

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS AO CONCRETO QUANTO AO INGRESSO DE ÍONS CLORETO

CLÁUDIO H. A. F. PEREIRA<sup>1</sup>, ENIO J. P. FIGUEIREDO<sup>2</sup> e ELTON BAUER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil – UnB – claudiopereira@unb.br

<sup>2</sup>Professor do Curso de Mestrado em Construção Civil – UFG; Doutor em Engenharia Civil – epazini@ecc.ufg.br

<sup>3</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil – UnB; Doutor em Engenharia Civil – elbauer@terra.com.br

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência do tipo e do teor de fibras sintéticas sobre a capacidade de proteção contra o ingresso de agentes deletérios no concreto. Seu efeito na durabilidade foi estudado através do ensaio de resistência à penetração de cloretos. Para a determinação da resistência à compressão e da absorção de água, foram utilizadas como parâmetros de controle a caracterização e a avaliação da influência das fibras. Entre as conclusões, verificou-se que o método adotado mostrou-se adequado para a avaliação do ingresso de íons agressivos nos compósitos, apresentando resultados que indicam que a adição de fibras proporcionou uma redução no tempo de ingresso de íons agressivos, e de modo geral, reduz o desempenho destes compósitos no que diz respeito a resistência à compressão e ao ingresso de água e cloretos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto, fibras sintéticas, náilon, polipropileno, íons cloreto.

## 1 – INTRODUÇÃO

Conforme Accetti e Pinheiro [1], no início dos anos 60 desenvolveram-se materiais reforçados com fibras, que receberam novas aplicações, implementando o mercado com uma grande variedade de fibras e de novos materiais. Com esse crescimento, várias aplicações inéditas foram identificadas, entre as quais podemos citar a tentativa de utilizar monofilamentos de náilon cortados para construção de estruturas resistentes a explosões. No final 1965, a Shell Chemical iniciou testes para produção de fibras de polipropileno em forma de filmes fibrilados picotados[19], e em 1966 patenteou o processo de fabricação e o compósito “Caricrete”, designação dada ao concreto contendo estas fibras.

Conforme Tezuka [16], em meados de 1971, depois de inúmeros experimentos com materiais sintéticos, surgiram nos Estados Unidos os primeiros estudos sistemáticos dirigidos para possíveis aplicações e utilizações comerciais do concreto reforçado com fibras. Investigações similares surgiram, em seguida, na Inglaterra e na Europa ocidental. De acordo com Naaman [12], esses estudos deram início a um melhor entendimento da mecânica do reforço com fibras (mecânica do compósito, da fratura e do dano), levando à identificação das características desejáveis das fibras para quaisquer aplicações.

Hoje, com o crescimento do interesse no uso do concreto com fibras poliméricas, aumenta a necessidade de aprofundar as pesquisas para a obtenção e ampliação da durabilidade destes compósitos, uma vez que estes materiais têm sido especificados para situações nas quais vêm mostrando desempenho inadequado, levando ao surgimento prematuro de manifestações patológicas.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência do tipo e teor de fibras poliméricas no desempenho do concreto frente ao ingresso de agentes agressivos, relacionando os resultados com a durabilidade destes compósitos. Foram desenvolvidas, adaptadas e aplicadas metodologias de ensaio acelerado de ingresso de cloretos, para verificar a influência destas adições, a fim de suprir as necessidades técnicas, possibilitando um desenvolvimento tecnológico compatível com as aplicações destes compósitos.

## 2 – METODOLOGIA

Como os ensaios para a determinação da durabilidade do concreto ainda não são normalizados, nesta investigação científica adotamos e adaptamos alguns ensaios para verificarmos características ligadas à durabilidade dos concretos com adição de fibras.

Para atingir os objetivos propostos, foi necessário dividir a pesquisa em duas fases distintas. Na primeira fase, foi realizada a caracterização dos materiais empregados na produção dos compósitos, em seguida buscou-se analisar o comportamento mecânico dos concretos com os ensaios de resistência à compressão axial (ABNT – NBR 5739:1980) e resistência à tração por compressão diametral (ABNT – NBR 7222:1982). Na segunda fase, realizou-se o ensaio de resistência à penetração de cloretos, através de ciclos de imersão parcial e secagem.

No intuito de aproximar mais o experimento com a realidade, decidiu-se pela adoção de materiais usualmente encontrados e empregados na construção civil da região de Goiânia – GO.

### 2.1 – Materiais

Como aglomerante hidráulico foi utilizado o cimento CP II-F-32. A análise da amostra foi realizada no

Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas. Na Tabela 1 é apresentada a análise química e na Tabela 2 os resultados da caracterização física do cimento.

TABELA 1 – Caracterização química do cimento CP II-F-32

Composição química do clínquer	Teores (% em massa)
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	18,38
Óxido de cálcio (CaO)	60,13
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,93
Óxido de magnésio (MgO)	4,01
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,56
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,08
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,20
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,01
Perda ao fogo	5,22
Resíduo insolúvel	1,06

TABELA 2 – Caracterização física do cimento CP II-F-32

Ensaio realizado	Resultados
Superfície específica (Blaine)	3404 cm <sup>3</sup> /g
Massa específica	3,09 g/cm <sup>3</sup>
Resíduos na peneira 200 (0,074 mm)	3,0%
Resíduos na peneira 325 (0,045 mm)	14,2%
Início de pega	242 min
Fim de pega	301 min
Expansibilidade a frio	0,2 mm
Resistência à compressão a 1 dia	17,10 MPa
Resistência à compressão aos 3 dias	24,70 MPa
Resistência à compressão aos 7 dias	29,20 MPa
Resistência à compressão aos 28 dias	36,20 MPa

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa para a confecção dos concretos foi areia grossa de origem natural proveniente de um só recebimento vindo de um depósito aluvial, sendo escolhida devido a sua disponibilidade e a atender requisitos granulométricos para utilização nesta pesquisa. Na Tabela 3 são apresentadas as características físicas do agregado miúdo.

