

Probabilistic analysis of the fiber reinforced concrete used in the construction of the Estaleiro Rio Grande dry dock

Análise probabilística do concreto reforçado com fibras utilizado na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande

F. C. MAGALHÃES ^a
fabio.magalhaes@riogrande.ifrs.edu.br

M. V. REAL ^b
mauroreal@furg.br

Abstract

Due to the variability of the concrete strength, it is fundamental to use statistical methodologies to establish the parameters for the concrete structures acceptance. The utilization of a large number of strength test results is very important to the validation and calibration of the existing standard codes and technical specifications. The objective of this study is to make a statistical analysis of the strength test results of the concrete reinforced with metallic and propylene fibers used in the construction of the Estaleiro Rio Grande dry dock, in Rio Grande-RS. A correlation model between the concrete tensile and compressive strengths was proposed. A model to predict the increasing of the concrete strength with time was also established both for the case of compression, as in the case of tension. Furthermore, it was made a comparison among the concrete characteristic strength calculated estimates according to the NBR 12655 [9] and EN-206-1 [17] standard codes and to the ACI COMMITTEE 318 [2].

Keywords: FRC, dry dock, probabilistic analysis.

Resumo

A variabilidade da resistência do concreto torna fundamental a utilização de metodologias estatísticas capazes de estabelecer parâmetros para a aceitação das estruturas. A utilização de um número grande de resultados práticos de ensaios de resistência é de grande importância para a validação e calibração das normas e especificações técnicas existentes. Desta forma, o presente trabalho busca realizar uma análise estatística das propriedades de resistência do concreto com adição de fibras metálicas e de polipropileno utilizado na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande, em Rio Grande-RS. Foram propostos modelos de correlação entre as resistências à tração e à compressão do concreto e correlações entre estas e o tempo. A seguir, foram realizadas comparações entre as estimativas de resistência característica definidas pelas normas NBR 12655 [9] e EN-206-1 [17], assim como pelo ACI COMMITTEE 318 [2].

Palavras-chave: CRF, dique seco, análise probabilística.

^a Professor Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS;

^b Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica - PPGEO, Escola de Engenharia - EE, Universidade Federal do Rio Grande - FURG.

1. Introdução

A variabilidade da resistência do concreto torna fundamental a utilização de metodologias estatísticas capazes de estabelecer parâmetros para a aceitação das estruturas. A utilização de um grande número de resultados de ensaios de resistência, especialmente os obtidos em obras reais, é de grande importância para a validação e calibração das normas e especificações técnicas existentes.

Segundo DINIZ apud AZEVEDO e DINIZ [10] o fato de as normas técnicas e especificações atuais de projeto de estruturas basearem-se no Método dos Estados Limites, ou seja, em métodos semi-probabilísticos, faz com que a descrição estatística de todas as variáveis envolvidas no projeto seja um requisito básico para calibrar as metodologias. O presente trabalho apresenta uma análise estatística da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão do concreto reforçado com fibras (CRF) utilizado na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande, localizado na cidade de Rio Grande-RS, extremo sul do Brasil.

O concreto reforçado com fibras tem seu uso cada vez mais difundido no Brasil, sobretudo na execução de pavimentos rígidos. Trata-se da adição de fibras de baixo ou de alto módulo de elasticidade (ou ambas) no concreto durante sua dosagem com o intuito de melhorar suas características técnicas quando comparadas às do concreto simples.

Diques secos são estruturas construídas em áreas portuárias que têm por objetivo a fabricação, reforma ou manutenção de equipamentos navais, tais como navios, submarinos e plataformas de extração de petróleo. O dique seco do Estaleiro Rio Grande, construído no Super Porto da cidade de Rio Grande-RS, possui 350 metros de comprimento, 133 metros de largura e 14 metros de profundidade, estando posicionado no Canal do Porto de Rio Grande, que liga a Laguna dos Patos ao Oceano Atlântico. Esta estrutura destina-se a construção e reforma de plataformas de petróleo, sendo este, o primeiro dique seco de grande porte a ser construído no país.

A obra do Estaleiro Rio Grande está posicionada próxima ao mar, sendo este ambiente classificado, segundo a NBR 6118 [6], como Classe de Agressividade Ambiental IV. As preocupações com o desempenho da estrutura, tanto no aspecto de resistência, quanto de durabilidade, são evidenciadas através do rigoroso controle tecnológico adotado desde a fase inicial do projeto.

Este rigoroso controle de qualidade utilizado na obra do Estaleiro Rio Grande adotou a amostragem de 100 % das amassadas, conforme estabelecido no item 6.2.3.2 da norma brasileira NBR 12655 [9]. Esta metodologia de avaliação da resistência do concreto proporciona uma grande quantidade de resultados experimentais que raramente estão disponíveis nas obras portuárias brasileiras. Estes resultados foram utilizados no presente trabalho, que realiza uma análise estatística das propriedades de resistência do concreto com adição de fibras metálicas e de polipropileno. Foram realizadas comparações entre as estimativas de resistência característica através dos modelos definidos pelas normas NBR 12655 [9] e EN-206-1 [17], e também pelo ACI COMMITTEE 318 [2]. Adicionalmente, foram propostos modelos de correlação entre as resistências à tração e à compressão do concreto e correlações entre estas e a idade do mesmo.

2. Concreto com adição de fibras

A utilização de fibras para melhorar as características técnicas dos

materiais vem sendo realizada com grande êxito em diversas áreas. Na construção civil existem muitas aplicações consagradas, como as telhas de fibrocimento, sistemas de vedação e isolamento térmico e acústico com fibras de vidro, em concretos projetados para túneis e nos pisos industriais. CHODOUNSKY e VIECILI [12] afirmam que o CRF é um compósito constituído de duas fases: a matriz e as fibras. Segundo eles, as propriedades deste material composto são determinadas pela interação entre as propriedades da matriz e das próprias fibras.

Com sua utilização datada desde a década de 1960, a adição de fibras ao concreto pode ser realizada com distintos materiais, tais como aço, polipropileno, nylon, acrílico e carbono. As fibras de aço e as de polipropileno, no entanto, são as mais utilizadas na elaboração dos CRF.

As fibras de polipropileno possuem um baixo módulo de elasticidade quando comparado ao módulo do concreto endurecido, desta forma, sua função se resume às primeiras horas após o lançamento do concreto. A introdução deste tipo de fibra no concreto é justificada pela minimização da fissuração do concreto que ocorre quando o mesmo está no estado plástico e na primeira etapa do endurecimento.

As fibras de aço são outro meio utilizado para conferir reforço às estruturas executadas em concreto. Quando adicionadas ao concreto, as fibras de aço dificultam a propagação de fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Sobre a utilização de fibras de aço, FIGUEIREDO [19] diz que: "Pela capacidade portante pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizada em baixos teores".

