três CP's de referência sem camada; três CP's com uma camada de fibra; três CP's com duas camadas de fibra e assim sucessivamente até chegar a três CP's com doze camadas.

- limpeza e lixamento da superfície onde será aplicado o tecido de fibra de carbono para retirada de pó, poeira e qualquer material solto;

- aplicação de argamassa (putty) para regularização da superfície se houver necessidade;

- aplicação de primer para aumento da resistência superficial do concreto;

- aplicação da 1º demão de resina saturante e colagem do tecido de fibra de carbono;

- aplicação da 2º demão de resina saturante para impregnação do tecido e colagem da 2º camada de tecido de fibra de carbono e assim sucessivamente.

Estes corpos de prova de concreto serão submetidos ao ensaio de compressão axial no laboratório da Lab.Con para determinar a resistência em cada situação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO

2.1.1. Massa específica

Serão considerados os concretos de massa específica normal (pc), compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor 2400 kg/m³ e para o concreto armado 2500 kg/m³.

Quando se conhecer a massa específica do concreto utilizado, pode-se considerar, para valor da massa específica do concreto armado, aquela do concreto simples acrescida de 100 kg/m³ a 150 kg/m³.

2.1.2. Propriedades mecânicas

As principais propriedades mecânicas do concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas.

Geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações.

2.1.3. Resistência à compressão

A resistência à compressão simples, denominada f_c , é a característica mecânica mais importante. Para estimá-la em um lote de concreto, são moldados e preparados corpos-de-prova para ensaio segundo a NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, os quais são ensaiados segundo a NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

O corpo-de-prova padrão brasileiro é o cilíndrico, com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, e a idade de referência para o ensaio é 28 dias.

Após ensaio de um número muito grande de corpos-de-prova, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos-de-prova relativos a determinado valor de f_c , também denominada densidade de frequência. A curva encontrada denomina-se Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão (Figura 1).

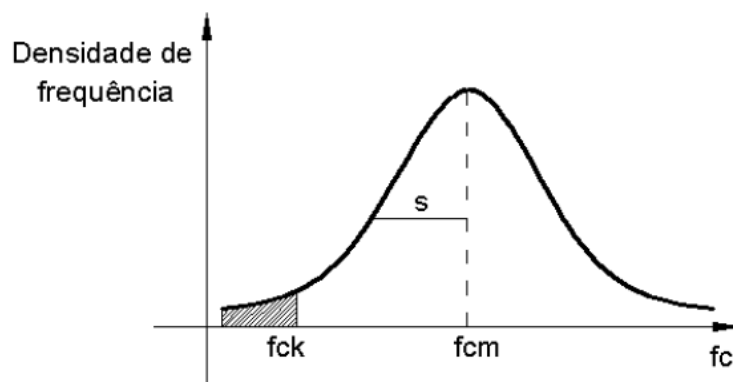


Figura 1 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão

Na curva de Gauss encontram-se dois valores de fundamental importância: resistência média do concreto à compressão, f_{cm} , e resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} .

O valor f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica, f_{ck} , por meio da fórmula:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s$$

O desvio-padrão s corresponde à distância entre a abscissa de f_{cm} e a do ponto de inflexão da curva (ponto em que ela muda de concavidade).

O valor 1,65 corresponde ao quantil de 5%, ou seja, apenas 5% dos corpos de prova possuem $f_c < f_{ck}$, ou, ainda, 95% dos corpos-de-prova possuem $f_c \geq f_{ck}$.

Portanto, pode-se definir f_{ck} como sendo o valor da resistência que tem 5% de probabilidade de não ser alcançado, em ensaios de corpos-de-prova de um determinado lote de concreto.

A NBR 8953 define as classes de resistência em função de f_{ck} . Concreta classe C30, por exemplo, corresponde a um concreto com $f_{ck} = 30\text{MPa}$.

Nas obras, devido ao pequeno número de corpos-de-prova ensaiados, calcula-se $f_{ck,est}$, valor estimado da resistência característica do concreto à compressão.

2.1.4. Resistência à tração

Os conceitos relativos à resistência do concreto à tração direta, f_{ct} , são análogos aos expostos no item anterior, para a resistência à compressão. Portanto, tem-se a resistência média do concreto à tração, f_{ctm} , valor obtido da média aritmética dos resultados, e a resistência característica do concreto à tração, f_{ctk} ou simplesmente f_{tk} , valor da resistência que tem 5% de probabilidade de não ser alcançado pelos resultados de um lote de concreto.

A diferença no estudo da tração encontra-se nos tipos de ensaio. Há três normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão.

a) Ensaio de tração direta

Neste ensaio, considerado o de referência, a resistência à tração direta, f_{ct} , é determinada aplicando-se tração axial, até a ruptura, em corpos-de-prova de concreto simples (Figura 2). A seção central é retangular, medindo 9 cm por 15 cm, e as extremidades são quadradas, com 15 cm de lado.

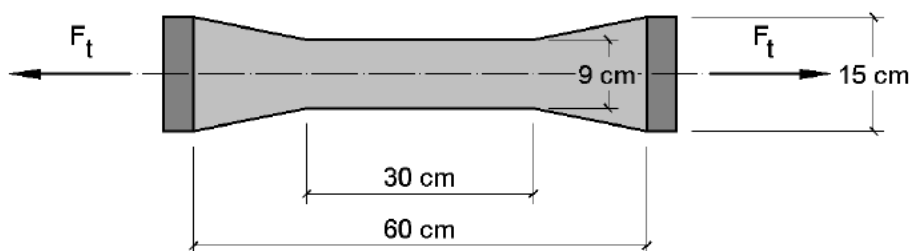


Figura 2 – Ensaio de tração direta

b) Ensaio de tração na compressão diametral (splitting test)

É o ensaio mais utilizado. Também é conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro. Foi desenvolvido por Lobo Carneiro, em 1943. Para a sua realização, um corpo-de-prova cilíndrico de 15 cm por 30 cm é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa (Figura 3), sendo aplicada uma força até a sua ruptura por tração indireta (ruptura por fendilhamento).

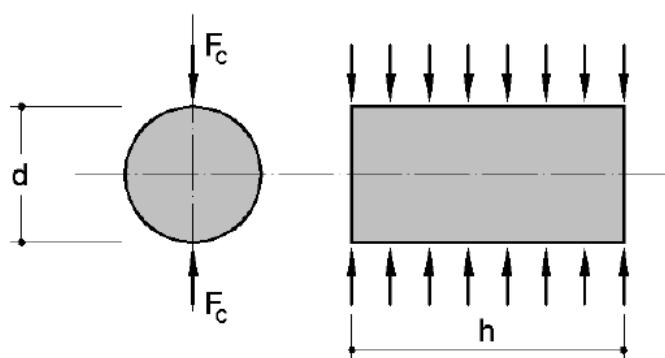


Figura 3 – Ensaio de tração por compressão diametral

O valor da resistência à tração por compressão diametral, $f_{ct,sp}$, encontrado neste ensaio, é um pouco maior que o obtido no ensaio de tração direta. O ensaio de compressão diametral é simples de ser executado e fornece resultados mais uniformes do que os da tração direta.

c) Ensaio de tração na flexão

Para a realização deste ensaio, um corpo-de-prova de seção prismática é submetido à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas, até à ruptura (Figura 4). O ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços”, pelo fato das seções carregadas se encontrarem nos terços do vão.

Analisando os diagramas de esforços solicitantes (Figura 5) pode-se notar que na região de momento máximo tem-se cortante nula. Portanto, nesse trecho central ocorre flexão pura.

Os valores encontrados para a resistência à tração na flexão, $f_{ct,f}$, são maiores que os encontrados nos ensaios descritos anteriormente.

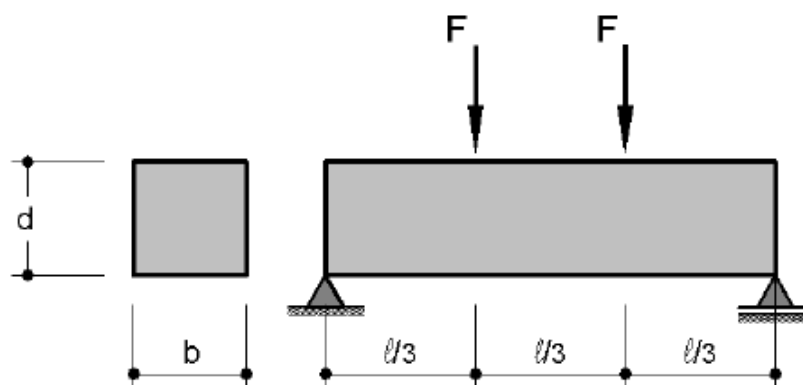


Figura 4 – Ensaio de tração na flexão

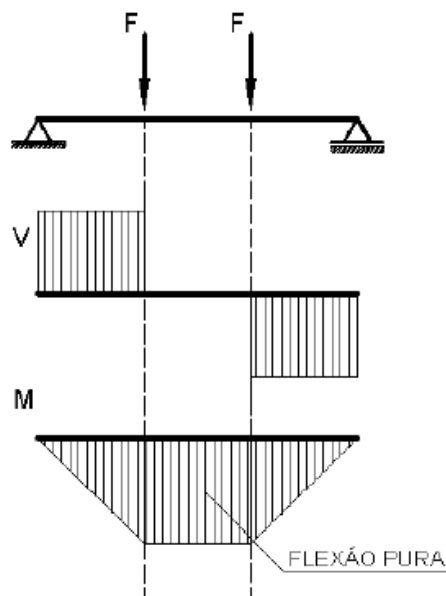


Figura 5 – Diagrama de esforços solicitantes (ensaio de tração na flexão)

d) Relações entre os resultados dos ensaios

Como os resultados obtidos nos dois últimos ensaios são diferentes dos relativos ao ensaio de referência, de tração direta, há coeficientes de conversão.

Considera-se a resistência à tração direta, f_{ct} , igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ou $0,7 f_{ct,f}$, ou seja, coeficientes de conversão 0,9 e 0,7, para os resultados de compressão diametral e de flexão, respectivamente.

Na falta de ensaios, as resistências à tração direta podem ser obtidas a partir da resistência à compressão f_{ck} :

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ctm}$$

Nessas equações, as resistências são expressas em MPa.

2.1.5. Módulo de elasticidade

Outro aspecto fundamental no projeto de estruturas de concreto consiste na relação entre as tensões e as deformações.

