

## Concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô

Concrete with addition of fibers for confection of segmented pre-formed rings for subway tunnel coating

André Róseo de Carvalho<sup>1</sup>, Antonio Eduardo Bezerra Cabral<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, UFC, Fortaleza, CE, Brasil.  
e-mail: andre\_roseo@hotmail.com, eduardo.cabral@ufc.br

---

### RESUMO

No Brasil, a utilização do Concreto Reforçado com Fibra (CRF) está associada a obras de infraestrutura. Este estudo investiga o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras (aço e polipropileno) para confecção de aduelas segmentadas de revestimento de metrô. O objetivo é produzir um concreto com fibras de aço em um teor apropriado para promover um aumento do reforço pós-fissuração do concreto, e fibras de polipropileno em quantidade suficiente para minimizar o risco de fissuração plástica, além de proteger contra danos físicos no caso de ocorrência de incêndios. O programa experimental consistiu em avaliar as propriedades mecânicas da fibra de aço e da fibra de polipropileno no concreto. Foram estudados concretos reforçados com três diferentes teores de fibras de aço (25 kg/m<sup>3</sup>; 35 kg/m<sup>3</sup> e 40 kg/m<sup>3</sup>) para avaliar parâmetros mecânicos de tenacidade, como também, três teores de fibras de polipropileno (0,5 kg/m<sup>3</sup>, 1,0 kg/m<sup>3</sup> e 1,5 kg/m<sup>3</sup>) para avaliar parâmetros mecânicos do concreto submetido a altas temperaturas. Para análise dos resultados utilizou-se de teste estatístico (ANOVA), onde foi demonstrado um ganho de até 12,89% de resistência à compressão à medida que foram adicionadas a fibra de aço, enquanto que, para a tenacidade os resultados revelaram acréscimos de até 108,9% do fator de tenacidade. Quanto à análise do comportamento do concreto frente a altas temperaturas constatou-se que a adoção de fibras de polipropileno atuou de forma eficiente no combate ao *spalling*, contudo provocou uma acentuada redução da resistência residual.

**Palavras-chave:** concreto com fibras; dosagem; túneis; tenacidade.

---

### ABSTRACT

In Brazil, the use of Reinforced Concrete with Fiber (CRF) is associated with infrastructure works. This study investigates the mechanical behavior of fiber reinforced concrete (steel and polypropylene) for the construction of segmented subway flooring staves. The goal is to produce a concrete with steel fibers in a suitable content to promote an increase in the post-cracking reinforcement of the concrete, and polypropylene fibers in sufficient quantity to minimize the risk of plastic cracking, as well as to protect against physical damages in case of occurrence of fires. The experimental program consisted in evaluating the mechanical properties of steel fiber and polypropylene fiber in concrete. Reinforced concretes were studied with three different levels of steel fibers (25 kg / m<sup>3</sup>, 35 kg / m<sup>3</sup> and 40 kg / m<sup>3</sup>) to evaluate mechanical parameters of tenacity, as well as three fiber contents of polypropylene (0.5 kg / m<sup>3</sup>, 1.0 kg / m<sup>3</sup> and 1.5 kg / m<sup>3</sup>) to evaluate mechanical parameters of the concrete subjected to high temperatures. Statistical analysis (ANOVA) was used to analyze the results, where a gain of up to 12.89% of compressive strength was demonstrated as the steel fiber was added, while for the toughness the results showed increases of up to 108.9% of the toughness factor. As for the analysis of the behavior of the concrete against high temperatures, it was observed that the adoption of polypropylene fibers acted efficiently in combating spalling, however, it provoked a marked reduction of residual resistance.

**Keywords:** concrete with fibers; dosage; tunnels; tenacity.

## 1. INTRODUÇÃO

Conforme Figueiredo [1] o cenário brasileiro, utiliza o Concreto Reforçado com Fibras (CRF) basicamente em obras de infraestrutura, onde as fibras utilizadas nos reforços dos concretos podem ser de aço e/ou poliméricas.

A incorporação de fibras no concreto é justificada pelo fato de promover capacidade de reforço através de suas propriedades. As fibras de aço atuam como reforço do concreto endurecido, enquanto que as fibras poliméricas são utilizadas com intuito de minimizar o risco de fissuração plástica, além de proteger contra danos físicos durante incêndios. [2].