TABELA 3 – Características físicas do agregado miúdo

Diâmetro máximo (NBR 7217/87)	4,8 mm
Massa específica (NBR 9776/86)	2,61 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária (NBR 7251/82)	1,48 kg/dm <sup>3</sup>
Módulo de finura (NBR 7217/87)	2,95 mm
Inchamento (NBR 6467/87)	34%

O agregado graúdo utilizado foi o micaxisto britado, de origem natural e de fácil obtenção na região, de graduação 1 (diâmetro máximo 19 mm) de acordo com a composição granulométrica estabelecida pela ABNT – NBR 7211:1983, atendendo as necessidades de compatibilidade das condições de trabalho, espaçamento das armaduras e dimensões das peças desta pesquisa. Na Tabela 4 são apresentadas as características físicas do agregado graúdo.

TABELA 4 – Características físicas do agregado graúdo usado

Diâmetro máximo (NBR 7217/87)	19 mm
Massa específica (NBR 9776/86)	2,77 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária (NBR 7251/82)	1,55 kg/dm <sup>3</sup>
Módulo de finura (NBR 7217/87)	6,62 mm

Na confecção dos concretos, foi utilizada água potável proveniente da rede pública de abastecimento.

Para a confecção das armaduras de alguns corpos-de-prova, foram usadas barras de aço do tipo CA-50 com diâmetro nominal de 10 mm aplicadas longitudinalmente nas armaduras e barras de aço do tipo CA-60 com diâmetro nominal de 4,2 mm para a confecção dos estribos ou barras dobradas (barras verticais da armadura) e arame recozido nas amarrações das barras aos estribos das armaduras, todos de uso destinado para construção civil, produzidos de acordo com as especificações da ABNT – NBR 7480:1996.

Foram utilizados três tipos de fibras: náilon 6.6, polipropileno monofiladas e polipropileno fibriladas, com 20 mm de comprimento. As características destas fibras podem ser vistas na Tabela 5.

TABELA 5 – Comparativo das fibras adotadas

Propriedades	Náilon 6.6	Polipropileno monofilamento	Polipropileno fibrilada
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	1,14	0,90	0,91
Diâmetro (μ)	18	20	18
Comprimento (mm)	20	20	20
Área específica (m <sup>2</sup> /Kg)	*	> 255	255
Alongamento (%)	45-95	28	45-95
Resistência à tração (MPa)	900	700	320-450
Absorção de água (%)	4,5	0	0

\* Não especificado pelo fabricante.

## 2.2 – Produção dos compósitos

Nesta pesquisa, o estudo da dosagem foi realizado com a finalidade de determinar uma porção ideal de materiais, atendendo as necessidades do concreto desejado. Esta dosagem seguiu a orientação básica do “American Concrete Institute” adaptada por Alves [2], por se mostrar eficiente quando se empregam os materiais da região. Os concretos foram dosados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

O resultado da dosagem experimental foi um concreto com traço unitário em massa de 1,00: 2,05: 3,25: 0,60 (cimento; areia; brita; água), com um consumo de cimento de 338,33 kg/m<sup>3</sup> e teor de argamassa de 60,20%.

As fibras de náilon e polipropileno foram adicionadas ao concreto no teor de 0,1% em função do volume de concreto. As fibras de polipropileno fibrilada, por ser esse material mais utilizado e pesquisado, foram adicionadas nos teores de 0,1%; 0,6% e 1,2% em função do volume de concreto. Na Tabela 6 são mostrados os traços usados nesta pesquisa.

TABELA 6 – Traços empregados na pesquisa

Traço	Fibras	Volume (litros)	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )
Referência	-	-	-
01	Náilon 6.6	1,00	1,14
02	Polipropileno monofiladas	1,00	0,90
03	Polipropileno fibriladas	1,00	0,91
04	Polipropileno fibriladas	6,00	5,46
05	Polipropileno fibriladas	12,00	10,92

## 2.3 – Corpos-de-prova utilizados na pesquisa

Os tipos de corpos-de-prova utilizados foram:

Prismáticos, com dimensões de 20 cm de altura por 20 cm de largura por 30 cm de comprimento, destinados a ensaio de corrosão.

Cilíndricos, com dimensão de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, moldados de acordo com a ABNT-NBR 7215:1991, utilizados no ensaio de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral.

O modelo do corpo-de-prova adotado para o ensaio de resistência à penetração de cloretos reproduz uma peça de concreto armado comumente encontrada, cujas dimensões foram definidas em função do sensor do equipamento utilizado para realizar as medidas eletroquímicas, que fica em contato com a superfície do corpo-de-prova. Com essa geometria foi possível obter três faces distintas para acompanhamento. As duas faces laterais serviram para acompanhamento das medidas eletroquímicas e a face inferior para prováveis comprovações, tendo em vista a heterogeneidade do concreto.