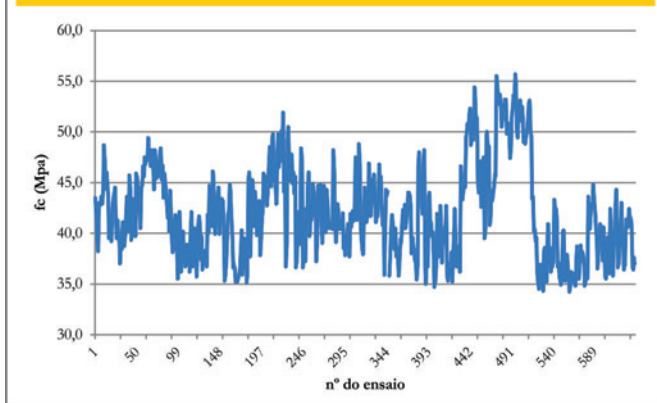
HOLANDA e PINHEIRO [22] defendem a utilização de fibras pela conclusão de que estas atuam como obstáculos ao desenvolvimento das fissuras; interceptando as microfissuras que surgem durante o endurecimento da pasta, impedindo sua progressão e evitando o aparecimento prematuro das macrofissuras.

GAVA et al. [21] relatam que: "As fibras de aço são adicionadas ao concreto de cimento Portland por aumentarem o seu desempenho à fissuração, aumentando a sua capacidade de absorver energia, denominada de tenacidade, e garantindo resistência e controle à fissuração".

O aumento do desempenho à fissuração do concreto reforçado com fibras faz com que este deixe de apresentar o comportamento frágil do concreto simples. Sendo assim, segundo CHEN apud GAVA et al. [21], o CRF passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja passa a ter uma certa capacidade portante mesmo após a fissuração. MEHTA e MONTEIRO [25] afirmam que, para concretos com teores de fibras de baixo a moderado, a contribuição do reforço é maior para a tenacidade à flexão do material do que para a resistência propriamente dita.

Os pavimentos rígidos e os pisos industriais de concreto são as maiores aplicações das fibras de aço e polipropileno. A introdução de fibras de alto módulo de elasticidade aumenta a capacidade destas placas em resistir a esforços, uma vez que as mesmas redistribuem as cargas no maciço de concreto de modo a evitar fraturas no mesmo. A introdução das fibras de baixo módulo, por sua vez, diminui a probabilidade de surgimento de fissuras nas primeiras horas após o lançamento; fato comum devido ao grande volume de água perdido em pisos e pavimentos. Segundo CHODOUNSKI e VIECILI [12], nos pisos industriais, as fibras sintéticas, como a de polipropileno, têm sido utilizadas no controle da retra-

Figura 1 - Variação da resistência à compressão do concreto com fibras aos 28 dias de idade



ção restringida sofrida pelo concreto ainda plástico e posteriormente no início das reações de hidratação do cimento.

A influência das fibras na resistência do concreto não é algo fácil de determinar. Diversos são os fatores que influenciam na resistência do concreto. A relação água/cimento, características físicas e químicas dos agregados e aditivos, o adensamento, as condições de cura, a temperatura, são alguns dos fatores que interferem nesta propriedade.

O concreto é um material cuja capacidade de resistir à tração é reduzida. Quando uma estrutura é submetida a esforços que produzem tensões acima da resistência à tração do concreto, surgem fissuras. A introdução de fibras metálicas no concreto faz com que as mesmas realizem um trabalho de transferência de tensões através destas fissuras, diminuindo o processo de fissuração.

A adição de fibras ao concreto, no entanto, pode gerar alguns problemas: ISAIA [23] relata que o uso de fibras no concreto, além de diminuir a fissuração, altera as condições de consistência do concreto influenciando em sua trabalhabilidade. Em geral, a adição de fibras no concreto ocorre nas centrais dosadoras, simultaneamente a adição dos agregados. A adição na central dosadora é aconselhável, à medida que permite um tempo maior de homogeneização dos materiais. Porém, é possível que se tenha a adição das fibras na obra. Em todos os casos, as fibras devem ser adicionadas da forma mais cuidadosa possível, evitando a formação de aglomerações de fibras, conhecidas pelos profissionais como ouriços.

CHODOUNSKI e VIECILI [12] relatam que: “[...] se os equipamentos de mistura proporcionam adequada homogeneidade ao concreto sem fibras, certamente conduzirão a uma mistura com qualidade do concreto com fibras”.

3. Avaliação probabilística

O presente trabalho fez a análise probabilística das resistências à compressão e à tração do concreto tendo por base um total de 318 séries de corpos de prova moldados segundo a NBR 5738 [4] e rompidos conforme recomendações da NBR 5739 [5]. Os valores de resistência à compressão obtidos com o rompimento aos 28 dias de idade dos 636 corpos de prova moldados são apresentados na Figura 1. Embora as amostras estudadas no presente caso sejam de um concreto com adição de fibras, metálicas e de poli-

propileno, o tratamento estatístico utilizado foi o mesmo adotado pelas normas para concretos sem adições.

3.1 Resistência característica à compressão do concreto segundo a NBR 12655

A NBR 12655 [9] determina os métodos de controle da resistência à compressão do concreto. Este documento estabelece os critérios de formação dos lotes de amostragem para validação das estruturas de concreto e dois métodos de controle de sua resistência: o controle estatístico por amostragem parcial e o controle estatístico por amostragem total. A metodologia da ABNT define que cada exemplar da amostragem deve ser constituído por dois corpos de prova da mesma amassada; toma-se, então, o maior valor de resistência dentre estes como a resistência à compressão (f_c) da amassada. Em outras palavras, o resultado mais baixo deste par é descartado.

3.1.1 Controle estatístico por amostragem parcial

O controle estatístico por amostragem parcial consiste em retirar de forma aleatória, amostras de concreto de algumas betonadas. Neste caso, o número mínimo de exemplares é 6 e 12 para concretos classificados, segundo a NBR 8953 [7], como grupo I e II, respectivamente.

Em situações que se tenha um número de exemplares n tal que $6 \leq n < 20$, a resistência característica estimada ($f_{ck,est}$) é determinada pela equação a seguir:

$$f_{ck,est} = 2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} - f_m \quad (1)$$

Onde:

$m = n/2$;

f_1, f_2, \dots, f_m são os valores de resistência dos exemplares em ordem crescente.

Quando o número de exemplares for superior a vinte, $n \geq 20$, a resistência característica estimada é dada por:

$$f_{ck,est} = f_{cm} - 1.65 \cdot s \quad (2)$$

onde:

f_{cm} é a resistência média do lote expressa em MPa;

s é o desvio padrão da amostra expresso em MPa.

3.1.2 Controle estatístico por amostragem total

A análise estatística por amostragem total consiste no ensaio de 100 % das amassadas de concreto.

Para $n \leq 20$, o valor da resistência característica estimada do lote é igual ao valor da menor resistência dentre os exemplares ensaiados; ou seja, $f_{ck,est} = f_i$.