Contudo, o estudo do CRF se faz necessário, pois sem uma cuidadosa análise, o CRF pode provocar um aumento no custo unitário e dificultar a mobilidade das partículas maiores reduzindo assim a fluidez do material. Apesar deste fato, para Figueiredo [3] a utilização do CRF ainda é desenvolvida de forma empírica devido à falta de especificações técnicas e normas específicas. Todavia, tem-se na prática a utilização de teores fixos dos teores de fibras, sem o desenvolvimento de uma dosagem com teores mais precisos (otimização).

Apesar do CRF ser utilizado em obras que demandam grandes volumes de concreto, não se tem uma preocupação na definição de teores mais precisos, revelando um descaso em assegurar um comportamento adequado aos requisitos de projeto de forma economicamente viável.

Portanto este trabalho tem como objetivo procurar o teor ótimo de fibras de aço e polipropileno na fabricação de um CRF para uso em aduelas de concreto para revestimento de túnel.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi dividido em duas etapas com intuito de avaliar as propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras de aço e de polipropileno. A primeira etapa consiste em verificar o desempenho da fibra de aço no ganho de tenacidade e a segunda etapa incide na verificação da ocorrência ou não do efeito *spalling* em concreto com adição de fibra de polipropileno submetido a altas temperaturas.

### 2.1 Materiais Utilizados

Para a produção do concreto foi utilizado o cimento Portland do tipo CP V ARI RS da marca MIZU. Na Tabela 1 constam as características físicas e químicas do cimento utilizado.

**Tabela 1:** Caracterização do aglomerante.

PROPRIEDADES FÍSICAS	RESULTADOS	LIMITE	MÉTODO DE ENSAIO	
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	3,0	-	NBR NM 23 [4]	
Pasta de Consistência (%)	32,0	-	NBR NM 43 [5]	
Finura peneira 75 mm	0,94	≤ 6 %	NBR 11.579 [6]	
Tempo de pega (min.)	Início de pega	100 min	≥ 60 min	NBR NM 65 [7]
	Fim de pega	205 min	≤ 600 min	
Expansividade (mm)	a quente	1,30 mm	≤ 5 mm	NBR 11.582 [8]
	a frio	1,00 mm	≤ 5 mm	
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	21,8 MPa	≥ 14 MPa	NBR 7.215 [9]
	3 dias	30,0 MPa	≥ 24 MPa	
	7 dias	36,4 MPa	≥ 34 MPa	
PROPRIEDADES QUÍMICAS	RESULTADOS	LIMITE	MÉTODO DE ENSAIO	
Resíduo Insolúvel (%)	0,97 %	≤ 1 %	NBR NM 15 [10]	
Perda ao fogo (%)	3,98 %	≤ 4,5 %	NBR NM 18 [11]	
Teor de óxido de magnésio (%)	1,36 %	≤ 6,5 %	NBR 6.473 [12]	
Teor de trióxido de enxofre (%)	3,09 %	≤ 3,5%	NBR NM 16 [13]	

O agregado miúdo utilizado foi areia lavada de rio procedente da Mineradora TVJ Ltda do município de Aquiraz - CE. O ensaio de petrografia revelou uma amostra composta basicamente por quartzo (85%),

feldspato (10%) e muscovita (5%). A curva granulométrica referente ao agregado apresenta enquadramento nos limites granulométricos parcialmente dentro da zona ótima, conforme NBR 7.211 [14]. Os demais ensaios encontram-se apresentados na Tabela 2. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará.

**Tabela 2:** Caracterização do agregado miúdo.

ENSAIOS REALIZADOS	RESULTADOS	LIMITE	MÉTODO DE ENSAIO
Granulometria	DMC = 4,75 MF = 2,42	-	NBR NM 248 [15]
Absorção de Água (%)	0,85	-	NBR NM 30 [16]
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,63	-	NBR NM 52 [17]
Massa Unitária no estado solto (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,46	-	NBR NM 45 [18]
Impurezas Orgânicas	Satisfatório	Satisfatório	NBR NM 49 [19]
Argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,3	≤ 3,0%	NBR 7.218 [20]
Teor de material pulverulento (%)	3,4	≤ 5,0%	NBR NM 46 [21]
Teor de cloretos solúveis (%)	0,12	< 0,1%	NBR 9.917 [22]
Teor de sulfatos solúveis (%)	< 0,01	< 0,1%	NBR 9.917 [22]
Inchamento	1,22		NBR 6.467 [23]

Apesar do resultado do teor de cloretos solúveis ter excedido o limite permitido, este agregado foi empregado na confecção dos concretos, pois o teor total de cloretos trazidos por todos os componentes não excedeu 0,40% para concreto armado em condições não severas.