As armaduras empregadas neste tipo de corpo-de-prova não receberam nenhum tipo de tratamento ou proteção superficial. Esta armadura foi formada por quatro segmentos de barras de aço CA 50, com diâmetro nominal de 10 mm, três barras cortadas com dimensão final de 25 cm e uma com dimensão final de 35 cm, dos quais 12,5 cm ficam expostos para contato eletrolítico. Devido a esta exposição, foram realizadas proteções com fita isolante de alta tensão na região de interface entre o concreto e o meio externo, para evitar influência de agentes agressivos, como aeração diferencial ou carbonatação. As barras de aço longitudinais eram envolvidas por dois estribos de aço CA 60, de 4,2 mm, espaçados de 20 cm, dobrados em forma de quadrado, para que cada barra de aço ficasse centralizada em uma das faces do prisma, e unidas por amarrações utilizando arame recozido.

O revestimento adotado foi de 2,5 cm, como recomenda o item 6.3.3.1-b da ABNT – NBR 6118:1978 para estruturas de concreto armado aparente em ambiente externo. Adotou-se este revestimento também devido à diminuição do tempo de ingresso dos agentes despассивadores da armadura, acelerando, assim, o processo de corrosão.

Para obter uniformidade deste revestimento, foram utilizados espaçadores plásticos, evitando também o aparecimento de regiões porosas próximas às superfícies dos prismas, causadas por espaçadores de argamassa de cimento e areia ou outros materiais inadequados para esse uso. A Figura 1 apresenta o corpo-de-prova utilizado para o ensaio de resistência à penetração de cloretos.

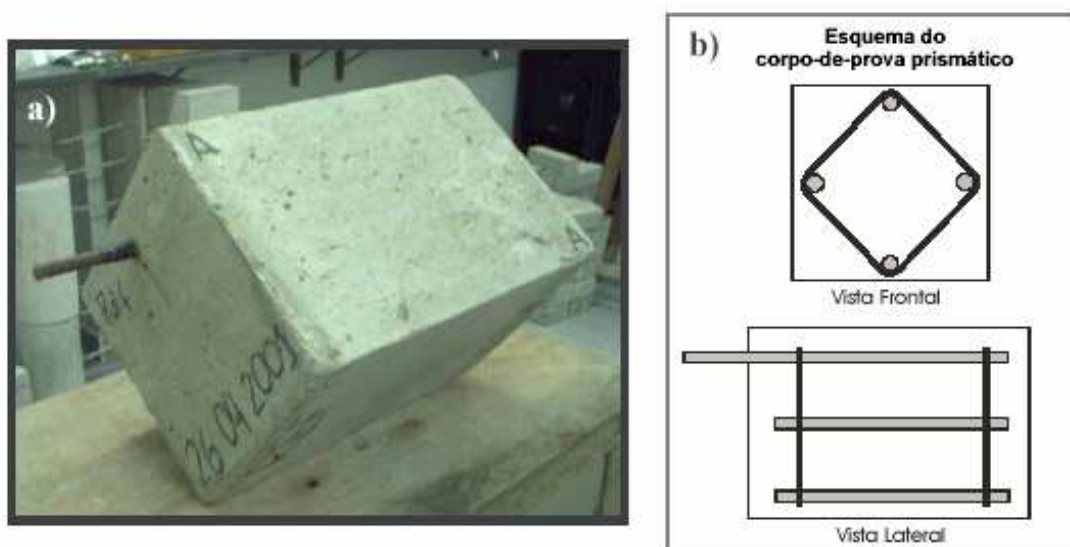


FIGURA 1 – (a) corpo-de-prova prismático com armadura usado para o ensaio de corrosão; (b) esquema do corpo-de-prova

Depois da moldagem, todos os corpos-de-prova foram cobertos com filme plástico para evitar a perda de água, levados para câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de  $23 \pm 2$  °C, de acordo com as recomendações da ABNT – NBR 9479:1986, e desenformados depois de 24 horas, permanecendo neste ambiente até a data dos ensaios.

Após sete dias de cura em câmara úmida, os corpos-de-prova prismáticos foram acondicionados em sala com temperatura de  $25 \pm 5$  °C e umidade relativa de  $50 \pm 10$  %.

### 3 – ENSAIOS COMPLEMENTARES

#### 3.1 – Resistência à compressão axial

Este ensaio foi realizado conforme a ABNT – NBR 5739:1980. Para cada variável foram ensaiados nove corpos-de-prova: três aos 7 dias, três aos 28 dias e três aos 91 dias.

#### 3.2 – Ensaio de determinação da absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção de água foram realizados de acordo com a ABNT – NBR 9778:1986, aos 91 dias de idade.

### 4 – ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO POR EFEITO DE CLORETOS

Este ensaio foi realizado com intuito de avaliar a resistência dos compósitos ao ingresso dos íons cloretos, como também verificar o processo de iniciação da despassivação da armadura devido à corrosão.

As alterações produzidas pela ação dos íons cloretos nas armaduras foram monitoradas através da aplicação das técnicas eletroquímicas realizadas com o GECOR 6 fabricado pela James Instruments. Este aparelho mede a intensidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) de uma armadura contida no concreto, baseado na técnica de resistência de polarização ou polarização linear. Fornece também o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e a resistência elétrica ( $R_{ohm}$ ).

As grandezas medidas neste estudo, através dos ensaios eletroquímicos com o GECOR 6, foram:

Intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ );

Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ );

Essas técnicas são consideradas não-destrutivas, tendo em vista que a corrente aplicada pelo equipamento é pequena e a estrutura não precisa ser fisicamente danificada para a avaliação.

Estas grandezas foram medidas diariamente a partir dos sete dias até os 28 dias. Após esta idade as medidas foram tomadas duas vezes por semana, até o início dos ciclos alternados de imersão e secagem.

Durante a primeira etapa deste ensaio, foi realizado acompanhamento do estado passivo da armadura através das medidas de intensidade de corrosão ( $I_{corr}$ ) e do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).