Para $n > 20$, $f_{ck,est} = f_p$, onde $i = 0,05 \cdot n$. Ou seja, a resistência estimada é igual ao valor do elemento que representa o quinto

percentil dentre os exemplares colocados em ordem crescente. Quando o valor de *i* for fracionário, deve-se adotar o valor inteiro imediatamente superior.

3.1.3 Resistência característica do CRF segundo a NBR 12655

A metodologia de controle por amostragem parcial, proposto pela NBR 12655 [9], utiliza-se da metade menos resistente dos resultados dos exemplares ensaiados no momento de estimar a resistência de determinado lote. Baseia-se no modelo estatístico que define como normal a distribuição de probabilidades das resistências do concreto. Esta metodologia admite que todos os exemplares, cujos valores de resistência são utilizados no cálculo, foram extraídos de uma população homogênea. Conforme FUSCO [20], esta estimativa é centrada no valor característico da população analisada. O autor complementa que a função da equação (1) decorre de duas estimativas de médias, uma da média do conjunto de valores da metade menos resistente da amostra, e outra da média do conjunto de todos os valores da amostra, através da mediana do conjunto. A variância desta função é significativamente menor do que a variância de estimadores que consideram a variância da população.

A metodologia por controle total das betonadas de concreto possui um cálculo mais simplificado, baseado no polígono de frequências dos valores de resistência. O valor $0,05.n$, neste caso, faz referência ao percentual de 5% de *n* exemplares, fazendo relação com a definição de f_{ck} .

Com o objetivo de contribuir para a discussão científica, os dados obtidos nos ensaios das betonadas de concreto utilizadas na obra do Estaleiro Rio Grande foram analisados segundo as duas metodologias. BAUER *et al.* [11] apresentam um estudo de caso de lotes de um dado concreto através dos estimadores propostos pela NBR 12655 [9], evidenciando as diferenças apontadas por cada um deles. AZEVEDO e DINIZ [10] também apresentam uma

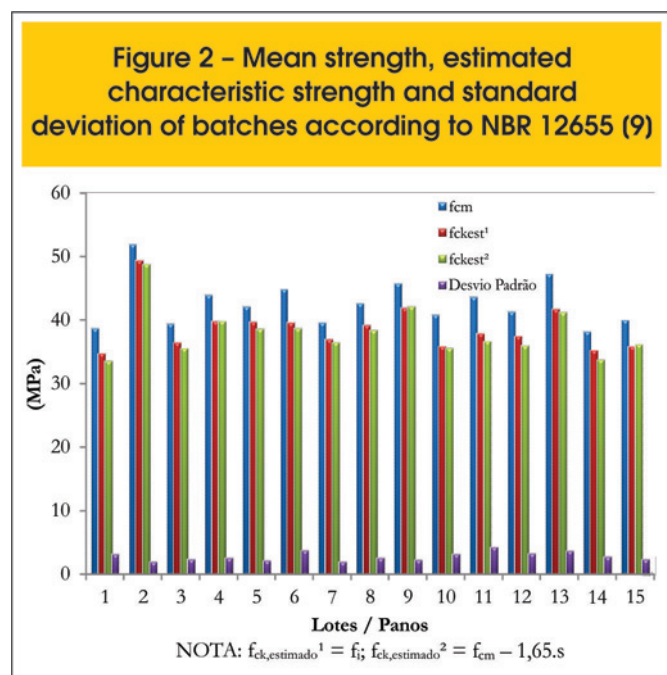
análise das estimativas de diferentes metodologias, estimulando futuras análises sobre o tema.

Conforme já relatado, a amostragem dos lotes utilizados na referida obra com concreto com adição de fibras, foi de 100 %. Desta forma, todas as amassadas de concreto tiveram corpos de prova moldados e rompidos para a determinação da resistência à compressão aos 28 dias de idade. A construção da área de pré-edificação do Estaleiro Rio Grande foi realizada em etapas, sendo composta por 15 panos. Estes panos de pavimento, executados em dias distintos, satisfazem as exigências da NBR 12655 [9] no que diz respeito a formação dos lotes para o controle de aceitação da peça. Desta forma, a aceitação do pavimento rígido do estaleiro foi tratada estatisticamente e dividida em 15 lotes com número de exemplares entre 20 e 23; sendo que cada lote corresponde a um pano de piso. Utilizando a metodologia de divisão do pavimento em lotes correspondentes a cada um dos panos concretados são determinados valores de caracterização da peça. A Figura 2 apresenta os valores médios de resistência, o desvio padrão e as resistências estimadas pelos dois métodos propostos pela ABNT.

Percebe-se através dos resultados expostos na Figura 2, que o valor de $f_{ck, estimado}$ pode variar para mais ou para menos, dependendo das características do lote que está sendo analisado e da metodologia considerada. No entanto, pode-se observar que os resultados obtidos pelos dois casos foram próximos; a maior diferença entre os métodos foi de 1,5 MPa no pano nº 14. Outro aspecto importante é que em apenas dois dos quinze lotes considerados a resistência obtida pela equação (2) ($f_{ck, est}^2$), apresentou valor superior ao do $f_{ck, est}^1$, que é o valor adotado pela NBR 12655 [9] quando a amostragem é total. A semelhança entre os resultados dos dois métodos era esperada em virtude da definição de resistência característica, utilizada em ambas as metodologias.

3.2 Resistência característica à compressão do concreto segundo o ACI-318

O método norte-americano de estimar a resistência característica à compressão do concreto apresenta, basicamente, três equações. O ACI-318 [2], divide o controle estatístico em concreto com resistência característica à compressão menor do que ou igual a 34,5 MPa e com resistência maior do que 34,5 MPa. A relação entre a resistência de dosagem (f'_c) e a resistência característica à compressão (f'_c) é estabelecida segundo as equações a seguir:



$$f'_{cr} = f'_c + 1.34.s \tag{3}$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33.s - 3.45 \tag{4}$$

$$f'_{cr} = 0.90.f'_c + 2.33.s \tag{5}$$

Figura 3 – Resistência média (f'_{cr}), resistência estimada (f'_c) e desvio padrão dos lotes segundo o ACI-318 (2)

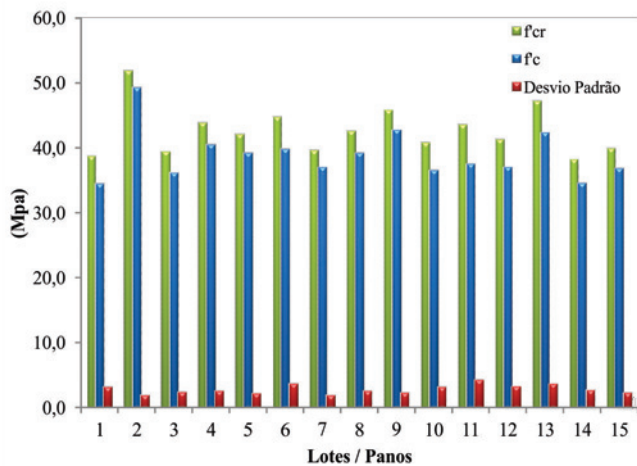
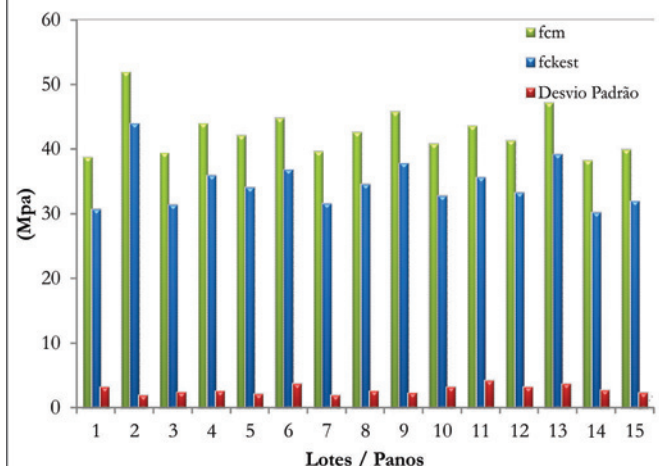