Os agregados graúdos utilizados foram procedentes da pedra NORDBRITA. O ensaio de petrografia revelou uma rocha com textura porfirítica em matriz fanerítica, inequigranular composta basicamente de feldspato potássico (50%), quartzo (36%), biotita (10%) e minerais opacos (4%).

As curvas granulométricas dos agregados graúdos revelaram que a brita tipo zero encontra-se entre as zonas granulométricas para agregados de 4,75/12,5 mm e 9,5/25 mm e a brita denominada tipo 1, esta dentro da zona para agregados de 9,5/25mm.

Os demais resultados dos ensaios encontram-se apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Caracterização do agregado graúdo.

ENSAIOS REALIZADOS	RESULTADOS		LIMITE	MÉTODO DE ENSAIO
	BRITA 0	BRITA 1		
Granulometria	DMC = 12,5 MF = 6,48	DMC = 19 MF = 6,96	-	NBR NM 248 [15]
Absorção de Água (%)	0,80	0,70	-	NBR NM 30 [16]
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,60	2,60	-	NBR NM 53 [24]
Massa Unitária no estado solto (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,35	1,42	-	NBR NM 45 [18]
Massa Unitária no estado compactado (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,48	1,55	-	NBR NM 45 [18]
Argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,00	0,00	≤ 3,0%	NBR 7218 [20]
Teor de material pulverulento (%)	0,63	0,40	≤ 1,0%	NBR NM 46 [21]
Reatividade potencial de álcalis em agregado - Método Acelerado (%)	0,06	0,06	< 0,19%	NBR 15.577-4 [25]
Abrasão Los Angeles (%)	38,80	35,60	≤ 50%	NBR NM 51 [26]
Índice de Forma	2,40	2,20	≤ 3,0	NBR 7809 [27]

As características dos aditivos plastificantes utilizados foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4:** Características dos aditivos utilizados.

SIKA VISCOCRETE 5800 FTN	SIKAMENT RM 300
Aspecto Líquido	Aspecto Líquido
Castanho	Marrom
pH $5,0 \pm 1,0$	pH: $6,0 \pm 1,0$
Densidade: $1,07 \text{ Kg} \pm 0,02 \text{ Kg/litro}$	Densidade: $1,18 \pm 0,02 \text{ Kg/Litro}$

As características das fibras utilizadas no estudo estão explicitadas na Tabela 5. A fibra de polipropileno utilizada é do tipo monofiladas, marca FibroMac® 6 composta por filamentos extremamente finos, produzido através de processo de extrusão. A fibra de aço é da marca Wirand® FF3 e classificada como tipo A (fibra de aço com ancoragens nas extremidades) e Classe I (produzida a partir de aço de baixo teor de carbono, trefilado a frio), conforme NBR 15.530 [28]. As características das fibras foram fornecidas pelo fabricante.

**Tabela 5:** Características das fibras utilizadas.

FIBRA DE AÇO		FIBRA DE POLIPROPILENO	
Resistência à Tração	> 1.100 MPa	Peso Específico	0,91g/cm <sup>3</sup>
Diâmetro Nominal da Fibra (d)	0,75 mm	Ponto de Fusão	160° C
Comprimento Nominal (l)	50 mm	Ponto de Ignição	365° C
Fator de Forma (relação l/d)	67	Comprimento Nominal	6 mm
Unidade/Kg	5.767	Seção	Circular
Módulo Elástico	210.000 MPa	Diâmetro	18µm
		Nº de fibra/Kg	720.000.000
		Resistência à tração	300 MPa
		Módulo de Young	3.000 MPa

## 2.2 Método de pesquisa

Com intuito de avaliar as propriedades mecânicas dos concretos com a adição tanto da fibra de aço quanto da de polipropileno, separadamente, o programa experimental foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu em verificar o desempenho do concreto reforçado com fibra de aço (CRFA) quanto ao ganho de tenacidade por meio do ensaio de flexão em corpos de prova prismáticos. A segunda etapa consistiu em averiguar a ocorrência ou não do efeito *spalling* em corpos de provas cilíndricos produzidos com o concreto reforçado com fibra de polipropileno (CRFP) quando estes foram submetidos a altas temperaturas. O traço do concreto de referência (REF) utilizado no estudo foi adquirido em uma concreteira que comercializa este concreto para a fabricação de aduelas. A partir do concreto de referência (REF) foram adicionadas fibras de aço e fibras de polipropileno resultando nos demais concretos, conforme Tabela 6.