Sabe-se da Resistência dos Materiais que a relação entre tensão e deformação, para determinados intervalos, pode ser considerada linear (Lei de Hooke), ou seja, $\sigma = E \epsilon$, sendo σ a tensão, ϵ a deformação específica e E o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Deformação Longitudinal (Figura 6).

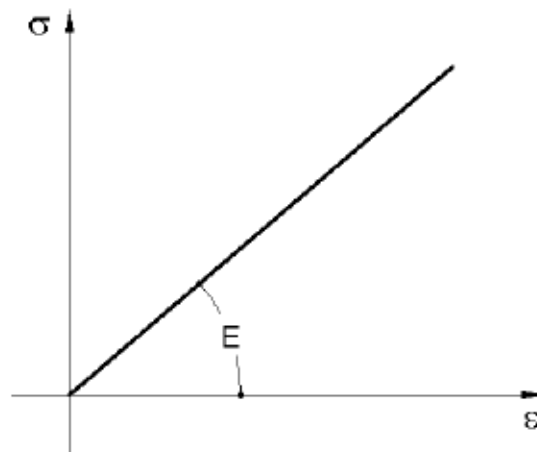


Figura 6 – Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal

Para o concreto a expressão do Módulo de Elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva tensão-deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva na origem. Neste caso, tem-se o Módulo de Deformação Tangente Inicial, E_{ci} (Figura 7).

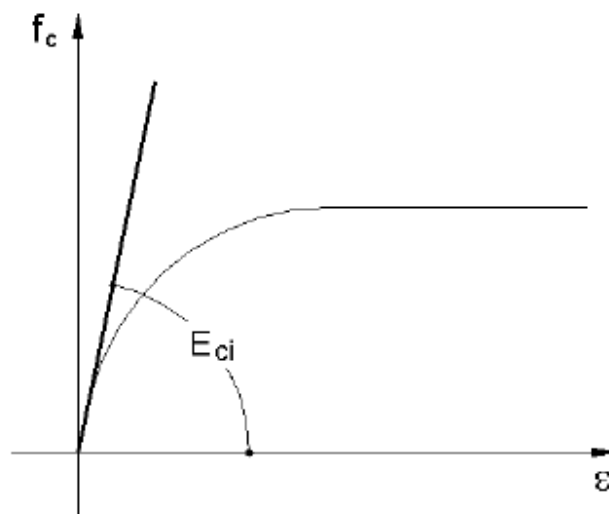


Figura 7 – Módulo de deformação tangente inicial (E_{ci})

O módulo de deformação tangente inicial é obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação.

Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto, para a idade de referência de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando a expressão:

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2}$$

E_{ci} e f_{ck} são dados em MPa.

O Módulo de Elasticidade Secante, E_{cs} , a ser utilizado nas análises elásticas do projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci}$$

Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou de uma seção transversal, pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}).

2.1.6. Coeficiente de Poisson

Quando uma força uniaxial é aplicada sobre uma peça de concreto, resulta uma deformação longitudinal na direção da carga e, simultaneamente, uma deformação transversal com sinal contrário (Figura 8).

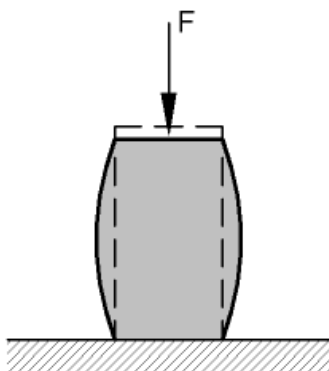


Figura 8 – Deformações longitudinais e transversais

A relação entre a deformação transversal e a longitudinal é denominada coeficiente de Poisson e indicada pela letra ν . Para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e de tração menores que f_{ct} , pode ser adotado $\nu = 0,2$.

2.1.7. Módulo de Elasticidade Transversal

Módulo de elasticidade transversal pode ser considerado $G_c = 0,4 E_{cs}$.

2.1.8. Estados múltiplos de tensão

Na compressão associada a confinamento lateral, como ocorre em pilares cintados, por exemplo, a resistência do concreto é maior do que o valor relativo à compressão simples. O cintamento pode ser feito com estribos, que impedem a expansão lateral do pilar, criando um estado múltiplo de tensões. O cintamento também aumenta a ductilidade do elemento estrutural.

Na região dos apoios das vigas, pode ocorrer fissuração por causa da força cortante. Essas fissuras, com inclinação aproximada de 45° , delimitam as chamadas bielas de compressão. Portanto, as bielas são regiões comprimidas com tensões de tração na direção perpendicular, caracterizando um estado biaxial de tensões.

Nesse caso tem-se uma resistência à compressão menor que a da compressão simples. Portanto, a resistência do concreto depende do estado de tensão a que ele se encontra submetido.

2.1.9. Estrutura interna do concreto

Na preparação do concreto, com a mistura dos agregados graúdos e miúdos com cimento e água, tem início a reação química do cimento com a água, resultando gel de cimento, que constitui a massa coesiva de cimento hidratado.

A reação química de hidratação do cimento ocorre com redução de volume, dando origem a poros, cujo volume é da ordem de 28% do volume total do gel. Durante o amassamento do concreto, o gel envolve os agregados e endurece com o tempo, formando cristais. Ao endurecer, o gel liga os agregados, resultando um material resistente e monolítico – o concreto.

A estrutura interna do concreto resulta bastante heterogênea: adquire forma de retículos espaciais de gel endurecido, de grãos de agregados graúdo e miúdo de várias formas e dimensões, envoltos por grande quantidade de poros e

capilares, portadores de água que não entrou na reação química e, ainda, vapor d'água e ar.

Fisicamente, o concreto representa um material capilar pouco poroso, sem continuidade da massa, no qual se acham presentes os três estados da agregação – sólido, líquido e gasoso.

2.1.10. Deformações

As deformações do concreto dependem essencialmente de sua estrutura interna.

2.1.10.1. Retração

Denomina-se retração à redução de volume que ocorre no concreto, mesmo na ausência de tensões mecânicas e de variações de temperatura.

As causas da retração são:

- **Retração química:** contração da água não evaporável, durante o endurecimento do concreto.
- **Retração capilar:** ocorre por evaporação parcial da água capilar e perda da água adsorvida. A tensão superficial e o fluxo de água nos capilares provocam retração.
- **Retração por carbonatação:** $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (ocorre com diminuição de volume).

2.1.10.2. Expansão

Expansão é o aumento de volume do concreto, que ocorre em peças submersas. Nessas peças, no início tem-se retração química. Porém, o fluxo de água é de fora para dentro. As decorrentes tensões capilares anulam a retração química e, em seguida, provocam a expansão da peça.

2.1.10.3. Deformação imediata

A deformação imediata se observa por ocasião do carregamento. Corresponde ao comportamento do concreto como sólido verdadeiro, e é causada por uma acomodação dos cristais que formam o material.

2.1.10.4. Fluência

Fluência é uma deformação diferida, causada por uma força aplicada.

Corresponde a um acréscimo de deformação com o tempo, se a carga permanecer. Ao ser aplicada uma força no concreto, ocorre deformação imediata, com uma acomodação dos cristais. Essa acomodação diminui o diâmetro dos capilares e aumenta a pressão na água capilar, favorecendo o fluxo em direção à superfície.

Tanto a diminuição do diâmetro dos capilares quanto o acréscimo do fluxo aumentam a tensão superficial nos capilares, provocando a fluência. No caso de muitas estruturas reais, a fluência e a retração ocorrem ao mesmo tempo e, do ponto de vista prático, é conveniente o tratamento conjunto das duas deformações.

2.1.10.5. Deformações térmicas

Define-se coeficiente de variação térmica α_t como sendo a deformação correspondente a uma variação de temperatura de 1°C . Para o concreto armado, para variações normais de temperatura, a NBR 6118 permite adotar $\alpha_t = 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

2.1.11. Fatores que influem nas propriedades do concreto

Os principais fatores que influem nas propriedades do concreto são:

- Tipo e quantidade de cimento;
- Qualidade da água e relação água-cimento;
- Tipos de agregados, granulometria e relação agregado-cimento;
- Presença de aditivos e adições;
- Procedimento e duração da mistura;
- Condições e duração de transporte e de lançamento;
- Condições de adensamento e de cura;
- Forma e dimensões dos corpos-de-prova;
- Tipo e duração do carregamento;
- Idade do concreto; umidade; temperatura etc.

2.2 ENSAIO DE CORPO DE PROVA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão axial é o mais utilizado na verificação da resistência do concreto aqui no Brasil, fornecendo resultados que servem como uma valiosa ferramenta de controle e aproximação de diversas propriedades, que se relacionam a este material.

A norma, NBR 5739 Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, a (ABNT, 1994) descreve a metodologia pela qual devem ser realizados ensaios à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto.

Já a NBR 5738 fornece todas as características de peças e equipamentos para todos os estágios da moldagem. Permite que sejam usados moldes de diferentes geometrias para a confecção dos corpos-de-prova. Moldes cilíndricos e prismáticos, confeccionados em metal ou material resistente e estanque de diferentes bitolas são aceitos, desde que respeitada a razão de $h=2D$, onde h representa a altura e D o diâmetro do corpo-de-prova. O adensamento pode ser feito de maneira manual por meio de soquete, ou mecânica, com vibradores.

Os corpos de prova devem ser rompidos à compressão em idades especificadas, após terem sido mantidos em processo de cura, tanto úmida quanto saturada.

A cura úmida se dá pela condição de permanência da superfície do corpo de prova ser mantida úmida. Na condição de cura saturada o corpo de prova é mantido imerso em água saturada de cal.

A idade dos corpos de prova moldados é definida de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003) a partir do instante em que o cimento passa a ter contato com a água de amassamento.

A NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 1) não determina uma máquina específica para o ensaio. Normalmente a máquina de ensaio é uma prensa mecânica ou hidráulica, que atenda exigências como capacidade de ajuste de cargas constantes, planicidade e ausência de imperfeições nos pratos de ensaio.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são obtidos pela divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, e seu valor expresso em Mega Pascal na precisão de 0,1.

2.3 SISTEMA DE REFORÇO ESTRUTURAL EM FIBRA DE CARBONO

2.3.1. Fibra de Carbono

Segundo Callister (2011), a fibra de carbono possui o maior módulo específico e a maior resistência específica dentre todas as fibras de reforço. As fibras são obtidas através de um processo térmico, quanto maiores forem as temperaturas, maior será o módulo de elasticidade do material. No entanto, quanto maior o módulo de elasticidade, maior o custo do processo (MACHADO, 2002).