Figura 4 – Resistência média, resistência estimada e desvio padrão dos lotes segundo o EN-206-1 (17)



As equações (3) e (4) são equivalentes quando o desvio padrão atinge um valor de aproximadamente 3,45 MPa. Ambas referem-se a concretos com resistência característica igual ou inferior a 34,5 MPa. Para concretos com resistência característica à compressão superior a 34,5 MPa o ACI-318 determina o uso das equações (3) e (5), adotando-se o maior valor obtido para f'_{cr} entre as duas. Considerando-se que o concreto do pavimento rígido estudado no presente trabalho possui especificação de resistência à compressão de 35 MPa, foram utilizadas as equações (3) e (5). Neste caso, adota-se para f'_c o menor valor obtido entre as equações (3) e (5), a partir dos valores de resistência média de dosagem (f'_{cr}) e do desvio padrão (s) de cada lote, num procedimento a favor da segurança.

No caso da metodologia norte-americana, o conceito de exemplar é substituído pelo conceito “*strength test*”; que estabelece como o resultado de um determinado ensaio a média dos valores obtidos em dois corpos de prova distintos e não o maior valor, conforme a metodologia da ABNT. Neste aspecto, o ACI-318 [2] é mais rigoroso que a NBR 12655 [9].

A Figura 3 apresenta os valores das resistências estimadas pela metodologia norte-americana de cada um dos lotes analisados.

3.3 Resistência característica à compressão do concreto segundo o EN-206-1

A norma europeia EN-206-1 [17] estabelece os critérios de controle de conformidade da produção de concreto. Esta norma determina como devem ser realizadas as amostragens, bem como os critérios para aceitação de estruturas de concreto.

Para validação de determinado lote de concreto, a EN-206-1 [17] apresenta dois diferentes critérios. Uma estrutura cuja conformidade seja avaliada através da metodologia europeia será considerada aprovada quando os dois critérios forem satisfeitos.

Os critérios de conformidade para a resistência à compressão do concreto segundo o modelo europeu são apresentados na Tabela 1. Com o objetivo de comparar os modelos de estimativa de resistência dos modelos norte-americano e brasileiro com o código europeu, fez-se a avaliação dos lotes segundo o Critério 1. A Figura 4 apresenta os valores estimados de resistência à compressão de cada um dos quinze lotes estudados segundo este critério da EN-206-1 [17].

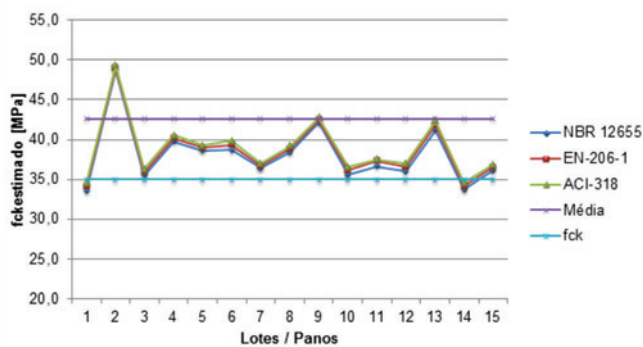
3.4 Relação entre as resistências estimadas pelas distintas normas para o CRF

As metodologias apresentadas pelas normas brasileiras da

Tabela 1 – Critérios de conformidade para resistência à compressão (EN-206-1 (17))

Produção	Número “n” de resultados de ensaios da resistência à compressão do grupo	Critério 1 Média dos “n” resultados	Critério 2 Qualquer resultado individual de ensaio
Inicial	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Contínua	≥ 15	$\geq f_{ck} + 1,48.\sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

Figura 5 - Resistência estimada em cada lote segundo as distintas normas



ABNT foram analisadas e comparadas com os modelos norte-americano do ACI-COMMITTEE 318/214 e europeu do EN-206-1. Foi evidenciado o fato de o modelo brasileiro apresentar estimativas de resistência característica inferiores aos demais para um mesmo lote analisado. Também foi verificado que a norma norte-americana apresenta estimativas mais generosas para um mesmo lote analisado, quando comparado com as demais normas testadas. A Figura 5 apresenta o comparativo entre os estimadores da resistência à compressão característica segundo as três normas analisadas.

O modelo de previsão da ABNT apresentou valores de resistência estimada bem próximos aos da proposta europeia. Quanto a comparação entre os modelos de estimativa da ABNT, foi determinado que o modelo de amostragem total estabelece valores maiores em grande parte dos lotes considerados. Contudo, foi constatado que os modelos de aceitação previstos pela NBR apresentam valores muito similares; fato que torna indiferente a escolha do critério adotado no momento da aceitação do lote.

Contudo, AZEVEDO e DINIZ [10] apontam que antes de se concluir apressadamente que uma norma é mais conservadora do que outra se deve ter conhecimento dos níveis de confiabilidade implícitos em cada caso; sem tratar de forma isolada as variáveis envolvidas no processo. PEREIRA [27] complementa, afirmando que um estimador eficiente é aquele capaz de distinguir entre o concreto de boa qualidade e o de má qualidade, evitando aceitações ou rejeições de forma equivocada.