**Tabela 6:** Traços do CRF com diferentes teores de fibras para o estudo.

Materiais (Kg/m <sup>3</sup> )	Concreto de referência REF	Concretos com fibra de aço			Concretos com fibra de polipropileno		
		CRFA25	CRFA35	CRFA40	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Cimento	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0
Areia	728,0	728,0	728,0	728,0	728,0	728,0	728,0
Brita 1	480,5	480,5	480,5	480,5	480,5	480,5	480,5
Brita 0	469,0	469,0	469,0	469,0	469,0	469,0	469,0
Aditivo 1	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93
Aditivo 2	1,20	1,50	1,85	2,14	1,44	1,62	1,83
Água	191,0	191,0	191,0	191,0	191,0	191,0	191,0
Teor de Fibra (Aço)	-	25,0 (0,32%)*	35,0 (0,45%)*	40,0 (0,51%)*	-	-	-
Teor de Fibra (Polipropileno)	-	-	-	-	0,5 (0,06%)*	1,0 (0,11%)*	1,5 (0,17%)*

\* Teor de fibra em volume

Os corpos de prova dos concretos foram denominados seguindo a nomenclatura CRFX<sub>Y</sub>, onde o CRF indica o concreto reforçado com fibras, X o tipo de fibra utilizada (A – fibra aço e P – fibra de polipropileno) e Y o teor de fibra utilizado em kg/m<sup>3</sup>.

Com o intuito de avaliar apenas o teor de fibras, todos os concretos aplicados foram similares (consumo de cimento e teor de argamassa), necessitando ajustar apenas a dosagem de superplastificante em função do teor de fibras, para a obtenção da mesma trabalhabilidade do concreto de referência (*slump* de 140 mm necessário para facilitar a moldagem das aduelas).

O volume de concreto para o traço de referência e cada traço com adição de fibra de aço foi igual a 54 litros por traço, enquanto que para os traços com adição de fibra de polipropileno foi de 32 litros por traço. Na produção foi utilizada uma betoneira de 120 litros de capacidade para misturar a quantidade de concreto por traço.

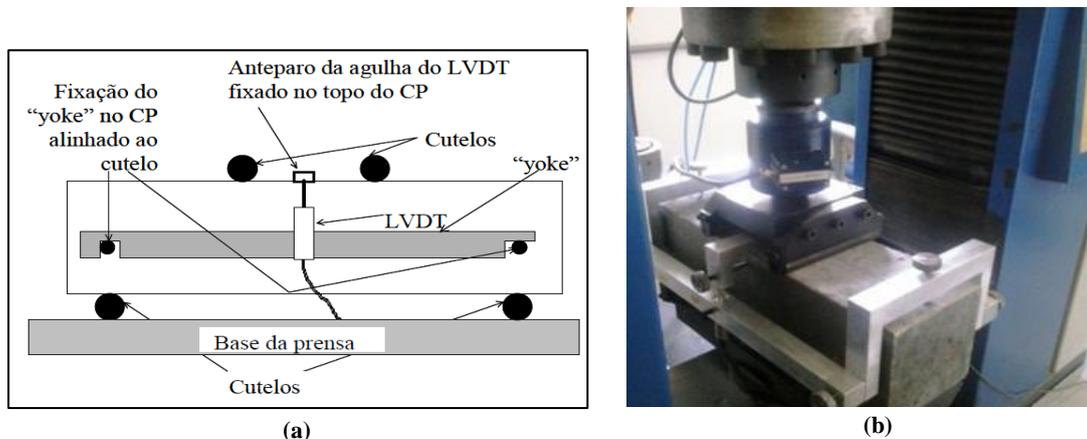
Ao final foram moldados em formas metálicas padronizadas, 84 (oitenta e quatro) corpos-de-prova cilíndricos para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e do método de exposição a altas temperaturas, como também, foram moldados 8 (oito) corpos-de-prova prismáticos para realização do ensaio de tenacidade a flexão, segundo preconiza a JSCE-SF4 [29]. Após 24 horas foram desmoldados e conservados em cura submersa até a realização dos ensaios. Na Tabela 7 encontram-se distribuídos os corpos-de-prova desenvolvidos no estudo.