Existem três materiais orgânicos precursores utilizados na produção da fibra de carbono: rayon, poliacrilonitrila (PAN) e pitch (CALLISTER, 2011). Dentre as três classificações, existem dois tipos de fibra de carbono: a de módulo de elasticidade elevado (Tipo I) e a de elevada resistência (Tipo II). A diferença nas propriedades entre os Tipos I e II é resultado das diferenças na microestrutura fibra. (ACI, 2002).

Segundo a ACI (2002), rayon e fibras precursoras isotrópicas derivadas do alcatrão (pitch) são utilizadas para produzir fibras de carbono de baixo módulo (da ordem de 50 GPa), PAN e precursores líquidos cristalinos do alcatrão são utilizados na produção de fibras de maior módulo de elasticidade. Segundo Beber (2003) a primeira categoria de fibra de carbono é fabricada através do rayon. O processo consiste em esticar a fibra em altas temperaturas, apesar de ter alta resistência o alto custo torna esse processo inviável.

Ainda segundo Beber (2003) a segunda categoria de fibra é produzida a partir da PAN, que combina o baixo custo com boas propriedades físicas. Nesse processo, a resistência da fibra aparenta ser maximizada a uma temperatura próxima de 1500°C. (MACHADO, 2002).

O pitch é uma matéria prima muito barata quando comparada com as demais consequentemente, a resistência e o módulo de suas fibras são baixos. Para obtenção de fibras com boas propriedades mecânicas é necessário converter o alcatrão em um cristal líquido (BEBER, 2003).

Segundo Machado (2002), as fibras de carbono, particularmente as de elevado módulo de elasticidade, não são facilmente impregnadas pelas resinas, por isso, frequentemente elas são revestidas por um tratamento superficial epóxico proporcionando uma interface compatível com a matriz resinosa.

2.3.2. Resinas de colagem

A matriz polimérica em compósitos reforçados tem como funções envolver as fibras dando proteção aos agentes agressivos e promover a transferência de tensões, além de promover o posicionamento correto das fibras. A resina que irá compor a matriz polimérica interfere nas propriedades físicas, químicas e elétricas dos compósitos. A matriz pode ser composta de resinas termoplásticas ou resinas termoendurecíveis. (HOLLAWAY, 1993; BEBER, 2003)

As resinas mais utilizadas em compósitos reforçados com fibra são as termoendurecíveis da classe dos poliésteres insaturados, dos vinilésteres e dos epóxidos. (ARAÚJO, 2002)

As resinas possuem como características básicas

- Aderência ao substrato de concreto e resistência elevada de colagem;
- Adequabilidade ambiental, que inclui resistência a elevadas temperaturas,
- Água salgada e pressão de vapor;
- Capacidade de preenchimento de vazios;
- Desenvolvimento de propriedades mecânicas adequadas ao composto;
- Aderência entre resina e fibra.

As resinas mais utilizadas são as epóxicas, devido a excelente resistência à tração, fluência, química e forte adesão com as fibras e baixa retração durante sua cura.

Não possuem resistência ao fogo, razão pela qual os reforços executados com tal resina necessitam de pintura de proteção. (ARAÚJO, 2002).

Essas resinas, para fins estruturais na engenharia, geralmente são formuladas de forma bi-componentes, isto é, um agente principal (a resina propriamente dita) e um catalisador (endurecedor). (BEBER, 2003).

O adesivo é responsável pela colagem do PRF na superfície do concreto e pela transferência de tensões. A transferência de tensões é feita no plano da interface concreto – adesivo – compósito, nele ocorrendo tensões predominantes cisalhantes, embora tensões normais também possam ocorrer (ARAUJO, 2002).

2.4 CONFINAMENTO

Sabe-se que o efeito de confinamento do concreto em pilares submetidos à compressão axial e excêntrica traz diversos benefícios ao seu comportamento estrutural:

- a) Aumenta a resistência à compressão axial do concreto pela ação das pressões laterais;
- b) Melhora a ductilidade do elemento estrutural, especialmente importante no caso de aplicação de concreto de alta resistência;
- c) Favorece a contribuição efetiva do núcleo (seção do pilar de concreto pré-existente) no caso de reforço por encamisamento com concreto armado ou compósitos de alto desempenho, como o de fibra de carbono;

- d) Favorece a redistribuição de tensões no conjunto concreto antigo/novo, que estão sujeitos aos efeitos de pré-carregamento e deformações do concreto dependentes do tempo.

Ilustram-se na Figura 9 algumas situações de confinamento no caso de pilares de seção transversal circular ou quadrada, sujeitos à compressão axial. Em cada um dos esquemas de seção transversal, as áreas hachuradas correspondem às partes da seção que estão sujeitas a pressões de confinamento dadas pela armadura ou membrana de compósito em seu contorno.

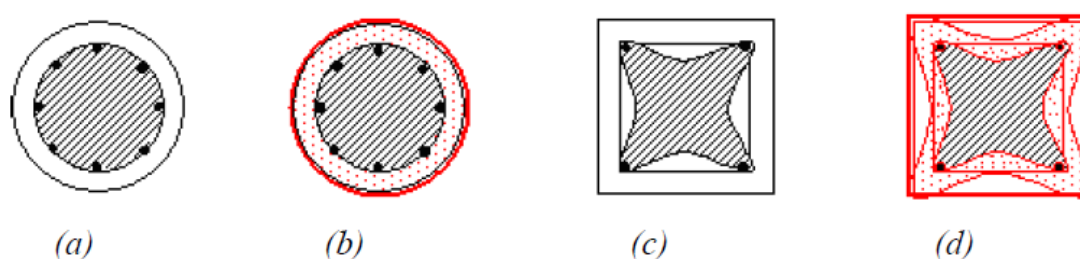


Figura 9: Ilustração de algumas situações de confinamento

a) seção circular, núcleo confinado pela armadura transversal em espiral; b) seção circular, núcleo confinado por compósito polimérico aplicado na superfície externa, contando-se ainda com o efeito adicional de confinamento dado pela armadura interna em espiral no núcleo mais interno; c) seção quadrada, núcleo confinado por estribos e armadura longitudinal; d) seção quadrada, núcleo confinado por compósito polimérico aplicado na superfície externa, contando-se ainda com o efeito adicional de confinamento dado pela armadura mais interna de estribos.

No caso de reforço de pilares de seção transversal quadrada ou retangular existe o efeito de arqueamento de tensões que provoca uma distribuição de pressões de confinamento não uniforme, com concentração nos cantos da seção transversal. Têm-se estudado maneiras de contornar este problema para proporcionar condições que favoreçam a distribuição da pressão de confinamento. A maior uniformidade na distribuição da pressão de confinamento é especialmente interessante no caso do reforço de pilares com polímeros reforçados com fibras (PRF) uma vez que a concentração de tensões em pontos localizados causa a ruptura prematura do compósito, prejudicando assim o desempenho do pilar reforçado.

Em pilares de seção transversal circular a distribuição da pressão de confinamento é uniforme. Sendo assim, quanto mais próxima desta for a seção do pilar a ser reforçado, mais uniforme será a distribuição das pressões de confinamento e, conseqüentemente, maior será a eficiência do reforço. Para quantificar esta proximidade entre a seção do pilar a ser reforçado e a circular, existe um coeficiente de forma que minora a pressão de confinamento para pilares de seção diferente da circular. Quanto mais próximo da unidade for o coeficiente de forma, maior será uniformidade da pressão de confinamento.

A principal alternativa para aproximar o coeficiente de forma da unidade e conseqüentemente potencializar o efeito de confinamento no reforço de pilares de seção transversal quadrada ou retangular, é a mudança da forma de sua seção. Esta mudança é geralmente feita com o arredondamento dos cantos da seção transversal, diminuindo assim a concentração de tensão nestes pontos (Figura 10).

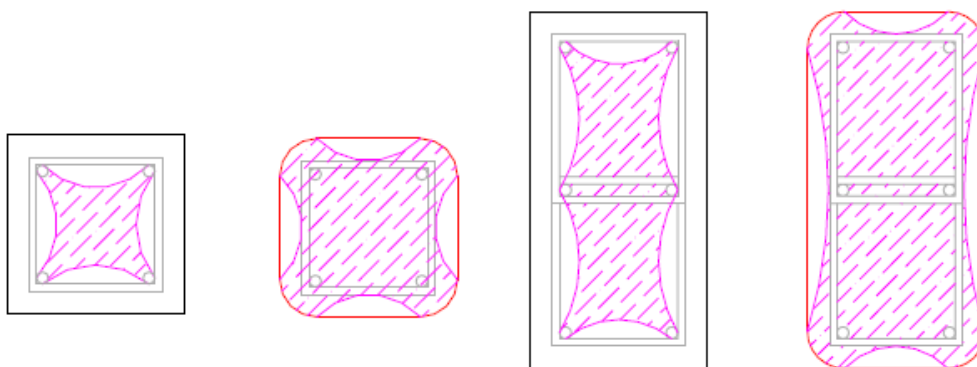


Figura 10: Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com PRF e arredondamento dos cantos

No caso de pilares de seção transversal retangular, o desenvolvimento de pressões de confinamento é particularmente dificultado — nas situações usuais de arranjo da armadura transversal — pela forma mais alongada da seção e pela impossibilidade dos ramos retilíneos dos estribos comuns oferecerem resistência às pressões perpendiculares ao seu eixo, com isso o coeficiente de forma fica muito próximo de zero, ou seja, a eficiência do reforço é praticamente nula. Na tentativa de aumentar o coeficiente de forma e conseqüentemente a eficiência do reforço, pode-se melhorar ainda mais a distribuição da pressão de confinamento. Para isso, podem-se estudar mudanças mais apreciáveis na forma da seção transversal. Esta mudança pode ser, por exemplo, transformar a seção transversal retangular numa elíptica ou em

qualquer outra forma geométrica que seja capaz de conduzir a pressões de confinamento mais próximas da uniforme.

Considerando em particular, que as formas geométricas circulares e calotas esféricas são as mais adequadas para resistir por tração à pressão interna radial (efeito de membrana), procura-se nesta pesquisa estudar tais formas, além da elíptica, para verificar a sua eficiência na distribuição das pressões de confinamento, avaliada com base no coeficiente de forma.

Ilustra-se na Figura 11, na forma de esquemas em perspectiva tridimensional, como poderiam ser as membranas de compósito da camisa de reforço.