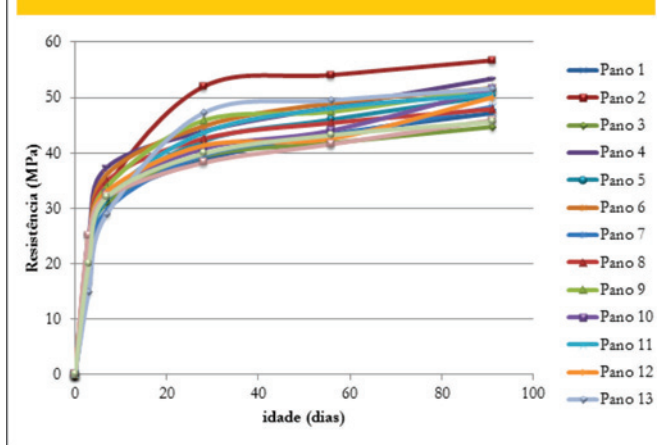
4. Variação da resistência à compressão do CRF ao longo do tempo

Diversos são os estudos que buscam determinar uma correlação entre as resistências à compressão do concreto e a idade do mesmo. Dentre estes, podem ser citados as expressões propostas em FALCÃO BAUER [18], na NBR 6118 [6], no CEB-90 [13] e em MEHTA e MONTEIRO [25]. Tais estudos indicam que são vários os fatores que influenciam a resistência do concreto durante os primeiros meses de vida. As condições de cura, temperatura e umidade do meio são alguns destes fatores. MEHTA e MONTEI-

Tabela 2 - Número de elementos da amostra, resistência média e desvio padrão dos lotes aos 3, 7, 28, 56 e 91 dias de idade (MPa)

PANO	3 dias			7 dias			28 dias			56 dias			91 dias		
	n	média	desvpad	n	média	desvpad	n	média	desvpad	n	média	desvpad	n	média	desvpad
1	10	22,0	1,30	10	31,2	2,54	20	38,7	3,15	7	43,4	3,93	7	47,2	2,74
2	11	17,0	1,30	10	33,7	1,06	21	52,0	1,93	7	54,1	1,71	7	56,7	1,65
3	10	21,0	2,10	11	31,0	1,39	21	39,4	2,36	7	41,8	2,59	7	44,7	2,36
4	11	25,0	2,20	10	37,4	3,35	21	43,9	2,53	7	48,3	3,25	7	53,4	5,50
5	11	19,0	2,60	10	31,7	2,12	21	42,2	2,13	7	46,0	2,79	7	50,3	2,70
6	11	23,0	1,60	10	36,2	1,56	21	44,8	3,70	6	49,0	2,81	7	51,7	1,87
7	11	17,0	3,00	11	29,7	1,96	22	39,6	1,94	8	43,1	2,23	8	48,3	2,14
8	11	22,8	2,02	11	34,9	2,02	22	42,6	2,02	7	45,4	2,02	7	47,9	2,02
9	11	22,9	0,86	11	33,9	2,38	22	45,8	2,26	8	47,4	1,44	8	51,7	1,87
10	12	21,0	3,00	11	32,5	3,81	23	40,8	3,18	8	44,1	3,02	8	51,5	5,03
11	10	22,0	2,30	11	32,1	2,89	21	43,7	4,22	7	48,1	4,19	7	50,6	4,26
12	11	24,0	1,70	10	33,1	1,61	21	41,3	3,21	7	42,6	1,99	7	50,0	5,27
13	11	15,0	1,90	10	29,0	3,43	21	47,2	3,64	7	49,5	2,95	7	51,6	2,38
14	11	25,0	1,60	10	32,2	2,19	21	38,2	2,73	8	41,6	3,14	8	45,9	4,20
15	10	20,0	1,10	10	32,1	2,07	20	39,9	2,28	7	43,2	2,02	7	45,6	2,23

Figura 6 - Variação da resistência à compressão com o tempo para o concreto com adição de fibras



RO [25] complementam que: “Para um dado fator água/cimento, quanto maior o período de cura úmida maior a resistência, admitindo-se que a hidratação das partículas de cimento anidro continua ocorrendo”.

NEVILLE [26] relata que os cimentos Portland cuja composição apresentava altos teores de silicato dicálcico (C2S), típicos do início do século XX, mostravam um aumento de resistência nos concretos expostos no ambiente, em escala logarítmica até os 50 anos de idade. Com a menor proporção de C2S utilizada nos ci-

mentos atuais, e com o aumento da área específica proporcionada pelas melhores técnicas de fabricação, as resistências máximas passaram a se dar com idades entre 10 e 25 anos.

Os 15 lotes que compõem a amostragem do concreto reforçado com fibras estudado neste trabalho tiveram corpos de prova moldados e rompidos com idades de 3, 7, 28, 56 e 91 dias. Com os resultados dos rompimentos destes corpos de prova, foi possível avaliar e gerar um modelo matemático capaz de representar a variação da resistência à compressão do CRF ao longo do tempo.

A Tabela 2 apresenta os valores de resistência média e desvio padrão para cada uma das idades, assim como o número de séries que compõem a amostra.

Os dados apresentados na Tabela 2 fornecem as curvas de evolução da resistência média do concreto com o tempo apresentados na Figura 6. Com base nas curvas da Figura 6 pôde-se determinar uma correlação que permite prever a resistência à compressão do concreto em uma dada idade:

$$f_c(t) = 7.974 \cdot \ln(t) + 14.630 \text{ Mpa}$$

(6)

Onde:

t representa a idade do concreto, expressa em dias.

A Tabela 3 apresenta a relação entre a resistência à compressão do concreto obtida na idade t , através da equação (6) e a resistência aos 28 dias. As relações f_{ct}/f_{c28} médias dos resultados de canteiro são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Relação f_{ct}/f_{c28} determinada pelo modelo proposto para o concreto com adição de fibras

Especificações do traço	Idade						
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
Cimento Portland CP-I, adição de fibras metálica e de polipropileno, $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	0,31	0,54	0,72	0,94	1,00	1,15	1,26

Tabela 4 - Relação f_{ct}/f_{c28} média dos ensaios de canteiro determinada para o concreto com adição de fibras

Especificações do traço	Age				
	3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
Cimento Portland CP-I, adição de fibras metálica e de polipropileno, $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	0,49	0,77	1,00	1,07	1,16

Nota-se que o modelo matemático proposto adapta-se com bastante semelhança para idades $t \leq 28$ dias; sendo pouco preciso nos demais casos. É importante observar que esta expressão foi estabelecida para concretos executados com cimento Portland comum e com adição de fibras ao concreto; logo, em concretos distintos do considerado neste estudo a equação (6) passa a não ser válida.

Diversos são os modelos apresentados pelas normas vigentes e por autores da área para prever o comportamento da resistência à compressão do concreto com o aumento da sua idade. A grande maioria das equações presentes nos trabalhos sobre o tema, no entanto, baseiam-se em concretos sem adição de fibras.

A Figura 7, apresenta o gráfico dos valores de resistência obtidos através dos ensaios à compressão segundo a NBR 5739 [5]. Também nesta figura são apresentados os modelos de previsão de resistência à compressão do concreto recomendados pela NBR 6118 [6] e pelo ACI-318 [2]; expressos pelas equações (7) e (8), respectivamente:

$$f_c(t) = f_{c28} \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (7)$$

$$f_c(t) = f_{c28} \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (8)$$

Percebe-se, através da Figura 7, que os modelos apresentados nas normas vigentes podem ser adaptados para concretos com adição de fibras metálicas e de polipropileno. Esta afirmativa pode ser feita para concretos executados com cimento classificado pela ABCP como CP-I e com adições de fibras metálicas na ordem de 30 kg/m³.