**Tabela 7:** Distribuição dos corpos-de-prova por ensaios e concreto.

Ensaio	Forma do CP	Dimensões do CP	Nº de CP	
			CRFA	CRFP
Resistência à compressão axial	Cilíndrico	100 mm x 200 mm (diâmetro x altura)	34	34
Exposição a Altas Temperaturas	Cilíndrico	100 mm x 200 mm (diâmetro x altura)	-	16
Tenacidade à Flexão	Prismático	150 mm x 150 mm x 500 mm	8	-

Os ensaios de resistência à compressão axial, exposição a altas temperaturas e ensaio de tenacidade à flexão foram realizados após 28 dias de cura submersa com o propósito de caracterizar o concreto. Tendo em vista que o ensaio de tenacidade à flexão e o método de altas temperaturas não são comuns, decidiu-se por explicá-los mais detalhadamente.

O ensaio de tenacidade à flexão foi desenvolvido conforme orientação da norma japonesa JSCE SF4 [29] por ser notoriamente o mais vantajoso e prático devido utilizar equipamento de sistema aberto (*open loop*), ou seja, o controle é realizado de forma direta pelo deslocamento vertical da prensa da máquina. Os corpos de prova foram marcados e numerados para todos os concretos para facilitar o alinhamento e a colocação do corpo de prova sobre a base da máquina, como também, facilitar a aplicação do dispositivo YOKE. Na realização deste ensaio foi utilizado controle eletrônico de deslocamento por meio de dois transdutores (LVDT) com base de medida de 100 mm e sensibilidade de 0,0001 mm e para obtenção dos dados de força uma célula de carga de 500 KN de sensibilidade de 0,001 KN, conforme Figura 1. A velocidade do ensaio de tenacidade à flexão foi de 0,15 mm/min.



**Figura 1:** Posicionamento do CP, LVDT e cutelos no ensaio, (a) Esquema [1], (b) corpo de prova prismático durante ensaio de Tenacidade à Flexão.

Entretanto para Figueiredo [1], a tenacidade em concreto reforçado com fibras (CRF) refere-se a

“energia absorvida pelo compósito quando carregado, abrangendo a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz, quando as fibras passam a atuar de maneira mais efetiva”, enquanto que, o fator de tenacidade representa a média de carga resistiva pelo CRF após a fissuração da matriz expressa em MPa.

A realização do ensaio ocorreu no Laboratório da Divisão de Materiais (DIMAT) da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC), onde foi utilizada uma máquina eletromecânica servocontrolada EMIC DL 1000 KN.

Para a realização do método de exposição a altas temperaturas foram utilizadas as dependências do Laboratório de Bio-Materiais do Departamento de Materiais da Universidade Federal do Ceará. Os procedimentos foram realizados em conformidade com a metodologia desenvolvida por Lima [30], com intuito de observar a ocorrência ou não do lascamento, bem como para analisar o grau de fissuração.

Foram colocados 16 corpos de prova (4 de cada traço) em um forno elétrico com grande capacidade de aquecimento, cuja temperatura foi elevada a uma taxa constante de 27,4°C/min estando em conformidade com as observações de Anderberg [31] para os 30 primeiros minutos de incêndio da curva de aquecimento padrão ISO 834 [32]. A temperatura máxima atingida foi de 900°C, mantendo-se esta temperatura por um período de 45 minutos e em seguida foram resfriados gradualmente dentro do forno.

Após a realização do procedimento acima descrito os corpos de prova foram avaliados sob os seguintes aspectos: (i) observação das mudanças de coloração e aparecimento de fissuras através de registro fotográfico; (ii) ensaio mecânico de resistência à compressão (antes e depois da exposição a altas temperaturas); (iii) análise do lascamento de forma qualitativa por meio de registro fotográfico e visual.

Para análise dos resultados das amostras ensaiadas foi feito o uso da análise da variância (ANOVA) através do software *Statistica 7.0* com nível de confiança de 95% (5% de significância).

### 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Resultados das propriedades do concreto com adição de fibra de aço

A Tabela 8 apresenta os resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos. Na Tabela 9, tem-se as análises da variância da resistência à compressão dos concretos produzidos com fibra de aço.