Na segunda etapa deste estudo, a aceleração intencional da deterioração foi concebida pelo ingresso de cloretos através de ciclos de imersão e secagem, iniciados após a constatação da formação da camada de passividade das barras de aço. Para o início dos ciclos, adotou-se a idade de referência de 91 dias.

Cada ciclo teve duração de uma semana, iniciando com imersão parcial dos corpos-de-prova, por dois dias, em um recipiente com solução de cloreto com concentração de 1% a partir do cloreto de sódio (NaCl), e depois permaneciam secando durante cinco dias. Nessa etapa o acompanhamento eletroquímico era feito ao final de cada semiciclo.

Na condição de imersão parcial, manteve-se o nível da solução no recipiente em uma posição correspondente a dois terços da altura do corpo-de-prova. Nesta condição, segundo Bauer et al. [6], ocorre a absorção capilar, e quando estiver saturado tem-se o processo de difusão de cloretos, ocorrendo evaporação nas superfícies expostas ao ar face ao fluxo de solução pelos poros.

A solução foi trocada a cada quinze dias, a fim de não alterar a concentração de cloreto de sódio causada pela evaporação da água.

A condição de secagem consistia em manter as amostras acondicionadas em ambiente com  $25 \pm 5$  °C de temperatura e  $50 \pm 10$  % de umidade relativa. Sua maior duração (cinco dias) deveu-se à dificuldade apresentada pelos materiais em perder umidade nestas condições.

Estes ciclos foram repetidos até os corpos-de-prova completarem a idade de 170 dias de moldados, em que se constataram modificações apreciáveis nos valores obtidos.

### 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

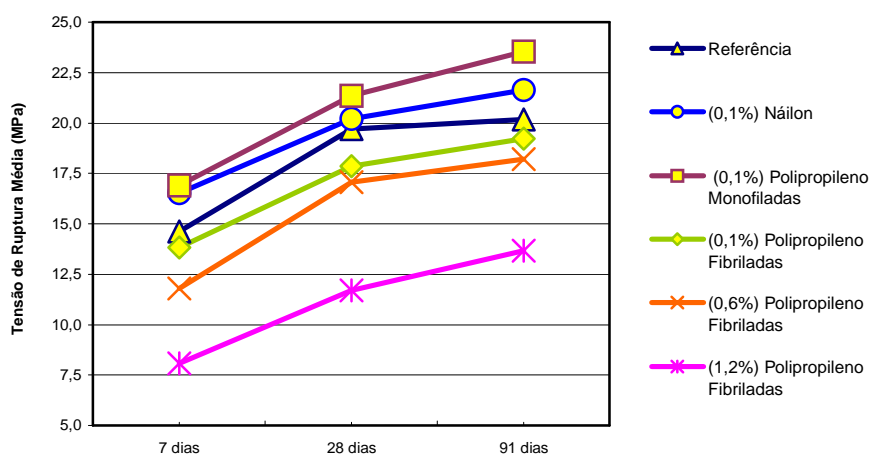
#### 5.1 – Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial são apresentados na Tabela 7 e no Gráfico 1.

TABELA 7 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial

Amostra	Tensão média (MPa)		
	7 dias	28 dias	91 dias
Referência	14,60	19,76	20,18
Náilon 6.6 (0,1%)	16,53	20,30	21,63
Polipropileno monofiladas (0,1%)	16,90	21,34	23,55
Polipropileno fibriladas (0,1%)	13,81	17,84	19,22
Polipropileno fibriladas (0,6%)	11,79	17,07	18,20
Polipropileno fibriladas (1,2%)	8,07	11,60	13,66

GRÁFICO 1 – Comparativo entre a resistência à compressão dos diversos compósitos



Nota-se, no Gráfico 1, que os concretos com adição de fibras poliméricas de náilon e de polipropileno monofiladas apresentam um aumento gradativo da resistência à compressão, em relação ao concreto de referência, conforme a idade de ensaio, porém os concretos com a adição de fibras de polipropileno fibriladas em todos os teores tiveram reduções na resistência à compressão. Pode observar que esta queda de resistência torna-se mais significativa conforme se eleva o teor de adição destas fibras ao concreto, ou seja, o aumento no teor não correspondeu a aumento no desempenho.

A fibra de polipropileno monofilada se destaca das demais fibras poliméricas empregadas neste estudo como a que obteve melhor resultado, apresentando aumento de 16,7% em relação ao concreto de referência aos 91 dias. O concreto com 1,2% de adição de fibras de polipropileno fibriladas teve o pior resultado: apenas 58,7% da resistência do concreto de referência aos 28 dias.

## 5.2 – Ensaio de determinação da absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água foi realizado aos 91 dias de idade. Os valores de absorção de água dos materiais avaliados, expressos em porcentagem, são mostrados na Tabela 8.

TABELA 8 – Resultado do ensaio de determinação da absorção de água

Amostra	Absorção (%)
Referência	6,3
Náilon 6.6 (0,1%)	5,9
Polipropileno monofiladas (0,1%)	6,2
Polipropileno fibriladas (0,1%)	6,0
Polipropileno fibriladas (0,6%)	6,8
Polipropileno fibriladas (1,2%)	6,5

Observa-se nos valores apresentados na Tabela 8 que os compósitos com 0,1% de adição de qualquer uma das fibras empregadas nesta pesquisa tiveram resultados, apesar de muito próximos, melhores do que o concreto de referência, sendo o compósito com fibras de náilon o que apresentou um menor índice de absorção de água em relação ao concreto de referência, embora muito próximo. Este fato pode, provavelmente, ser atribuído à interrupção da interligação da rede de poros dos concretos pelas fibras, que neste caso atuaram como barreira.