A variação da resistência do concreto é uma propriedade intimamente ligada ao tipo de cimento utilizado na elaboração do con-

creto. No caso analisado, pode-se perceber um grande acréscimo de resistência nas primeiras quatro semanas de idade do concreto, sendo este bem inferior nas demais semanas até completar os primeiros três meses. Em média, o acréscimo de resistência à compressão entre o terceiro e o vigésimo oitavo dia deste concreto foi próximo a 95 %. Para o período compreendido entre 28 e 91 dias, o acréscimo médio de resistência à compressão foi de aproximadamente 15 %.

5. Variação da resistência à tração do CRF ao longo do tempo

Sendo a resistência à tração do concreto uma propriedade cada vez mais solicitada pelos projetistas, principalmente de pavimentos e pisos de concreto, o conhecimento da variação de suas características com o tempo torna-se cada vez mais importante. O aumento da resistência à tração de um concreto não ocorre com muita intensidade após o mesmo atingir 28 dias de idade. Além disso, a resistência à tração do concreto é mais sensível às variações dos efeitos externos; tais como cura inadequada e adensamento insuficiente. Este incremento de resistência à tração após os 28 dias de idade é ainda menos conhecido quando tratados os concretos com adição de fibras.

Dentre os fatores que influenciam a resistência à tração do concreto, podemos destacar a interação entre os agregados e a pasta de cimento, a geometria dos agregados graúdos, condições de cura, adensamento, teor e fator de forma de fibras (quando utilizado), entre outros.

A determinação da resistência à tração do concreto pode ser realizada por três distintos ensaios. O ensaio de tração direta consiste em um mecanismo de fixação que traciona um corpo de prova cilíndrico de concreto, semelhante aos ensaios de tração de aço destinado a construção. São raramente realizados, pois os equipamentos de fixação introduzem tensões secundárias difíceis de serem mensuradas. O ensaio por compressão diametral é conhecido mundialmente como o Ensaio Brasileiro, visto que foi desenvolvido no Brasil, em 1943, pelo professor Fernando Lobo Carneiro. Consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico ao longo de duas linhas axiais diametralmente opostas, determinando a resistência no plano de ruptura à tração. Este ensaio é amplamente

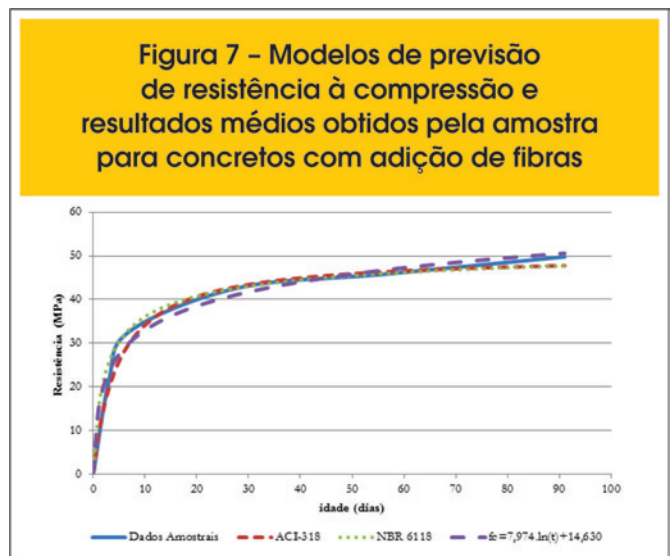
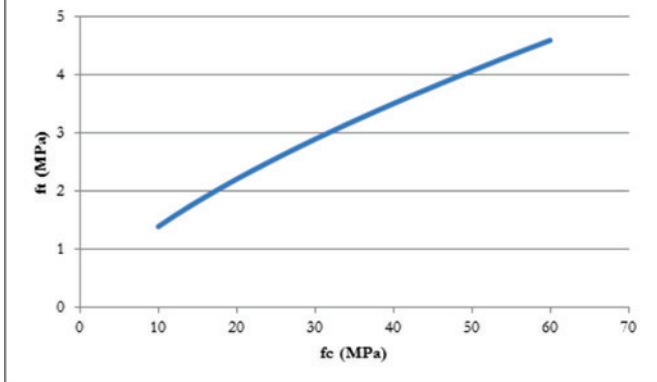


Figura 9 – Relação entre a resistência à compressão f_c e a resistência média à tração f_t , segundo modelo adotado pela ABNT



utilizado pela simplicidade executiva do mesmo em laboratório. O ensaio de tração na flexão consiste no rompimento de corpos de prova prismáticos com aplicação de duas cargas linearmente distribuídas nos terços médios da peça. Esta composição provoca tração pura na face inferior do prisma, ou seja, não há efeitos de esforços cortantes no local da ruptura.

No caso de ensaios de concretos com adição de fibras, os modelos que utilizam de corpos de prova cilíndricos são menos recomendados, sobretudo na compressão diametral, visto que as dimensões das formas de moldagem, na maioria dos casos, não permitem uma distribuição uniforme das fibras. As formas prismáticas utilizadas no ensaio de tração na flexão permitem uma reprodução mais verídica das condições existentes nos locais de aplicação do CRF.

O controle de conformidade do concreto do presente trabalho foi realizado pelo ensaio de tração na flexão; utilizou-se CP's com dimensões 15 x 15 x 50 cm. A Figura 8 apresenta o aumento da resistência à tração média, correspondente à carga máxima (módulo de ruptura), dentre os corpos de prova de concreto com fibras amostrados.

Através das relações estabelecidas entre a resistência à tração na flexão para as amostras com mais de 28 dias e de espécimes testados na idade de 28 dias, chega-se a uma correlação entre a resistência à tração na flexão e idade, para as idades superiores a 28 dias, para o concreto com fibras objeto deste estudo:

$$f_{ct}(t) = 4.257 \cdot e^{0.002 \cdot t} \text{ Mpa}$$

(9)

Onde:

f_{ct} é a resistência à tração na flexão, em MPa;

t é a idade do concreto, expressa em dias; com $t \geq 28$ dias.

Percebe-se através da relação estabelecida na equação (9) que a resistência à tração na flexão do concreto possui um incremento de resistência bastante reduzido desde os 28 dias de idade até os três primeiros meses após a dosagem. Neste período, o aumento da resistência à tração é pouco superior a 15 %; em média, inferior

a 1,0 MPa. O aumento da resistência à compressão, também é algo em torno de 15 a 20 %, chegando a valores de 7,0 MPa; em média neste mesmo período.

No entanto, deve-se levar em consideração que o tipo de cimento utilizado neste concreto adapta-se a classificação CP-I da ABCP. Sendo assim, o incremento da resistência em idades superiores a 28 dias não são muito relevantes; fato que, em geral, não acontece com concretos executados com cimento com adições de materiais pozolânicos como o CP-IV, por exemplo.

6. Correlação entre a resistência à compressão e à tração na flexão do CRF

Poucos são os dados consistentes que se tem acerca da correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração de uma mesma amassada de concreto. A resistência à compressão, como exposto anteriormente, é a propriedade do concreto mais valorizada e mais ensaiada pelos construtores. Porém, em muitos casos o conhecimento da capacidade de o concreto resistir à tração torna-se fundamental para a correta utilização da estrutura. Na impossibilidade de se medir esta grandeza por meio de ensaios em laboratórios, as correlações se apresentam como um grande auxílio para estimar dados não medidos.