**Tabela 8:** Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

ENSAIO	REF	CRFA25	CRFA35	CRFA40
Resistencia à Compressão		51,7	52,1	54,3
Média (MPa)	48,1	(+7,42%)	(+8,25%)	(12,89%)

**Tabela 9:** Análise da variância da resistência à compressão do concreto com fibra de aço.

FONTE DA VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	F	VALOR-P	F CRÍTICO	SIGNIFICÂNCIA
Entre grupos	59,23333	3	19,74444	4,462862	0,040283	4,066181	S
Dentro dos grupos	35,39333	8	4,424167				
Total	94,62667	11					

Legenda: SQ – Soma quadrada; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo.

Diante dos resultados da análise da variância pode-se revelar que a incorporação da fibra de aço interferiu significativamente na resistência à compressão. Foi observado que com aumento do teor de fibra de aço, ocorreu também, um aumento gradativo de resistência, chegando a até 12,89% em relação ao concreto de referência (REF).

Tal fato encontra-se em contraposição aos autores Bentur e Mindess [33], Hannant [34], Jonhston [35] e Bezerra [36] que afirmam que a incorporação de fibra de aço no concreto é pouco relevante com relação à resistência à compressão da matriz. Contudo, Garcez [37] afirma que a utilização de teores elevados aumenta levemente a resistência à compressão.

A Tabela 10 apresenta os resultados da tenacidade à flexão dos concretos produzidos, enquanto que a Tabela 11, tem-se a análise da variância da tenacidade à flexão dos concretos produzidos com fibras de aço.

**Tabela 10:** Resultados médios do ensaio de tenacidade à flexão.

Concreto	Tenacidade Média até limite de deflexão L/150= 3mm (KN.mm)	Resistência Equivalente à flexão $f_{e,3}$ (MPa)	Resistência à flexão do concreto sem fibras $f_{ct,M}$ (MPa)	Coefficiente de ductilidade $R_{e,3}$ ( $f_{e,3}/f_{ct,M}$ médio)
CRFA25	70,522	3,13	4,28	73,24
CRFA35	99,240	4,41	5,09	86,71
CRFA40	127,012	5,65	4,76	118,60

**Tabela 11:** Análise da variância da tenacidade à flexão do concreto com fibra de aço.

FONTE DA VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	F	VALOR-P	F CRÍTICO	SIGNIFICÂNCIA
Entre grupos	3192,485	2	1596,243	36,48891	0,007846	9,552094	S
Dentro dos grupos	131,2379	3	43,74597				
Total	3323,723	5					

Legenda: SQ – Soma quadrada; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo.

Conforme a análise constatou-se que a incorporação de fibra de aço exerceu interferência significativa na tenacidade à flexão. Para Bentur e Mindess [33], a tenacidade revela-se como a característica de maior importância no compósito reforçado com fibra de aço.

Para efeito de comparação observou-se que Barros *et al* [38] estudaram a incorporação de 35 e 40 kg/m<sup>3</sup> de uma fibra de aço tipo A1 em um concreto de resistência média de 40 MPa obtendo um ganho no fator de tenacidade de 31%, enquanto que o ganho do fator de tenacidade médio obtido neste estudo com os mesmos teores utilizados e com concreto de resistência média superior a 50 MPa foram de 27,9%. Tal fato evidencia que o ganho do fator de tenacidade é equivalente ao da literatura.

O projeto básico da linha leste do metrô de Fortaleza prevê a execução de segmentos de anel pré-moldado com concreto de resistência características de 45 MPa e com adição de fibra de aço na proporção de 40 kg/m<sup>3</sup>. Dessa forma, utilizou-se o mesmo procedimento (relação de 70% da resistência a tração na flexão) enfocado no estudo da linha 4 do Metrô de São Paulo para encontrar o fator de tenacidade requerido [1].

Para o cálculo da resistência à tração na flexão utilizou-se a correlação proposta pela NBR 6.118 [39] que correlaciona a resistência à tração na flexão com a resistência à compressão, conforme a Equação 1.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

onde:

$f_{ct,m}$  – Resistência à tração na flexão;

$f_{ck}$  – Resistência característica à compressão.

Desse modo, o valor da resistência à tração na flexão calculado foi de 3,8 MPa e consequentemente o valor proposto para o fator de tenacidade foi de 2,7 MPa.

Diante dos resultados apresentados foi realizada uma correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibras com o intuito de estabelecer um procedimento de dosagem experimental do concreto reforçado com fibra (Figura 2).