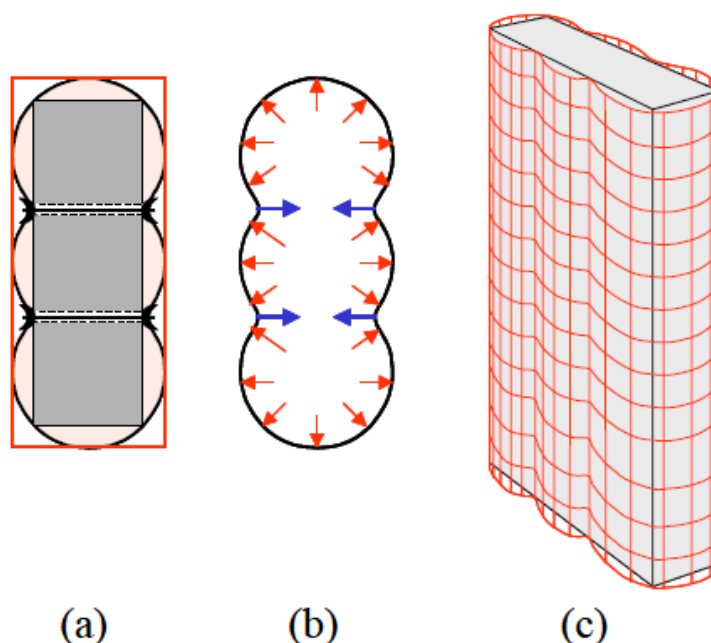


Figura 11 - Possíveis esquemas de arranjo de reforço transversal
a) seção transversal esquemática; b) pressões no reforço transversal; c) reforço transversal com curvatura simples;

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o programa experimental detalhadamente, incluindo: os materiais empregados na confecção dos CP's, equipamentos utilizados, confecção desses CP's e a descrição dos ensaios.

3.1 MATERIAIS

3.2.1. Concreto

O concreto utilizado para moldagem dos corpos de prova que foram utilizados nesse estudo foi do tipo usinado, fornecido pela empresa Lafarge com $F_{ck_{28\text{dias}}}$ de 25MPa, conforme nota fiscal (Anexo 1) e carta-traço no (Anexo 2).

No recebimento do concreto, o caminhão chegou à obra que foi disponibilizada para apoio ao trabalho lacrado (Fotos 1 e 2), onde houve a conferência com o numero que contava na nota fiscal (Anexo 1).



Fotos 1 e 2 – Recebimento do concreto e lacre do caminhão

Após a conferência e rompimento do lacre, foi iniciada a determinação do abatimento do concreto através do *Slump Test* (Fotos 3, 4, 5 e 6) para verificação da trabalhabilidade do concreto e conferência da conformidade com o pedido na usina.



Fotos 3, 4, 5 e 6 – Determinação do abatimento do concreto através do *Slump Test*

O teste de abatimento teve como resultado 16 cm, o que confere com o pedido com Slump 14 +/-2, conforme nota fiscal anexa.

3.2.2. Polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC)

Para execução do reforço nos corpos de prova, foram utilizadas fibras de carbono com as seguintes características:

- Gramatura: 300g/m² (direção principal)
- Espessura do tecido: 0,176mm
- Densidade: 1,7g/cm³
- Resistência à tração: 3.800N/mm²
- Modulo de Elasticidade: 240.000N/mm²
- Alongamento da Ruptura: 15,5‰

Consumo de aplicação:

- Imprimação do substrato, aproximadamente 300g/m² de resina de colagem
- Impregnação da camada de fibra, aproximadamente 650g/m² de resina de colagem

3.2 EQUIPAMENTO

Para o ensaio dos corpos de prova à compressão axial, foi disponibilizado o laboratório da empresa de controle tecnológico de concreto Lab.Con. Foi utilizada a prensa hidráulica elétrica digital com capacidade de 200Tf da fabricante Solocap/Tecnotest modelo KG-70 (Figura 12), cujo laudo de calibração foi disponibilizado (Anexo 3).



Figura 12 - Prensa hidráulica elétrica digital Solocap/Tecnotest modelo KG-70

A prensa descrita permite realizar ensaios de compressão simples e axial em corpos de prova cilíndricos de concreto com $\varnothing$ 15x30cm e $\varnothing$ 10x20cm de altura. Realiza também, ensaios de compressão axial, flexão em corpos de prova prismáticos e especialmente módulo de elasticidade com auxílio de dispositivos próprios. Acionada por motor elétrico, trabalhando em conjunto com controlador digital, em um circuito de malha fechada, micro processado proporcionando a velocidade de aplicação de carga constante conforme exigência das Normas Técnicas nacionais e internacionais. Possui válvula reguladora de vazão e pressão (patenteada) para controle do incremento e decremento de carga, possibilitando executar vários ensaios mantendo a velocidade de aplicação de carga constante.

3.3 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os CP's utilizados nesse trabalho foram moldados com fôrmas metálicas nas dimensões de 15 cm (diâmetro) x 30 cm (altura). A escolha do tamanho desses CP's foi devido ao melhor aproveitamento do material disponível, visando a menor perda quando do confinamento dos CP's.

Foram moldados, inicialmente, 39 CP's para tentativa de rompimento de grupos de três CP's até 12 camadas de fibra de carbono, iniciando-se com grupo sem confinamento que foi utilizado com referência de resistência aos demais ensaios com CP's confinados.



Fotos 7 e 8 – Moldagem dos CP's

A moldagem dos corpos de prova (Fotos 7 e 8) seguiu as orientações da NBR 5738/2003, principalmente no que diz respeito a quantidade de camadas e golpes por se tratar de um formato de corpo de prova pouco utilizado usualmente pelo maior tamanho, peso e volume de concreto que emprega. Em situações normais de obras e estudos é utilizado o corpo de prova no formato de 10cmx20cm.

Após a moldagem os CP's foram devidamente identificados e acondicionados em local próprio, (Foto 9).



Foto 9 – Identificação e acondicionamento dos CP's

Após o período de 24 horas quando o concreto já finalizou o processo de pega, os corpos de prova foram desformados e colocados em processo de cura úmida (Foto 10) até a data de início do confinamento com fibra de carbono.



Foto 10 – Início do processo de cura úmida dos CP's

Foi realizada aplicação de uma fina camada de argamassa de regularização para tamponamento dos poros existente nos CP's e lixamento manual da superfície e limpeza dos CP's para retirada de pó, poeira e qualquer material solto, prosseguindo então para aplicação do primer, responsável pelo aumento da resistência superficial do concreto (Fotos 11 e 12), aguardando o tempo de 90 minutos para a próxima etapa.



Foto 11 – Preparação primer



Foto 12 – Aplicação do primer

Após esta etapa, iniciou-se a aplicação da 1ª demão de resina saturante (Fotos 13 e 14) e colagem do tecido de fibra de carbono previamente cortados (Fotos 15 e 16), efetuando um trespasse de 3cm em cada camada.



Foto 13 – Resina de Saturação



Foto 14 – CP's com resina aplicada



Foto 15 – Fibras de carbono cortadas



Foto 16 – Primeira camada de fibra

Foi realizada a aplicação das demais camadas de fibra de acordo com os grupos propostos. Definiu-se que na primeira etapa de rompimento seriam confinados os grupos de CP's até a 5ª camada.



FOTO 17 - Aplicação da Segunda Camada de Fibra



Foto 18 – CP's confinados



Foto 19 – CP's confinados separados por grupo de camadas

3.4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Após confinamento com fibra de carbono e retificação nas extremidades dos CP's no laboratório (Foto 18), a identificação dos mesmos foi refeita e iniciaram-se

os testes à compressão axial pelos CP's de referência (sem reforço em fibra de carbono).



Foto 20 – CP's confinados com fibra de carbono e retificados

Após o rompimento dos CP's de referência, procedeu-se para o grupo de 3 CP's com uma camada de fibra de carbono, depois com duas camadas e assim por diante.

Durante os rompimentos foi possível acompanhar através de uma tela acoplada à prensa (Foto 19) a quantidade de força aplicada sobre o CP e ao final do rompimento verificar o resultado da resistência do corpo de prova à compressão.



Foto 21 – Tela de leitura da prensa

Após o rompimento do CP foi avaliado o tipo de ruptura, a fim de identificar qualquer anomalia quanto ao procedimento de moldagem, confinamento ou retificação da peça que possa interferir no resultado final do estudo.

Os laudos de rompimento fornecidos pela Lab.Con estão anexos a esse trabalho, separados por quantidade de camadas de fibra de carbono:

- CP's sem camada de fibra de carbono (Anexo 4)
- CP's com uma camada de fibra de carbono (Anexo 5)
- CP's com duas camadas de fibra de carbono (Anexo 6)
- CP's com três camadas de fibra de carbono (Anexo 7)
- CP's com quatro camadas de fibra de carbono (Anexo 8)

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Este estudo tem como objetivo avaliar se existe aumento ou perda de resistência à compressão em corpos de prova de concreto quando os mesmos são submetidos a camadas extras de fibra de carbono. Este relatório seguiu as diretrizes da NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos.

3.5.1. Descrição do estudo

Foram avaliados três corpos de prova de cinco diferentes grupos sendo eles:

- a) Grupo 0: nenhuma camada de fibra de carbono;
- b) Grupo 1: uma camada de fibra de carbono;
- c) Grupo 2: duas camadas de fibra de carbono;
- d) Grupo 3: três camadas de fibra de carbono;
- e) Grupo 4: quatro camadas de fibra de carbono.

O banco de dados foi confeccionado no Excel. As análises foram realizadas no *software* MINITAB. Foi considerado nível de significância de 5%.

3.5.1.1. Etapas das análises estatísticas

3.5.1.1.1. *Análise descritiva*

Todas as características avaliadas foram descritas. Os resultados foram obtidos utilizando as medidas de tendência central (média e mediana) e medidas de dispersão (desvio-padrão).

3.5.1.1.2. *Comparações entre os grupos*

A comparação dos resultados de resistência à compressão realizada entre os cinco grupos foi feita a partir do teste não-paramétrico Kruskal-Wallis (TRIOLA, 2005). Este teste foi utilizado devido ao tamanho reduzido da amostra, o que não viabilizou a análise da sua distribuição.

O teste global (Kruskal-Wallis) só indica se há diferença entre os grupos, não possibilitando a localização destas diferenças. Para isso, os grupos foram comparados dois a dois pelo teste Mann-Whitney, corrigindo o nível de significância pelo método de Bonferroni.