SOUZA et al. [29] relata que: "Na relação da resistência à compressão com a resistência à tração, tem-se os trabalhos realizados pelo ACI (1991) e pelo CEB (1990), que apontam para a diminuição desta razão com o aumento da resistência à compressão". Para estes autores, este fato faz com que muitas correlações entre a resistência à tração e à compressão não forneçam resultados satisfatórios, sobretudo quando relacionados a concretos de alta resistência.

Figura 10 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão do concreto (NEVILLE (25))

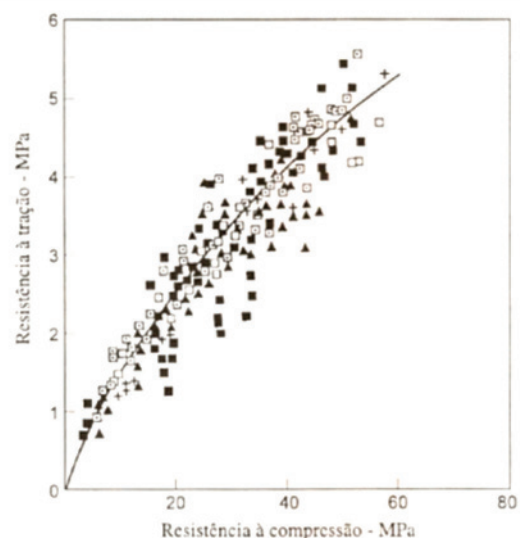
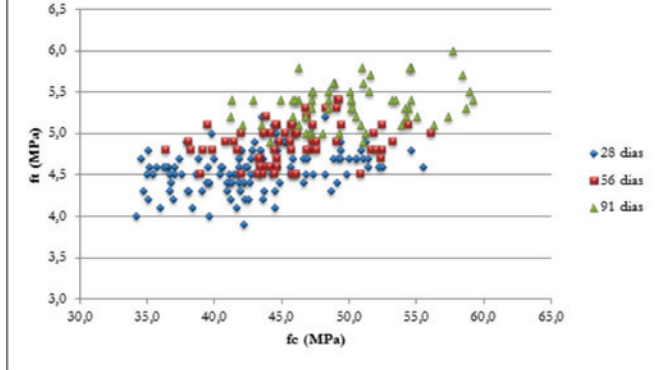


Figura 11 - Gráfico de dispersão dos resultados de resistência à tração na flexão e à compressão do concreto com adição de fibras para as idades de 28, 56 e 91 dias



NEVILLE [26] argumenta que, quando aumenta a resistência à compressão do concreto f_c , aumenta também a resistência à tração f_t , porém em uma razão decrescente. Além disso, ele expõe que a relação f_t/f_c diminui com o tempo na medida em que a resistência à compressão cresce mais rapidamente do que a resistência à tração a partir do primeiro mês após a execução do concreto. RAPHAEL *apud* NEVILLE [26] sugeriu um modelo de relação entre as resistências à tração e à compressão do concreto. Este modelo foi adotado pela norma brasileira, através da NBR 6118 [6]. A relação é apresentada através do gráfico da Figura 9.

SOUZA [29] apresenta uma relação f_t/f_c obtida através de ensaios de resistência à tração por compressão diametral e na flexão em concreto com adição de metacaulim; comparando esta com as relações propostas pelo ACI, pela ABNT e pelos pesquisadores DAL MOLIN (1995) e SENSALÉ (2000). Estas últimas relações foram determinadas com a utilização de concreto com adição de sílica ativa e cinza de casca de arroz, respectivamente.

A partir destes dados, SOUZA [29] propôs uma equação que correlaciona a resistência à tração na flexão (f_{tf}) com a resistência à compressão (f_c):

$$f_{tf} = 0.1733 \cdot f_c^{0.9191} \text{ Mpa} \quad (10)$$

Outros resultados presentes na bibliografia mostram relações semelhantes aos previstos pela norma brasileira; cada um referente a um tipo de ensaio de tração. A Figura 10 apresenta uma série de resultados coletados por OLUOKUN *apud* NEVILLE [26] estabelecendo a correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração do concreto obtido através de ensaio de compressão diametral.

É importante observar que, mais uma vez, nenhuma das considerações apresentadas até o momento refere-se a concretos com adição de fibras; fato que pode provocar grandes variações nas resistências, sobretudo em relação à tração. A introdução de fibras no concreto gera um compósito cuja resistência tende a sofrer grandes alterações, sobretudo nos esforços de tração.

A Figura 11 apresenta um resumo das relações entre as resistências à tração e à compressão do CRF nas idades de 28, 56 e 91 dias. Os resultados desta figura permitem estabelecer uma correlação entre f_{tf} e f_c com base nas resistências estabelecidas nas três idades ensaiadas:

$$f_{tf} = 1.069 \cdot f_c^{0.395} \text{ Mpa} \quad (11)$$

Onde:

f_{tf} e f_c são a resistência à tração na flexão e à compressão do concreto em MPa, respectivamente.

A correlação entre f_{tf} e f_c definida no presente trabalho para o concreto com adição de fibras está próxima às demais correlações estabelecidas pelos autores apresentados em SILVA et al. [28], as quais foram obtidas para concretos sem fibras. Esta fato mostra que o comportamento da resistência à tração em relação à resistência à compressão do concreto com o teor de fibras estudado neste trabalho pode ser estimado, com um erro percentual inferior a 8%, através expressões definidas para concretos sem fibras.

7. Conclusões

As flutuações dos valores medidos das propriedades mecânicas do concreto observadas em ensaios, sobretudo nos de resistência, fazem com que a utilização de uma grande quantidade de dados amostrais seja extremamente útil para estabelecer parâmetros de aceitação das estruturas.

Atualmente, existem diversos modelos propostos para estabelecer o controle estatístico dos materiais empregados nas estruturas de concreto. Esta diversidade nos modelos adotados em cada região ou país é um reflexo da grande variabilidade que está relacionada à execução do concreto. Controles tecnológicos, metodologias de dosagem, características dos materiais, são alguns dos fatores que fazem com que o concreto tenha peculiaridades relacionadas à região do planeta onde o mesmo é produzido.

Um bom controle tecnológico é fundamental para garantir à estrutura de concreto as condições de segurança estabelecidas em norma. Este controle deve ser confiável o bastante para evitar a reprovação de lotes de concretos conformes e a aprovação de estruturas cujas características de segurança possam ter sido prejudicadas durante a execução. Embora existam distintas metodologias para a aceitação destas estruturas, as mesmas devem refletir de forma adequada os resultados práticos estabelecidos em obra. Este trabalho aplicou diversos métodos de controle e aceitação de estruturas de concreto aos resultados práticos oriundos do concreto lançado na obra do dique seco do Estaleiro Rio Grande construído na cidade de Rio Grande - RS.