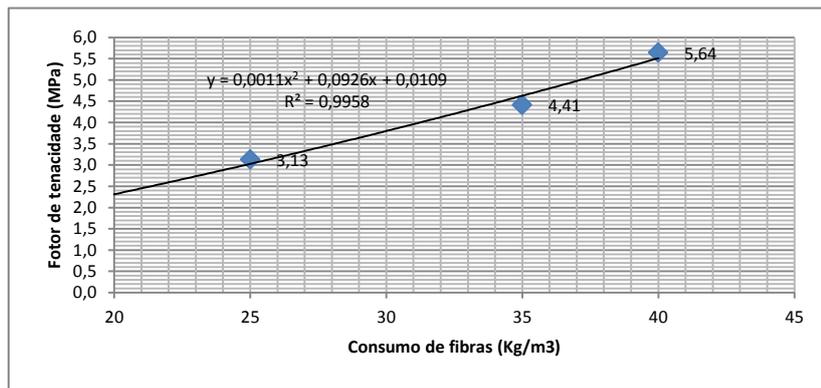


Figura 2: Correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibras.

Com a equação da correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibras da Figura 2, pode-se estabelecer o teor de fibra mínimo necessário para atender ao requisito do fator de tenacidade proposto ao projeto (2,7 MPa), que foi balizado de aproximadamente 23 kg/m<sup>3</sup>.

Para a execução das aduelas da linha leste do metrô de Fortaleza está previsto um volume de 96.500 m<sup>3</sup> de concreto com adição de fibra de aço na proporção de 40 kg/m<sup>3</sup>, totalizando 3.860.000 kg de fibra de aço. No plano econômico a dosagem do CRFA25 (25 kg/m<sup>3</sup> de Fibra de aço), necessitará de 2.412.500 kg de fibra de aço, revelando uma redução de 1.447.500 kg de fibra de aço, enquanto que para a dosagem do CRFA35 (35 kg de fibra de aço) precisará de 3.377.500 kg de fibra de aço, apontando uma redução de 482.500 kg de fibra de aço em relação ao concreto recomendado (CRFA40), revelando uma adequação econômica, pois segundo Figueiredo [1], a fibra de aço custa cerca de quinze vezes mais que o cimento.

### 3.2 Resultados das propriedades do concreto com adição de fibra de polipropileno

A Tabela 12 apresenta os resultados da resistência à compressão dos concretos produzidos com adição de fibra de polipropileno, tanto à temperatura ambiente quanto após submetidos a altas temperaturas. Nas Tabelas 13 e 14 estão apresentadas as análises da variância da resistência à compressão dos concretos produzidos com fibras de polipropileno a temperatura ambiente e após as altas temperaturas (900°C).

Tabela 12: Resultado do ensaio de resistência à compressão dos concretos com adição de fibra de polipropileno.

ENSAIO	Temperatura Ambiente (28°C)				900°C			
	REF	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5	REF	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Resistencia à Compressão Média (MPa)	48,10	51,23 (+6,51%)	46,43 (-3,47%)	45,97 (-4,43%)	0,0	1,55 (0,00%)	1,91 (+23,2%)	2,91 (+87,7%)

Tabela 13: Análise da variância da resistência à compressão do concreto com fibra de polipropileno a temperatura ambiente (28°C).

FONTE DA VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	F	VALOR-P	F CRÍTICO	SIGNIFICÂNCIA
Entre grupos	3,416667	3	1,138889	0,604185	0,630471	4,066181	NS
Dentro dos grupos	15,08000	8	1,885000				
Total	18,49667	11					

Legenda: SQ – Soma quadrada; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo.

Tabela 14: Análise da variância da resistência à compressão do concreto com fibra de polipropileno após altas temperaturas (900°C).

FONTE DA VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	F	VALOR-P	F CRÍTICO	SIGNIFICÂNCIA
Entre grupos	8,745882	3	2,915294	39,15732	0,002011	6,591382	S