Os resultados de absorção de água, no que se refere ao efeito barreira propiciado pela adição de fibras, dão razões para que se espere uma maior resistência à penetração de íons cloretos e de gases como o dióxido de carbono e o oxigênio.

Os compósitos com fibra de polipropileno fibrilada adicionada nos teores de 0,6 e 1,2% apresentaram índices de absorção superiores aos verificados no concreto de referência. Este fato pode estar associado ao teor de argamassa do traço utilizado, que, para estes teores, provavelmente foi insuficiente para envolver os agregados e as fibras, ocasionando uma produção maior de poros abertos e vazios interconectados nestes compósitos.

Na superfície destes compósitos foi observada a presença de poros, também conhecida como porosidade superficial aberta, que não permite a penetração dos agentes agressivos ao interior do concreto mas pode promover um acréscimo na absorção total.

O compósito com 0,6% de adição de fibras de polipropileno fibriladas obteve o maior índice de absorção de água do ensaio, superando em 8% o índice de absorção de água do concreto de referência.

Tanesi [15] realizou ensaio de absorção de água por capilaridade e observou que a adição de 0,1% de fibra de polipropileno fibrilada não apresentou influência sobre a absorção de água, acreditando ser um indicativo de que não há diminuição da microfissuração com a adição de fibras em baixos teores.

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, com os teores de 0,1%, 0,6% e 1,2% do mesmo tipo de fibra, o aumento do teor de adição pode ser prejudicial ao desempenho do concreto no que tange à absorção de água.

Nesta pesquisa os resultados da determinação de absorção da água dos compósitos estudados não se mostraram totalmente coerentes com os da resistência à compressão, contrariando o esperado, pois acreditava-se na existência de uma relação inversa entre a resistência à compressão do concreto e a sua absorção. A partir desta observação e dos resultados obtidos, julga-se que a adição de fibra pode interferir nessas propriedades, diferenciando o comportamento dos compósitos do comportamento do concreto convencional.

De acordo com Andrade [4], a determinação das condições da superfície do concreto pelo ensaio de absorção apresenta vantagens, pois fornece resultados em curto período de tempo, sendo um importante indicativo da durabilidade do concreto, servindo como subsídio para a análise dos resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência à penetração de cloretos.

### 5.3 – Ensaio acelerado de corrosão por efeito de cloretos

Este ensaio teve como objetivo a avaliação da resistência dos compósitos com fibras poliméricas à penetração dos íons cloretos, estimando a capacidade dos compósitos de aumentar o tempo de iniciação da corrosão da armadura e de controlar a propagação do fenômeno.

De acordo com Andrade e González [5], a determinação da intensidade ou velocidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) é realizada mediante a aplicação de uma variação de potencial de  $\pm 10$  mV em torno do potencial de equilíbrio da armadura e a medição da variação da intensidade de corrente correspondente. Conforme Figueiredo et al. [9], a intensidade de corrosão medida indica a quantidade de aço que está sendo transformado em produtos de corrosão no momento da leitura, expressa em  $\mu A/cm^2$ .

Os critérios de avaliação da velocidade de corrosão adotados para determinar o grau de deterioração e a importância do ataque, propostos por Alonso e Andrade [3], são mostrados na Tabela 9.

TABELA 9 - Critérios de avaliação da velocidade de corrosão (Alonso e Andrade, 1990)

Grau de corrosão	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )
Desprezível	0,1 a 0,2
Início de corrosão ativa	> 0,2
Ataque importante mas não severo	~ 1,0
Ataque muito importante	> 10,0

De acordo com Figueiredo [8] e Castro [7], a medida do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) da armadura consiste na determinação da diferença de potencial elétrico entre a armadura de aço e um eletrodo de referência, que é colocado em contato com a superfície do concreto, ou seja, mede-se a atividade elétrica do processo corrosivo.

Na Tabela 10 são apresentadas correlações entre intervalos de diferença de potencial, em relação a um eletrodo de referência de Cu/Su4Cu, e a probabilidade de corrosão mostrada na ASTM C-876:1991. Esses

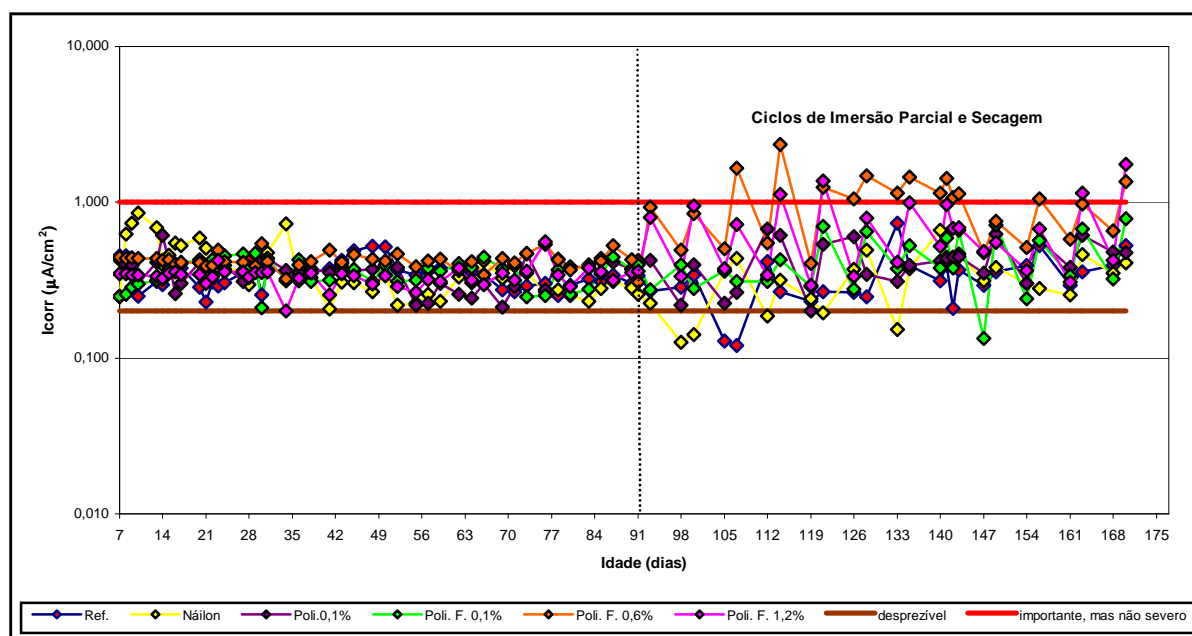
critérios foram adotados para avaliar os resultados das medidas de potenciais e identificar o momento do início da corrosão significativa.