O método de Bonferroni consiste em dividir o valor de significância usual (0,05) pelo número de comparações que foram realizadas. O resultado é um valor-p de

aproximadamente 0,017 (0,05/3), ou seja, a diferença só foi considerada significativa se o valor-p foi menor ou igual a 0,017 para cada comparação entre dois grupos.

3.5.1.1.3. Avaliação Estatística de Desempenho do Ensaio

A validação dos resultados obtidos pelos corpos de prova quanto à dispersão dos ensaios, devido às operações de ensaio foi feito através do cálculo do coeficiente de variação e sua classificação conforme NBR 5739:2007 (Figura 13).

Coeficiente de variação (cv_e)				
Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Muito bom)	Nível 3 (Bom)	Nível 4 (Razoável)	Nível 5 (Deficiente)
$cv_e \leq 3,0$	$3,0 < cv_e \leq 4,0$	$4,0 < cv_e \leq 5,0$	$5,0 < cv_e \leq 6,0$	$cv_e > 6,0$

Figura 13 – Nível de avaliação do desempenho do ensaio

Fonte: NBR 5739:2007

O coeficiente de variação (cv_e) dentro do ensaio é feito dividindo o desvio-padrão (s_e) pela resistência média (f_{cm}) a compressão das amostras.

$$cv_e = \frac{s_e}{f_{cm}}$$

sendo que o desvio-padrão é calculado dividindo as amplitudes de cada grupo pelo coeficiente d_2 (Figura 14) vezes o número de exemplares da amostra dos ensaios.

$$s_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \cdot n}$$

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

Figura 14 – Coeficiente d_2

Fonte: NBR 5739:2007

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Para o grupo de 3 CP's referência (sem camada de PRFC), os resultados de resistência à compressão estão na tabela da Figura 15.

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (sem fibra)	18/10/2014	148,0	285,0	1,93	1,00
CP2 (sem fibra)	18/10/2014	149,0	285,0	1,91	1,00
CP3 (sem fibra)	18/10/2014	149,0	285,0	1,91	1,00

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (sem fibra)	1	171,9	601,1	35,0	35,0
CP2 (sem fibra)	1	174,3	593,9	34,1	34,0
CP3 (sem fibra)	1	174,3	541,9	31,1	31,1

Figura 15 – Tabela de Resultados de ensaios de CP's sem camada de PRFC

Os testes ocorreram sem nenhuma anormalidade e o tipo de rompimento se deu de forma normal e dentro do esperado se tratando apenas de uma referência para os próximos grupos de rompimento com camadas de fibra de carbono.

Na foto 20 é possível verificar o CP na prensa antes do início de carga da prensa, já na foto 21 nota-se o início do rompimento do corpo de prova durante o ensaio.



Foto 22 – CP antes do início rompimento



Foto 23 – Início do rompimento do CP

A partir do rompimento dos CP's sem camada de reforço de fibra de carbono, iniciou-se o rompimento dos CP's confinados com a fibra de carbono em grupos de 3 CP's por número de camada.

Os resultados dos grupos de CP's com 1, 2, 3 e 4 camadas apresentam-se nas tabelas abaixo. Todos esses ensaios ocorreram sem nenhuma anormalidade e o tipo de rompimento se deu de forma normal e dentro do esperado, conforme fotos que acompanham as figuras com as tabelas de resultado.

Grupo de CP's reforçados com 01 camada de fibra de carbono:

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 1 faixa)	18/10/2014	150,0	290,0	1,93	1,00
CP2 (com fibra - 1 faixa)	18/10/2014	153,0	290,0	1,90	1,00
CP3 (com fibra - 1 faixa)	18/10/2014	151,0	290,0	1,92	1,00

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 1 faixa)	1	176,6	713,2	40,4	40,4
CP2 (com fibra - 1 faixa)	1	183,8	826,0	44,9	44,8
CP3 (com fibra - 1 faixa)	1	179,0	776,9	43,4	43,4

Figura 16 – Tabela de Resultados de ensaios de CP's com 1 camada de PRFC



Foto 24 – Rompimento de um CP com 1 camada de reforço de fibra de carbono

Grupo de CP's reforçados com 02 camadas de fibra de carbono:

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 2 faixas)	18/10/2014	152,0	295,0	1,94	1,00
CP2 (com fibra - 2 faixas)	18/10/2014	155,0	295,0	1,90	1,00
CP3 (com fibra - 2 faixas)	18/10/2014	155,0	295,0	1,90	1,00

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 2 faixas)	1	181,4	1109,6	61,2	61,3
CP2 (com fibra - 2 faixas)	1	188,6	1080,8	57,3	57,2
CP3 (com fibra - 2 faixas)	1	188,6	1181,7	62,7	62,5

Figura 17 – Tabela de Resultados de ensaios de CP's com 2 camadas de PRFC



Foto 25 – Rompimento de um CP com 2 camada de reforço de fibra de carbono

Grupo de CP's reforçados com 03 camadas de fibra de carbono:

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 3 faixas)	18/10/2014	156,0	295,0	1,89	1,00
CP2 (com fibra - 3 faixas)	18/10/2014	157,0	285,0	1,82	0,99
CP3 (com fibra - 3 faixas)	18/10/2014	156,0	290,0	1,86	0,99

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 3 faixas)	1	191,0	1568,5	82,1	81,8
CP2 (com fibra - 3 faixas)	1	193,5	1351,7	69,9	69,0
CP3 (com fibra - 3 faixas)	1	191,0	1504,6	78,8	78,2

Figura 18 – Tabela de Resultados de ensaios de CP's com 3 camadas de PRFC



Foto 26 – Rompimento de um CP com 3 camada de reforço de fibra de carbono

Grupo de CP's reforçados com 04 camadas de fibra de carbono:

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 4 faixas)	18/10/2014	158,0	290,0	1,84	0,99
CP2 (com fibra - 4 faixas)	18/10/2014	157,0	290,0	1,85	0,99
CP3 (com fibra - 4 faixas)	18/10/2014	160,0	290,0	1,81	0,99

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 4 faixas)	1	196,0	1966,3	100,3	99,3
CP2 (com fibra - 4 faixas)	1	193,5	1935,0	100,0	99,1
CP3 (com fibra - 4 faixas)	1	201,0	1869,7	93,0	91,8

Figura 19 – Tabela de Resultados de ensaios de CP's com 4 camadas de PRFC



Foto 27 – Rompimento de um CP com 4 camada de reforço de fibra de carbono

O rompimento dos grupos de CP's até o numero de 4 camadas de reforço de fibra de carbono foi possível dentro da capacidade da prensa utilizada nesse ensaio, onde nesse ultimo grupo de CP's o rompimento ocorreu muito próximo do limite superior da prensa utilizada (200 toneladas).

A partir daí foi iniciado a tentativa de rompimento do grupo de CP's com 5 camadas de reforço de fibra de carbono, onde nos dois primeiros CP's a prensa chegou ao seu

limite superior de compressão e os CP's não romperam, conforme tabela abaixo. Ainda no grupo de CP's com 5 camadas de reforço, o ultimo CP foi submetido a compressão na prensa, onde a prensa chegou ao seu limite de carga e após alguns segundos do fim da aplicação da força de compressão, mas ainda sob a influencia dessa carga, o CP rompeu.

Grupo de CP's reforçados com 05 camadas de fibra de carbono:

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 5 faixas)	18/10/2014	162,0	290,0	1,79	0,98
CP2 (com fibra - 5 faixas)	18/10/2014	158,0	290,0	1,84	0,99
CP3 (com fibra - 5 faixas)	18/10/2014	158,0	290,0	1,84	0,99

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 5 faixas)	1	206,0	Não rompeu	Não rompeu	Não rompeu
CP2 (com fibra - 5 faixas)	1	196,0	Não rompeu	Não rompeu	Não rompeu
CP3 (com fibra - 5 faixas)	1	196,0	1892,4	96,6	95,6

Figura 20 – Tabela de Resultados de ensaios de CP's com 5 camadas de PRFC



Foto 28 – CP com 5 camadas antes do rompimento

Foto 29 – Rompimento do CP com cinco camadas de reforço de fibra

Com a ocorrência da prensa ter atingido a capacidade máxima de carga à compressão, o estudo torna-se limitado as 5 camadas de reforço com fibra de carbono, tornando desnecessário o confinamento de outros CP's com numero maior de camadas do que os grupos já submetidos ao rompimento à compressão axial.

4.2 Análise geral dos resultados

A partir dos resultados dos ensaios à compressão axial que os grupos de CP's foram submetidos é possível a análise do incremento na resistência com o aumento das camadas de fibras de carbono.

Para tanto, foram desconsiderados os resultados do grupo com reforço de 5 camadas de fibra de carbono pois não temos o resultado dos três CP's desse grupo, ficando impossível a comparação com os outros grupos que tiveram todos os CP's rompidos pela prensa e com resultados numéricos.

No gráfico da figura 21 abaixo é possível verificar com clareza o incremento na resistência dos CP's submetidos à compressão axial a partir do aumento do numero de camadas de reforço de fibra de carbono. Nesse gráfico temos o resultado do rompimento de cada CP por grupo (numero de camadas de reforço), sendo assim a média desses resultados gera uma linha crescente que confirma o aumento das resistência dos CP's a partir do grupo de referencia sem reforço de fibra de carbono.