A partir da análise de 1885 rompimentos de corpos de prova à compressão e 245 à tração na flexão, o presente trabalho determinou os parâmetros de aceitação dos lotes ensaiados da área de pré-edificação do estaleiro.

As metodologias apresentadas pelas normas brasileiras da ABNT foram analisadas e comparadas com os modelos norte-americano do ACI-COMMITTEE 318 [2] e europeu do EN-206-1 [17]. Foi evidenciado o fato de o modelo brasileiro apresentar estimativas de resistência característica inferiores aos demais para um mesmo

lote analisado. Fato que, embora não possa ser conclusivo para classificar uma metodologia como mais rigorosa do que outra, pode refletir a qualidade da produção e do controle utilizado em cada uma das regiões, visto que estas tendem a serem reflexos da prática construtiva de determinado local. Foi evidenciado o fato de a norma norte-americana apresentar estimativas mais generosas para um mesmo lote analisado, quando comparado com as demais normas testadas. O modelo de previsão da ABNT apresentou valores de resistência estimada bem próximos aos da proposta européia.

Foi realizada também, uma análise comparativa entre os modelos de aceitação do concreto definidos pela NBR 12655 [9], para a amostragem total e amostragem parcial das amassadas de concreto. Desta forma foi determinado que o modelo de amostragem total estabelece valores maiores em grande parte dos lotes considerados. Contudo, foi constatado que os modelos de aceitação previstos pela NBR apresentam valores muito similares, como pode ser previsto através da origem dos modelos; fato que torna indiferente a escolha do critério adotado no momento da aceitação do lote.

Foi definido para o concreto reforçado com fibras (CRF) objeto deste estudo, um modelo de correlação das resistências à compressão com o tempo, através do rompimento de CP's com 3, 7, 28, 56 e 91 dias de idade. Através desta correlação pode-se verificar uma grande compatibilidade entre esta e os modelos previstos na norma brasileira NBR 6118 [6] e norte-americana ACI-318 [2] para concreto simples. Desta forma, foi observado que os modelos de previsão de resistência à compressão do concreto simples com o tempo, quando aplicados ao concreto reforçado com fibras apresentam uma boa aderência com os resultados experimentais. Isso indica que os modelos para concreto simples podem ser aplicados para esse tipo de CRF, com o mesmo nível de resistência e mesmo teor de fibras. Foi estabelecido também, um modelo para a evolução da resistência à tração na flexão do CRF em relação à idade do mesmo.

A correlação existente entre as resistências à tração e à compressão do concreto com adição de fibras foi determinada e comparada com os modelos previstos por pesquisadores e normas. Os resultados obtidos mostraram que os modelos de previsão das normas ACI-318 [2], CEB-1990 [13] e NBR 6118 [6], estabelecidos para concretos simples, apresentaram uma boa correlação para o CRF, para este nível de resistência e teor de fibras.

Finalmente, as análises estatísticas realizadas mostraram que o concreto com adição de fibras, empregado na construção do piso industrial da área de pré-edificação do estaleiro, com $f_{ck} = 35$ MPa, atendeu aos requisitos de qualidade em relação à resistência prescritos pelas normas brasileiras.

8. Referências bibliográficas

- [01] ACI COMMITTEE 214. Evolution of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-02). American Concrete Institute, 2002.
- [02] ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-05). American Concrete Institute, 2005.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Amostragem de concreto fresco. NBR NM 33. Rio de Janeiro, 1998.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2008.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2007.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. NBR 8953. Rio de Janeiro, 1992.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. NBR 12142. Rio de Janeiro, 1991.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. NBR 12655. Rio de Janeiro, 2006.
- [10] AZEVEDO, C. P. B.; DINIZ, S. M. C. Estudo Probabilístico da Resistência a Compressão de Concretos Utilizados em Fundações. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Salvador – BA, 2008.
- [11] BAUER, E.; KRAUSS, E; MOTA, N. M. B.; COSTA, C. M. C.; PEREIRA, M. S. Discussão da Variabilidade do Concreto e dos Estimadores da Resistência Característica – Estudo de Caso. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Bento Gonçalves – RS, 2007.
- [12] CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. Pisos Industriais de Concreto: Aspectos Teóricos e Executivos. São Paulo, Reggenza, 2007.
- [13] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP Model Code 1990. London, Thomas Telford, 1993.
- [14] CUPERTINO, M. A. L.; CASTRO A. de; INÁCIO, J. J.; ANDRADE, M. A. S. Avaliação de fatores de ensaio que interferem na resistência à compressão e na resistência à tração simples do concreto. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Bento Gonçalves – RS, 2007.
- [15] DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVEIRA, A.P. M.; KULAKOWSKI, M. P. Estudos de Concretos com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em piso especiais. Porto Alegre. Disponível em <www.allquimica.com.br>. Acesso em 12/10/2009.
- [16] EUROCODE 2. Design of Concrete Structures. Bruxelas, 2002.
- [17] EUROPEAN STANDARD. Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. EN-206-1. Bruxelas, 2007.
- [18] FALCÃO BAUER, L. A. Materiais de Construção. Vol 1 e 2, São Paulo, LTC, 2000.

- [19] FIGUEIREDO, A. D. de; Concreto com Fibras de Aço. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC-USP. Tese de Doutorado. São Paulo, 2000.
- [20] FUSCO, P. B. Tecnologia do Concreto Estrutural – Tópicos Aplicados. São Paulo, PINI, 2008.
- [21] GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; SILVA JR, W. L. A. Variabilidade do ensaio de flexão em vigas de concreto reforçado com fibras de aço. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Bento Gonçalves – RS, 2007.
- [22] HOLANDA, K. M. A.; PINHEIRO, L. M. Desempenho estrutural de concretos reforçados com fibras. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Foz do Iguaçu – PR, 2001.
- [23] ISAIA, G. C. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 1 e 2. São Paulo, IBRACON, 2005.
- [24] MAGALHÃES, F. C.; Estudo probabilístico da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão dos concretos utilizados na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande, no superporto, em Rio Grande-RS. Universidade Federal do Rio Grande, FURG. Dissertação de Mestrado. Rio Grande, 2009.
- [25] MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, PINI, 1994.
- [26] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. Tradução Salvador E. Giannusso, 2ª ed. São Paulo, PINI, 1997.
- [27] PEREIRA, M. da S. Controle da resistência do concreto: Paradigmas e variabilidades - Estudo de Caso. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, UnB. Dissertação de Mestrado. Brasília-DF.
- [28] SILVA, E. F.; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, M. O. F. Resistências à tração por compressão diametral e por flexão de prismas em concretos de alto desempenho. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Foz do Iguaçu – PR, 2001.
- [29] SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Comportamento da Relação da Resistência a Compressão com a Resistência à Tração e com o Módulo de Elasticidade em Concreto com Metacaulim de Alta Reatividade, Proveniente de Rejeito Industrial. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais, Rio de Janeiro - RJ, 2006.