TABELA 10 – Critérios da avaliação da corrosão através de medidas de potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876:1991

$E_{corr}$ (mV, Cu/SO4Cu)	Probabilidade de corrosão
> -200	< 5%
Entre -200 e -350	50%
< -350	> 95%

Os registros dos parâmetros eletroquímicos foram feitos até os 171 dias de idade para todos os corpos-de-prova deste ensaio. O Gráfico 2 apresenta os resultados das medidas da intensidade de corrosão obtidos nos mesmos corpos-de-prova. Como os valores da intensidade de corrosão das armaduras se mostraram muito próximos nas duas faces de leitura de cada corpo-de-prova durante toda a duração do ensaio, optou-se por mostrar apenas os resultados médios das duas faces de cada corpo-de-prova.

GRÁFICO 2 – Resultados do  $I_{corr}$



Analisando o gráfico acima, pode-se observar que a presença da camada passivante que protege a armadura contra a corrosão não se mostrou evidente para o concreto de referência, nem para os compósitos, assim como mostrou no potencial de corrosão. Porém, a partir dos 35 dias de idade, observou-se constância nos resultados, caracterizando estabilidade no sistema.

No presente trabalho, as armaduras não tiveram as suas superfícies limpas por nenhum processo químico ou físico antes da concretagem. Tal fato pode explicar o não-aparecimento de valores inferiores a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , até a idade de início dos ciclos de imersão parcial e secagem. Neste caso, conforme Page et al. [13] e Figueiredo e Andrade [9], o tempo para que ocorra a formação da camada passivante é maior, uma vez que antes deve ocorrer, ainda, a dissolução da camada de óxidos previamente depositada sobre a armadura.

Após os 91 dias, quando se iniciaram os ciclos de imersão e secagem, os resultados obtidos caracterizam mudança no comportamento das armaduras dos corpos-de-prova. De acordo com os resultados mostrados nas figuras anteriores, os materiais pesquisados podem ser classificados em três grupos.

No primeiro grupo estão os materiais que tenderam, no início dos ciclos de imersão parcial e secagem, a um grau de corrosão “desprezível” e, ao fim do ensaio, encontravam-se com um grau de corrosão classificado como “início de corrosão ativa”, caso do concreto de referência e do compósito com 0,1% de fibras de náilon.

O segundo grupo é representado pelos concretos que permaneceram com grau de corrosão entre a classificação de “início de corrosão ativa” e “ataque importante mas não severo”, como foi o caso dos compósitos com adição de 0,1% de fibras de polipropileno monofiladas e com 0,1% de adição de fibras de



polipropileno fibriladas.

Por fim, o grupo que apresentou valores de grau de corrosão que indicavam, desde o início dos ciclos, “ataque importante mas não severo”, o qual incluía os compósitos com adição de 0,6% e 1,2% de fibras de polipropileno fibriladas.

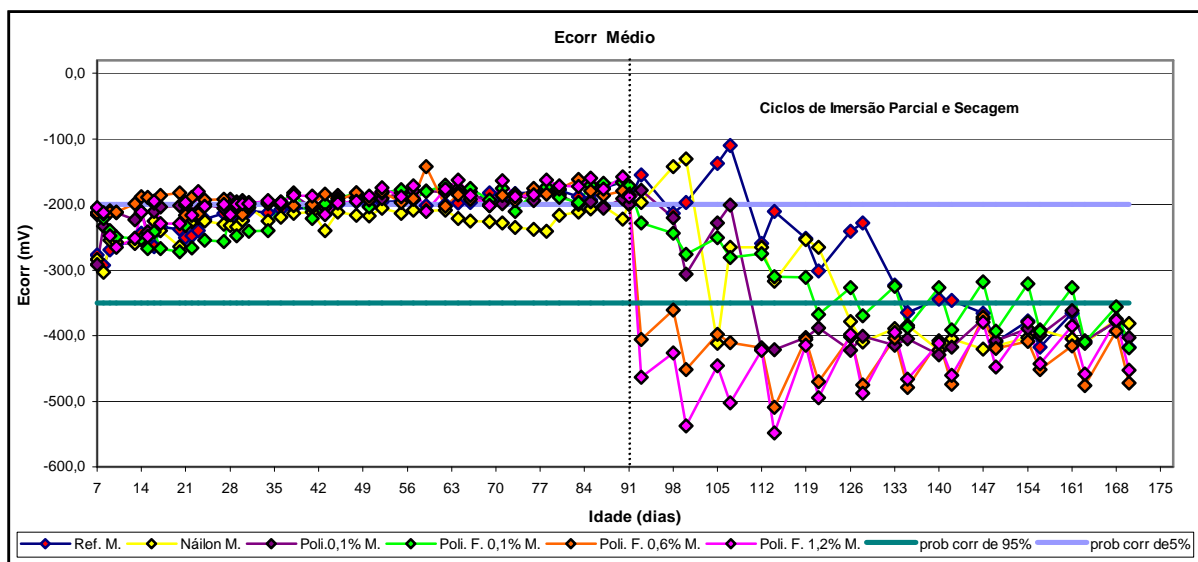
Nesta pesquisa, por meio do ensaio de resistência à penetração de cloretos foi observado que a adição de fibras ao concreto facilitou o ingresso de íons cloreto, o que pode ter sido causado pela formação de um caminho preferencial para o ingresso desse agente deletério.