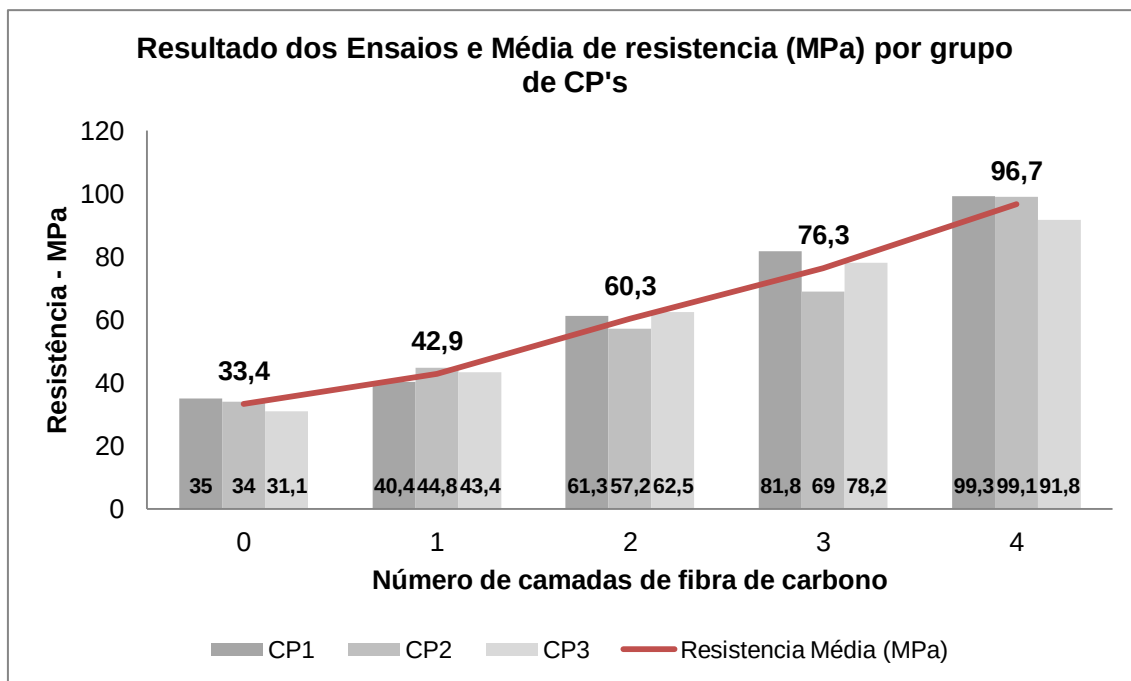


Figura 21 – Gráfico dos Resultado dos ensaios e Média de Resistência por grupo de CP's

Na análise das médias de resistência de cada grupo de CP's é possível verificar os ganhos de resistência com o aumento das camadas de reforço, conforme gráfico das figuras 22 e 23.

No rompimento do grupo com uma camada de fibra de carbono foi possível verificar um incremento na resistência na ordem de 9,5 MPa, sendo esse resultado 28% maior em relação ao grupo de CP's sem reforço de fibra de carbono (referência).

Quando do rompimento do grupo de CP's com duas camadas de reforço de fibra de carbono temos um aumento de 17,5 MPa (52%) em relação ao grupo anterior (1 camada de reforço) e 26,96 MPa (81%) em relação ao grupo de CP's sem camada de reforço de fibra de carbono.

Os resultados do rompimento do grupo de CP's com três camadas de reforço são maiores em 16 Mpa (48%) em relação ao grupo anterior (2 camadas) e maior 42,96 MPa (129%) em relação ao grupo de CP's utilizados como referencia (sem reforço).

No ultimo grupo analisado, com 4 camadas de reforço de fibra de carbono, os resultados obtidos aumentam 20,4 MPa (61%) em relação ao grupo anterior (3

camadas) e esse aumento em relação ao grupo de CP's sem camada de reforço é na ordem de 63,36 MPa (190%), chegando a 96,7 MPa.

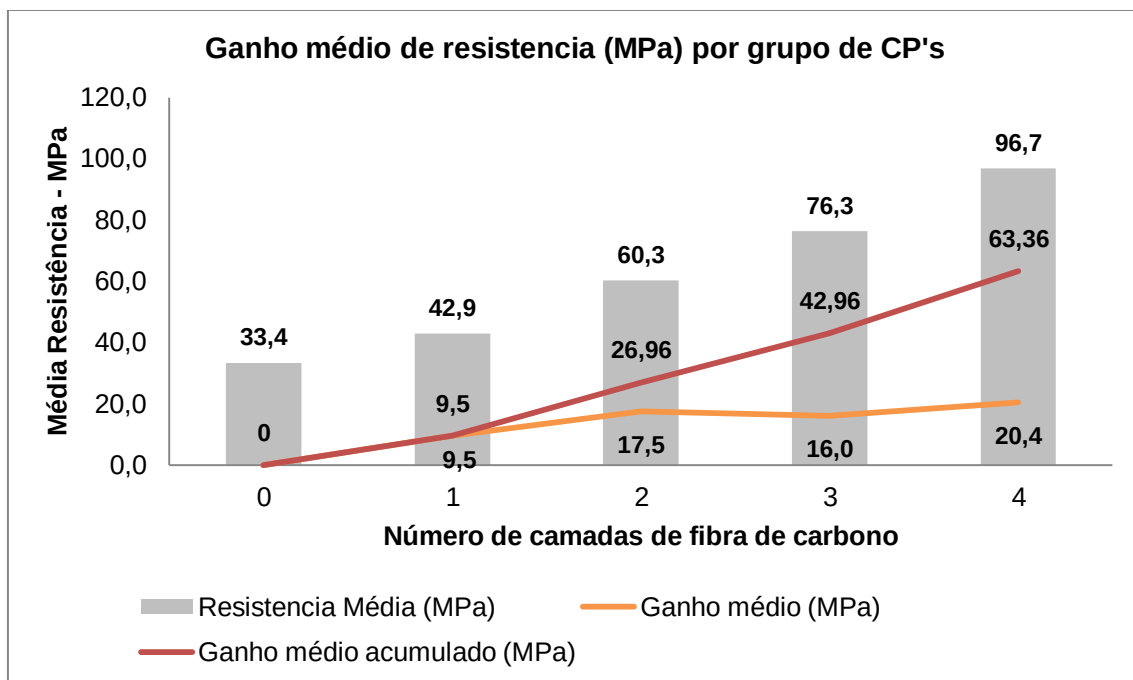


Figura 22 – Gráfico do Ganho Médio de Resistência por grupo de CP's

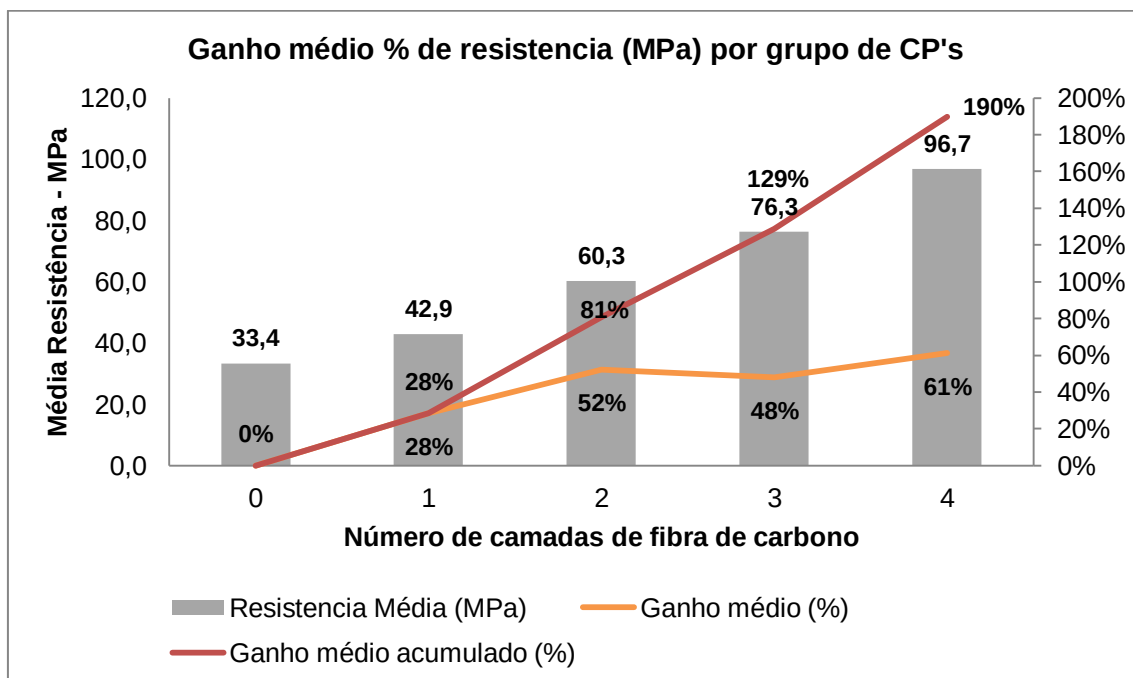


Figura 23 – Gráfico do Ganho Médio % de Resistência por grupo de CP's

4.3 RESULTADOS ESTATÍSTICOS

Como é desconhecida a distribuição de CP's para ensaios de resistência a compressão não pode assumir nenhum teste paramétrico. Como o tamanho amostral é pequeno $n < 30$ não podemos utilizar o TCL (teorema central do limite) que aproxima amostras grandes para uma distribuição normal. Como temos mais de 2 grupos testaremos a hipótese nula de que todos os grupos possuem a mesma distribuição contra a hipótese alternativa de que ao menos 1 dos grupos prove de uma distribuição diferente. Para isso utilizaremos o teste de Kruskal Wallis para testar esta hipótese. Caso a hipótese nula seja descartada, descobriremos qual grupo é diferente realizando teste de Mann-Whitney 2x2.

4.3.1 Análise descritiva

A tabela 1 apresenta a descrição da resistência à compressão por número de camadas (grupos).

Em média, os corpos de prova do grupo 0, apresentaram resistência à compressão de 33,37 (desvio-padrão de 2,03 e mediana de 34), os CP's do grupo 1 apresentaram, em média, 42,87 (desvio-padrão de 2,25 e mediana de 43,4), o grupo 2 apresentou, em média, 60,33 (desvio-padrão de 2,78 e mediana de 61,3), os CP's do grupo 3 apresentaram, em média, 76,33 (desvio-padrão de 6,6 e mediana de 78,2) e os do grupo 4 tinham, em média, 96,73 (desvio-padrão de 4,27 e mediana de 99,1).

Número de camadas	n	Média	DP	Mínimo	Mediana	Máximo
Grupo 0	3	33,37	2,03	31,10	34,00	35,00
Grupo 1	3	42,87	2,25	40,40	43,40	44,80
Grupo 2	3	60,33	2,78	57,20	61,30	62,50
Grupo 3	3	76,33	6,60	69,00	78,20	81,80
Grupo 4	3	96,73	4,27	91,80	99,10	99,30

n: nº de observações; DP: desvio-padrão

Tabela 1 – Descrição da resistência à compressão por grupo

4.3.1.1. Comparações entre os grupos

A tabela 2 apresenta as comparações da resistência à compressão entre os grupos. Observa-se significância estatística nesta comparação, ou seja, os grupos se diferem (valor-p = 0,009).