Zoltanetzky et al. [18] observaram que a adição de fibras de polipropileno não previne a corrosão do aço do concreto armado e provavelmente não reduz os efeitos da corrosão nas armaduras de concreto. Sanjuán et al. [14], em pesquisa empregando técnicas eletroquímicas, afirmaram não existir uma correlação clara entre o efeito de controle de fissuras através de adição de fibras de polipropileno e a corrosão das armaduras.

Toutanji et al. [17] verificaram que a adição de fibras de polipropileno fibriladas ao concreto aumentava a permeabilidade do concreto aos cloretos. Os mesmos autores também verificaram que a redução do comprimento das fibras de 19 mm para 12,5 mm, mantendo-se a mesma quantidade em volume, provocou diminuição dessa permeabilidade. Glasset [11] denomina esse efeito causado pela dimensão das fibras como “efeito escala”, e diz que as fibras adicionadas ao concreto armado podem formar um caminho preferencial para o avanço da corrosão, e estes caminhos diminuem conforme se reduz o comprimento ou o diâmetro da fibra.

O Gráfico 3 apresenta os resultados do potencial de corrosão obtidos pela média das duas faces dos corpos-de-prova utilizadas para medição.

GRÁFICO 3 – resultados do Ecorr



A partir do Gráfico 3 observa-se que aos 42 dias, a armadura protegida pelo concreto de referência apresentou resultados de potencial característicos do estado de passivação. Com o início dos ciclos de imersão e secagem, o concreto de referência apresentou, após o primeiro ciclo, uma tendência de aumento dos valores de potencial, mas, logo em seguida passou para a zona de probabilidade de corrosão de 50%. Contudo, no sexto ciclo ocorreu a desp passivação da armadura, passando para a zona onde a probabilidade de corrosão é maior que 95%, conforme parâmetros apresentados na Tabela 10. A partir do oitavo ciclo, o potencial estabilizou-se na mesma zona.

O compósito com adição de 0,1% de fibras de náilon, durante o período que antecedeu o ataque por cloretos, apresentou valores de potencial de corrosão que indicaram probabilidade de corrosão menor que 5%. Os valores obtidos tendiam à estabilidade, indicando que estava o processo de formação da camada de passividade estava ocorrendo. No primeiro ciclo, este compósito apresentou valor superior a -200 mV; já no terceiro ciclo, apresentou nas duas faces valores menores que -350 mV, mostrando probabilidade de corrosão maior que 95%. Logo em seguida, seus valores voltaram à zona de 50% de probabilidade de corrosão, permanecendo nesta condição até o quinto ciclo. Após os 126 dias, o compósito com fibras de náilon registrou valores inferiores a -325 mV, permanecendo na zona de probabilidade de corrosão de 95% até o fim do ensaio.

O potencial de corrosão no compósito com adição de 0,1% de fibras de polipropileno monofiladas, durante o período em que esteve acondicionado em ambiente com  $25 \pm 5$  °C de temperatura e  $50 \pm 10\%$  de umidade

relativa, apresentou valores muito próximos e maiores de  $-200$  mV, como mostra o gráfico 3, indicando a passivação da armadura. Em seu segundo ciclo, registraram-se valores indicativos de probabilidade de corrosão maior que 95%. Apenas no quarto ciclo o potencial estabilizou-se, apresentando valores inferiores a  $-350$  mV, permanecendo nessa região até o final do ensaio.

O comportamento do compósito com adição de 0,1% de fibras de polipropileno fibriladas, durante a segunda parte do ensaio, logo após o primeiro ciclo, apresentou valores de potencial de corrosão que indicavam probabilidade de corrosão de 50%, permanecendo nesta região até o seu quarto ciclo, a partir do qual se registraram valores que intercalavam a faixa de probabilidade de 50% e a faixa onde a probabilidade de corrosão é maior que 95%. Quando alcançou a idade de 175 dias, os valores obtidos passaram a ser inferiores a  $-350$ mV, permanecendo assim até o término do ensaio.

O compósito com adição de 0,6% de fibras de polipropileno fibriladas, com o início dos ciclos de imersão parcial e secagem, sofreu uma queda brusca nos valores de potencial de corrosão. Logo após a primeira imersão, os valores obtidos ultrapassaram o limite de  $-350$  mV. Os valores deste compósito mantiveram-se, até o fim do ensaio, na região que indicava probabilidade de corrosão maior que 95%.

O compósito com adição de 1,2% de fibras de polipropileno fibriladas, como pode ser constatado neste gráfico logo no primeiro ciclo de imersão e secagem, registrou uma queda brusca do potencial de corrosão, atingindo valores que indicam probabilidade de corrosão maior que 95%. Durante os demais ciclos, o Ecorr permaneceu na mesma zona. Os valores de potencial de corrosão mais negativos foram apresentados por este compósito.

Os potenciais de corrosão mostrados no Gráfico 3 demonstram que, durante a primeira parte do ensaio, os concretos estudados, com exceção do compósito com adição de 0,1% de fibras de náilon, o qual assumiu valores muito próximos de  $-200$  mV, apresentaram valores indicativos de passividade antes do início dos ciclos de imersão e secagem.

O melhor desempenho demonstrado neste ensaio foi o do concreto de referência, e o pior foi o do compósito com adição de 1,2% de fibras de polipropileno fibriladas.

De maneira geral, foi observado que as duas faces dos corpos-de-prova tiveram comportamentos semelhantes, apresentando sempre valores muito próximos.

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização desta pesquisa, pode-se observar algumas mudanças no comportamento dos concretos com adição de fibras poliméricas. No que diz respeito à resistência mecânica, as alterações causadas pelas adições de teores de 0,1% não exprimem com clareza a interferência causada pelas fibras. Com teores de 0,6 e 1,2% de adição de fibras de polipropileno fibriladas, observaram-se algumas alterações que causaram pequenas mudanças no comportamento mecânico do concreto. Esses resultados comprovam que as fibras poliméricas não devem ser utilizadas como reforço estrutural.

O ensaio acelerado de corrosão por efeito de cloretos mostrou alterações nos concretos estudados. Pode-se observar que os compósitos apresentam maior facilidade para o ingresso de íons cloreto, quando comparados ao concreto de referência, ou seja, o tempo de ingresso de íons cloreto foi bem menor do que o do concreto sem fibras. Esta facilidade pode ser explicada pela alteração na microestrutura destes concretos, causada pelas adições de fibras, pois o íon penetra no concreto por meio de um caminho preferencial criado pela zona de transição entre a fibra e a matriz. Esta interface é mais porosa e por isso facilita o ingresso de agentes deletérios.

Outra consideração que pode ser feita a respeito destas adições utilizadas é que o volume de fibras adicionado aparentemente exerce maior influência na durabilidade, testada no ensaio acelerado de corrosão por efeito de cloretos, do que o tipo de fibra empregada.

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa, aconselha-se adotar alguns critérios ao especificar o uso de concretos com fibras poliméricas, levando em conta o aumento da possibilidade de ingresso de agentes agressivos observado neste estudo.

O emprego destes compósitos deve ser restrito a locais de baixa agressividade, onde se pretende obter, como resultado final, a inibição do aparecimento e a propagação de fissuras causadas por retrações plásticas ou hidráulicas e conseqüentemente uma melhora na qualidade final da obra, neste sentido.

## REFERÊNCIAS

1. ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, L. M. Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42. *Anais...* Fortaleza, ago. 2000.
2. ALVES, J. D. *Manual de tecnologia do concreto*. 3. ed. Goiânia: Ed. da UFG, 1993.
3. ALONSO, C.; ANDRADE, C. Effect of nitrite as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars. *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 2., p. 130-137, Mar./Apr. 1990.

4. ANDRADE, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Trad. de Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992.
5. ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. *Informes de la Construcción*, v. 40, n. 211, p. 7-14, nov./dic. 1988.
6. BAUER, E.; NEPOMUCENO, A.; LINS, V. F. C. Emprego de técnicas eletroquímicas no estudo da corrosão das armaduras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO (CBC), 5. *Anais...* 1999.
7. CASTRO, P. et al. *Corrosión en estructuras de concreto armado: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C., 1998.
8. FIGUEIREDO, E. J. P. *Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado*. São Paulo, 1994. 423 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
9. FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRADE, C. Protection corrosion mechanisms involved in repair systems with surface coatings on reinforced cement. In: SILVA-ARAYA, Walter (ed.). *Repair and rehabilitation of reinforced concrete structures: the state of the art*. ASCE, 1997. p. 224-238.
10. FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRADE, C.; HELENE, P. R. L. *Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura de concreto*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 1993 (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC121).
11. GLASSER, F. P. Cements from micro to macrostructures. *Br. Ceram. Trans. Journal*, v. 89, n. 6, p. 195-202, 1990.
12. NAAMAN, A. E. Fiber reinforcement for concrete. *Concrete International*, v. 7, n. 3, p. 21-25, March 1985.
13. PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A.. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 11, p. 395-406, 1981.
14. SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; BENTUR, A. Effect of crack control in mortars containig polypropylene fibers on the corrosion of steel in a cementitious matrix. *ACI Materials Journal*, p. 134-141, Mar.-Apr. 1997.
15. TANESI, J. *A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração*. São Paulo, 1999, Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
16. TEZUKA, Y. *Concreto armado com fibras*. São Paulo: ABCP, 1989.
17. TOUTANGJI, H.; McNEIL, S.; BAYASI, Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced sílica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 7, p. 961-968, 1988.
18. ZOLTANETZKY, P.; PARNES, J.; GORDON, C. The use polypropylene fibers for reducing corrosion in concrete. In: SWAMY, Narayan (ed.). *Corrosion and corrosion protection of steel in concrete*. Sheffield Academic Press, UK, 1994. International conference held at the University of Sheffield.
19. ZONVELD, J. J. Properties and testing of concrete containing fibres other than steel. In: NEVILLE, A. (ed.). *Fibre reinforced cement and concrete*. UK: The Construction Press, 1975, p. 217-226. Proceedings RILEM Conference.