Entretanto, a partir destes resultados não é possível identificar quais grupos diferem entre si, sendo necessário compará-los dois a dois (Tabela 3)

Número de camadas	Resistência à compressão				Valor-p
	n	Média	DP	Mediana	
Grupo 0	3	33,37	2,03	34,00	<0,009 ¹
Grupo 1	3	42,87	2,25	43,40	
Grupo 2	3	60,33	2,78	61,30	
Grupo 3	3	76,33	6,60	78,20	
Grupo 4	3	96,73	4,27	99,10	

n: nº de observações; DP: desvio-padrão; 1: Kruskal-Wallis

Tabela 2 - Comparações da resistência à compressão entre os grupos

A tabela 3 apresenta as comparações da resistência à compressão dos grupos dois a dois. Não foi possível localizar as diferenças devido ao tamanho reduzido da amostra.

O teste não-paramétrico trabalha com postos, ou seja, com o lugar que cada observação ocupa após a ordenação. Como só há três CP's para cada grupo, há poucas possibilidades de variação de ordenação, o que acabou sendo evidenciado pelos valores-p iguais nas comparações dois a dois.

Número de camadas	1	2	3	4
0	0,081 ¹	0,081 ¹	0,081 ¹	0,081 ¹
1		0,081 ¹	0,081 ¹	0,081 ¹
2			0,081 ¹	0,081 ¹
3				0,081 ¹

1: Bonferroni (valor-p≤0,017)

Tabela 3 - Comparações da resistência à compressão entre os grupos dois a dois

4.3.1.2. Validação dos ensaios

O método de controle do ensaio executado foi classificado como excelente, ou seja, as amostras coletadas e ensaiadas não sofreram interferências nos seus resultados devido à má operação do ensaio (Tabela 4).

Número de camadas	Amplitude	Coeficiente d2	Desvio Padrão Se	Coeficiente de Variação
0	3,9	1,693	1,33	0,0216
1	4,4			
2	5,3			
3	12,8			
4	7,5			
TOTAL	33,9	-	CLASSIFICAÇÃO	Nível 1 (excelente)

Tabela 4 - Comparações da resistência à compressão entre os grupos dois a dois

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Com 95% de confiança, existe diferença entre os grupos analisados, ou seja, o número de camadas de fibra de carbono apresenta efeito significativo na resistência à compressão. Devido ao pequeno tamanho amostral dos grupos não foi possível localizar esta diferença.

A preparação e execução dos ensaios foi classificado como excelente, ou seja, a variabilidade das resistências a compressão das amostras não provém de vícios na execução dos ensaios, de acordo com os parâmetros da NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos.

Não foi possível responder ao problema do trabalho de pesquisa proposto, porém podemos concluir que houve aumento de resistência à compressão axial com o incremento de camadas de PRFC para o traço e condições de aplicação aqui apresentados. Este ganho de resistência chegou a 190% com o acréscimo de 4 camadas, sendo que podemos afirmar que com 5 camadas continuou havendo ganho de resistência, porém não foi possível definir os valores exatos pois foi alcançado o limite da prensa, ou seja, 200 toneladas.

5.1 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

- Avaliar CP's com camadas superiores a cinco, utilizando prensa com limite maior de força;
- Ensaiar CP's 10cm x 20cm para avaliar grupos com numero maior de camadas de PRFC;
- Preparar grupos maiores de ensaios de CP's para ter uma abordagem estatística paramétrica e com erro menor;
- Estudar o limite de incremento de camadas de PRFC x ganho de resistência;
- Incrementar o ensaio a compressão axial com a medição de módulo de elasticidade dos CP's.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARRAZEDO, R. (2002). Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

MACHADO, Ari de Paula. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. São Paulo, PINI LTDA, 2002.

SUDANO, A. L. (2005). Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares de concreto armado encamisados com PRFC (polímero reforçado com fibra de carbono). Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BEBER, Andriei José (2003). Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósito de Fibra de Carbono. 2003. 317. Tese UFRGS, Porto Alegre, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023 – Informação e Documentação: Referência- Elaboração.** Rio de Janeiro, 1982.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2008.

7 ANEXOS

Anexo 1 – Nota fiscal do concreto

Belo Horizonte, 18 de novembro de 2014.

Central: 404 – Olhos D'Água

À
HESA 55 - INVESTIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA.

Obra.: Rua Rio Grande Do Norte, 1436 - Savassi
Att: Engenheiro Otavio

Pela presente estamos encaminhando para vossa apreciação, dosagem de Concreto a ser utilizada na obra em referência.

Assim sendo, colocamos nosso laboratório à vossa inteira disposição para quaisquer verificações e/ou esclarecimentos eventualmente necessários.

I) **TRAÇO:**

Tipo do Concreto	Bombeavel Especial
Tipo do Agregado	Pedra 0/1
Slump-Test (mm)	140+-20

Fck (MPa)	Cimento (kg/m³)	Areia Media (kg/m³)	Pó de Pedra (kg/m³)	Pedra 0 (kg/m³)	Pedra 1 (kg/m³)	Água (l/m³)	Aditivo (l/m³)	Fator a/c
25	289	671	220	270	631	192	2,021	0,665

II) **DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS:**

Cimento	CPIII RS 40 CAMPEAO STA LZA
Areia Media	DW PARREIRAS E DRAGAGENS
Pó de Pedra	BRITADORA BORGES
Pedra 0	MARTINS LANA
Pedra 1	MARTINS LANA
Aditivo	MIRA 140

A dosagem apresentada foi definida para os materiais ora utilizados, desta forma estão sujeitas a alterações, em função de eventuais variações de suas características.

Rua: São Pedro da Aldela, 1600 – Bairro: Olhos D'água
CEP: 32390-000 – Belo Horizonte - Brasil
Fone: (31) 2105-0531 Fax: (31) 2105-0515
e-mail: daisy.bruno@lafarge.com



"INFORMAÇÕES CONFIDENCIAIS - USO EXCLUSIVO LAFARGE"



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Nº:
9510/14
DATA:
31/03/2014
REV: **01**

CLIENTE: **LAB CON CONSULTORIA E SERVIÇOS LTDA**
ENDEREÇO: **RUA SÃO FELICÍSSIMO, 211**
BETÂNIA - BELO HORIZONTE - MG

CARACTERÍSTICAS DO INSTRUMENTO CALIBRADO:
PRENSA DE CONCRETO

ASS. DE INSPEÇÃO

SÉRIE: **-** CAPACIDADE: **200 TON**
MODELO: **KG-70** MARCA: **SOLOCAP/TECNOTEST**
PRENSA Nº: **1- 3/24** PATRIMÔNIO: **-**
OPERAÇÃO: **ELÉTRICA** PISTÃO: **-**
SENSOR DE DEFORMAÇÃO DO INSTRUMENTO CALIBRADO: **INDICADOR DIGITAL**
MARCA: **TECNOTEST** ESCALA: **0 a 2000 KN**
PATRIMÔNIO: **-** CAPACIDADE: **2000 KN**
IDENTIFICAÇÃO: **-** SUBDIVISÃO: **10 KN**
UNIDADE: **KN**

ASS. DE INSPEÇÃO

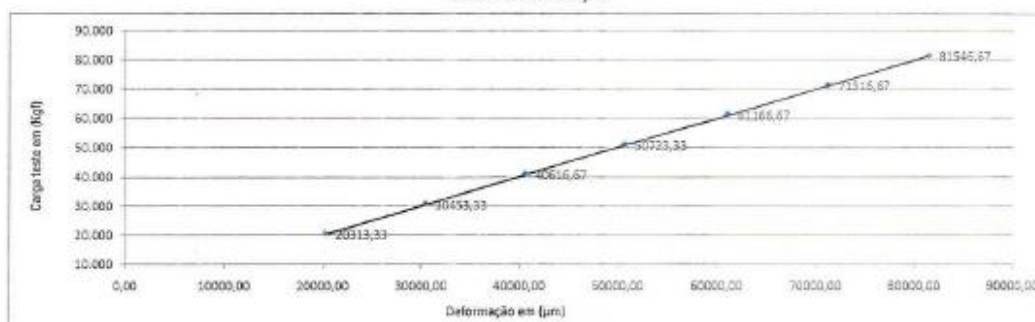
INSTRUMENTOS PADRÕES (Aferidos por CETEC - SENAI RIEMG no dia 17/03/2014 - Certificado N. 125512)

TRANSDUTOR DE FORÇA		INDICADOR DIGITAL	
MARCA: ALFA	MARCA: ALFA	MARCA: ALFA	MARCA: ALFA
MODELO: C100T	MODELO: 3105C	MODELO: 3105C	MODELO: 3105C
NÚMERO SÉRIE: 1010960	NÚMERO SÉRIE: 10470A	NÚMERO SÉRIE: 10470A	NÚMERO SÉRIE: 10470A
CARGA - ff: 100	FAIXA NOMINAL: 0,01f	FAIXA NOMINAL: 0,01f	FAIXA NOMINAL: 0,01f

RESULTADO DA CALIBRAÇÃO

CARGA TESTE (KN)	CARGA TESTE (Kgf)	LEITURAS DE DEFORMAÇÃO NO INSTRUMENTO CALIBRADO (µm)				Incerteza da Medição (Kgf)	Incerteza da Medição (%)	Incerteza do padrão ± (Kgf)	ERRO (%)	REPEATIBILIDADE (%)	VARIAVEIS MÁXIMO
		1ª	2ª	3ª	MÉDIA						
200,00	20.394	20.320	23.310	20.310	20313,33	367,10	1,80	183,55	0,40	0,05	± 2%
300,00	30.591	30.450	31.460	30.450	30453,33	122,38	1,40	61,18	0,49	0,03	
400,00	40.788	40.610	41.620	40.620	40616,67	571,04	1,40	285,52	0,42	0,02	
500,00	50.985	50.720	51.730	50.720	50723,33	489,46	1,95	244,73	0,52	0,02	
600,00	61.182	61.160	61.170	61.170	61166,67	244,74	1,40	122,37	0,03	0,02	
700,00	71.380	71.320	71.310	71.320	71316,67	1223,66	1,71	611,83	0,09	0,01	
800,00	81.577	81.560	81.540	81.540	81546,67	815,78	1,00	407,89	0,04	0,02	

CURVA DE CALIBRAÇÃO



CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Temperatura ambiente - (° C): **22,4** Umidade relativa do ar - (%): **57** Altitude local - (m): **889**

NOTA: O SENSOR DE PRESSÃO ACIMA, FOI CALIBRADO EXCLUSIVAMENTE PARA USO NESTA PRENSA, PORTANTO NÃO DEVE SER UTILIZADO EM OUTRA PRENSA.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação - NORMA N° NIT - R-DICLA - 021 - REV 03/2007 - ANEXO EA-4/02.

Belo Horizonte, 31 março, 2014

SOLOCAP - Geotecnologia Rodoviária Ltda.
Cristiano Costa Moreira - CREA 81510

SOLOCAP - Av dos Agudes, 99 - Alto dos Pinheiros - CEP: 30530-720
Belo Horizonte - MG - FONE: (031) 3047-7450 - E-mail: solocap@solocap.com.br / metrologia@solocap.com.br

1. EMPRESA SOLICITANTE

Otávio Gomes

Obra:

2. IDENTIFICAÇÃO

Descrição concreto	Concreto sem fibra de carbono
Tipo de concreto:	Usinado
Fornecedor	Lafarge
Nota Fiscal Nº:	7232
fck estimado (MPa):	25,0 MPa
Data da concretagem	21/08/2014

3. OBJETIVOS

Ensaios de Resistência a Compressão Axial de corpos de prova de concreto.

4. METODOLOGIA

Os ensaios e atividades obedeceram às prescrições das normas ABNT:

NBR 5738:2003 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

NBR 5739:2007 - Ensaio de Compressão de corpo de prova cilíndrico

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (sem fibra)	18/10/2014	148,0	285,0	1,93	1,00
CP2 (sem fibra)	18/10/2014	149,0	285,0	1,91	1,00
CP3 (sem fibra)	18/10/2014	149,0	285,0	1,91	1,00

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (sem fibra)	1	171,9	601,1	35,0	35,0
CP2 (sem fibra)	1	174,3	593,9	34,1	34,0
CP3 (sem fibra)	1	174,3	541,9	31,1	31,1

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e se aplicam somente à mostra analisada. A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. Utilizar para outros fins somente com autorização da LabCon.

Belo Horizonte, 15 dezembro, 2014



Marcelo Fonseca Araújo

CREA 99046-MG

Rua São Felisíssimo, 211 - Bairro Betânia - CEP: 30.580-250 - Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3383 3827

Anexo 5 – Resultado Ensaio com 1 camada

1. EMPRESA SOLICITANTE

Otávio Gomes

Obra:

2. IDENTIFICAÇÃO

Descrição concreto	Concreto com fibra de carbono - 1 faixa
Tipo de concreto:	Usinado
Fornecedor	Lafarge
Nota Fiscal Nº:	7232
fck estimado (MPa):	25,0 MPa
Data da concretagem	21/08/2014

3. OBJETIVOS

Ensaio de Resistência a Compressão Axial de corpos de prova de concreto.

4. METODOLOGIA

Os ensaios e atividades obedeceram as prescrições das normas ABNT:

NBR 5738:2003 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

NBR 5739:2007 - Ensaio de Compressão de corpo de prova cilíndrico

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 1 faixa)	18/10/2014	150,0	290,0	1,93	1,00
CP2 (com fibra - 1 faixa)	18/10/2014	153,0	290,0	1,90	1,00
CP3 (com fibra - 1 faixa)	18/10/2014	151,0	290,0	1,92	1,00

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 1 faixa)	1	176,6	713,2	40,4	40,4
CP2 (com fibra - 1 faixa)	1	183,8	826,0	44,9	44,8
CP3 (com fibra - 1 faixa)	1	179,0	776,9	43,4	43,4

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e se aplicam somente à mostra analisada. A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. Utilizar para outros fins somente com autorização da LabCon.

Belo Horizonte, 15 dezembro, 2014



Marcelo Fonseca Araújo

CREA 99046-MG

Rua São Felisíssimo, 211 - Bairro Betânia - CEP: 30.580-250 - Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3383 3827

1. EMPRESA SOLICITANTE

Orávio Gomes

Obra:

2. IDENTIFICAÇÃO

Descrição concreto	Concreto com fibra de carbono - 2 faixas
Tipo de concreto:	Usinado
Fornecedor	Lafarge
Nota Fiscal Nº:	7232
fck estimado (MPa):	25,0 MPa
Data da concretagem	21/08/2014

3. OBJETIVOS

Ensaio de Resistência a Compressão Axial de corpos de prova de concreto.

4. METODOLOGIA

Os ensaios e atividades obedeceram às prescrições das normas ABNT:

NBR 5738:2003 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

NBR 5739:2007 - Ensaio de Compressão de corpo de prova cilíndrico

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 2 faixas)	18/10/2014	152,0	295,0	1,94	1,00
CP2 (com fibra - 2 faixas)	18/10/2014	155,0	295,0	1,90	1,00
CP3 (com fibra - 2 faixas)	18/10/2014	155,0	295,0	1,90	1,00

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 2 faixas)	1	181,4	1109,6	61,2	61,3
CP2 (com fibra - 2 faixas)	1	188,6	1080,8	57,3	57,2
CP3 (com fibra - 2 faixas)	1	188,6	1181,7	62,7	62,5

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e se aplicam somente a mostra analisada. A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. Utilizar para outros fins somente com autorização da LabCon.

Belo Horizonte, 15 dezembro, 2014



Marcelo Fonseca Araújo

CREA 99046-MG

Rua São Felisíssimo, 211 - Bairro Betânia - CEP: 30.580-250 - Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3383 3827

		Consultoria - Serviços		RT OT. C. 04/14	
1. EMPRESA SOLICITANTE					
Otávio Gomes					
Obra:					
2. IDENTIFICAÇÃO					
Descrição concreto		Concreto com fibra de carbono - 3 faixas			
Tipo de concreto:		Usinado			
Fornecedor		Lafarge			
Nota Fiscal Nº:		7232			
fck estimado (MPa):		25,0 MPa			
Data da concretagem		21/08/2014			
3. OBJETIVOS					
Ensaio de Resistência a Compressão Axial de corpos de prova de concreto.					
4. METODOLOGIA					
Os ensaios e atividades obedeceram às prescrições das normas ABNT:					
NBR 5738:2003 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova					
NBR 5739:2007 - Ensaio de Compressão de corpo de prova cilíndrico					
5. RESULTADOS DOS ENSAIOS					
Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 3 faixas)	18/10/2014	156,0	295,0	1,89	1,00
CP2 (com fibra - 3 faixas)	18/10/2014	157,0	285,0	1,82	0,99
CP3 (com fibra - 3 faixas)	18/10/2014	156,0	290,0	1,86	0,99
Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 3 faixas)	1	191,0	1568,5	82,1	81,8
CP2 (com fibra - 3 faixas)	1	193,5	1351,7	69,9	69,0
CP3 (com fibra - 3 faixas)	1	191,0	1504,6	78,8	78,2
Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e se aplicam somente à mostra analisada. A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. Utilizar para outros fins somente com autorização da LabCon.					

Belo Horizonte, 15 dezembro, 2014



Marcelo Fonseca Araújo CREA 99046-MG

Rua São Felisíssimo, 211 - Bairro Betânia - CEP: 30.580-250 - Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3383 3827

1. EMPRESA SOLICITANTE

Otávio Gomes

Obra:

2. IDENTIFICAÇÃO

Descrição concreto	Concreto com fibra de carbono - 4 faixas
Tipo de concreto:	Usinado
Fornecedor	Lafarge
Nota Fiscal Nº:	7232
fck estimado (MPa):	25,0 MPa
Data da concretagem	21/08/2014

3. OBJETIVOS

Ensaio de Resistência a Compressão Axial de corpos de prova de concreto.

4. METODOLOGIA

Os ensaios e atividades obedeceram às prescrições das normas ABNT:

NBR 5738:2003 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

NBR 5739:2007 - Ensaio de Compressão de corpo de prova cilíndrico

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Identificação	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 4 faixas)	18/10/2014	158,0	290,0	1,84	0,99
CP2 (com fibra - 4 faixas)	18/10/2014	157,0	290,0	1,85	0,99
CP3 (com fibra - 4 faixas)	18/10/2014	160,0	290,0	1,81	0,99

Identificação	Lote	Área(cm²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 4 faixas)	1	196,0	1966,3	100,3	99,3
CP2 (com fibra - 4 faixas)	1	193,5	1935,0	100,0	99,1
CP3 (com fibra - 4 faixas)	1	201,0	1869,7	93,0	91,8

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e se aplicam somente à mostra analisada. A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. Utilizar para outros fins somente com autorização da LabCon.

Belo Horizonte, 15 dezembro, 2014



Marcelo Fonseca Araújo

CREA 99046-MG

Rua São Felisíssimo, 211 - Bairro Betânia - CEP: 30.580-250 - Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3383 3827

Anexo 9 – Resultado Ensaio com 5 camadas

1. EMPRESA SOLICITANTE

Orávio Gomes

Obra:

2. IDENTIFICAÇÃO

Descrição concreto	Concreto com fibra de carbono - 5 faixas
Tipo de concreto:	Usinado
Fornecedor	Lafarge
Nota Fiscal Nº:	7232
fck estimado (MPa):	25,0 MPa
Data da concretagem	21/08/2014

3. OBJETIVOS

Ensaio de Resistência a Compressão Axial de corpos de prova de concreto.

4. METODOLOGIA

Os ensaios e atividades obedeceram às prescrições das normas ABNT:

NBR 5738:2003 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

NBR 5739:2007 - Ensaio de Compressão de corpo de prova cilíndrico

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Identificação .	Data Ensaio	Diâmetro(mm)-D	Altura(mm) - H	H/D	Fator Correção H/D
CP1 (com fibra - 5 faixas)	18/10/2014	162,0	290,0	1,79	0,98
CP2 (com fibra - 5 faixas)	18/10/2014	158,0	290,0	1,84	0,99
CP3 (com fibra - 5 faixas)	18/10/2014	158,0	290,0	1,84	0,99

Identificação .	Lote	Área(cm²)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
CP1 (com fibra - 5 faixas)	1	206,0	Não rompeu	Não rompeu	Não rompeu
CP2 (com fibra - 5 faixas)	1	196,0	Não rompeu	Não rompeu	Não rompeu
CP3 (com fibra - 5 faixas)	1	196,0	1892,4	96,6	95,6

Observação: A capacidade máxima de carga da prensa utilizada é de 200 toneladas, nesse caso os corpos de prova que não romperam foi porque ultrapassou o limite de carga da prensa.

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e se aplicam somente a mostra analisada. A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. Utilizar para outros fins somente com autorização da LabCon.

Belo Horizonte, 15 dezembro, 2014



Marcelo Fonseca Araújo

CREA 99046-MG

Rua São Felisíssimo, 211 - Bairro Betânia - CEP: 30.580-250 - Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3383 3827