Dentro dos grupos	0,297803	4	0,074451
Total	9,043686	7	

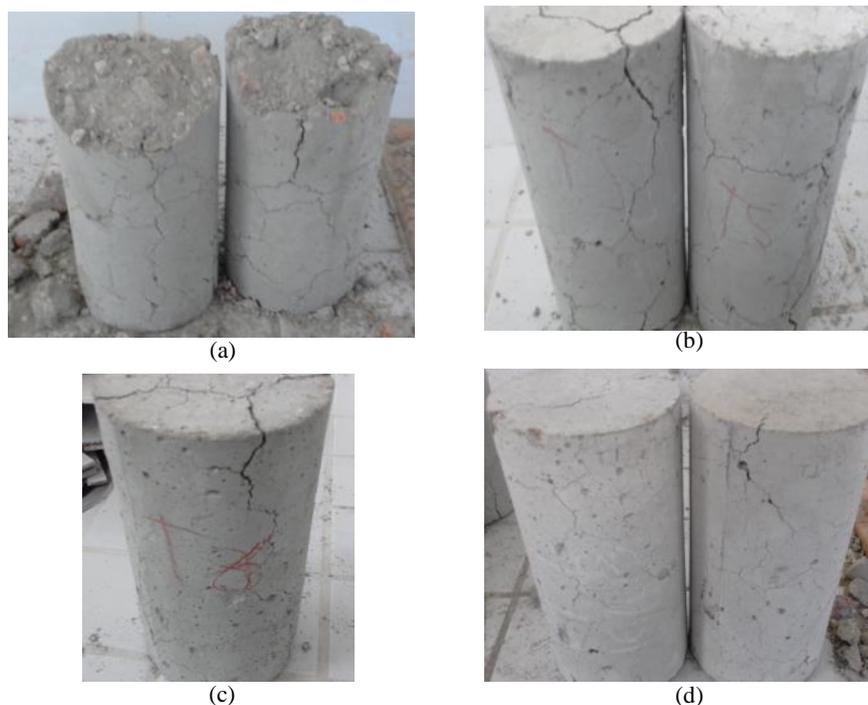
Legenda: SQ – Soma quadrada; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo.

Conforme a análise da variância (Tabelas 13 e 14), a fibra de polipropileno não exerceu influência significativa na resistência à compressão à temperatura ambiente (28°C), enquanto que o mesmo concreto, submetido a altas das temperaturas (900°C), provocou interferência significativa na resistência residual.

Quanto ao resultado de resistência à compressão em temperatura ambiente, isto encontra-se de acordo com a literatura, pois Tanesi e Figueiredo [40] preconizam que as fibras poliméricas em pequenos teores pouco influencia a resistência à compressão.

Após a exposição a altas temperaturas o concreto sofreu uma grave redução da resistência à compressão devido a uma série de reações na pasta do cimento endurecida tais como, dessecação dos poros seguidas da decomposição dos produtos de hidratação, destruição do gel de C-S-H e modificações das ligações químicas [41]. Para Silva [42], as alterações mais presentes em concretos submetidos a altas temperaturas são fissuras, deslocamentos, desidratação da pasta e alterações de cor. Conforme alguns estudos, a exposição do concreto a altas temperaturas pode provocar perda de rigidez e redução de resistência mecânica [2, 30, 42, 43]. Segundo Lima [30], concretos submetidos a temperaturas superiores a 600°C ficam vulneráveis a um acréscimo no tamanho e na quantidade de poros existentes, favorecendo a redução da resistência.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 12, nota-se que com o acréscimo de fibras de polipropileno ocorreu um aumento gradativo da resistência residual. Por meio das inspeções visuais (Figura 3) e com auxílio de fissurômetro, foi possível observar que os corpos de prova submetidos a aquecimento de 900°C apresentaram transformações em sua estrutura. No concreto de referência (REF) observou-se desagregação parcial do concreto das amostras devido ao *spalling* constatado após abertura do forno, enquanto que os demais concretos foram percebidos fissuras na superfície dos corpos de prova, mas sem *spalling*. Este comportamento é coerente com a literatura uma vez que é sabido que as fibras de polipropileno são comumente utilizadas para combater o *spalling* pois possuem um ponto de fusão baixo (em torno de 120 °C). Quando o concreto ultrapassa essa temperatura, a fibra se funde e abre vazios no concreto, vazios este que comportam os vapores d'água oriundos da água presente no concreto que se evapora devido às altas temperaturas. Essa válvula de escape dos valores d'água dentro do concreto inibem o *spalling* [2, 30, 42, 44].



**Figura 3:** Aspectos visuais dos cp's sem e com fibra de polipropileno submetido a 900°C onde (a) – REF, (b) – CRFP0,5, (c) – CRFP1,0 e (d) – CRFP1,5.

No concreto CRFP1,5 foram observadas fissuras mapeadas ao longo de todo corpo de prova com abertura da ordem de 0,2 mm, porém os demais (CRFP0,5 e CRFP1,0) apresentaram fissuras mais abertas da ordem de 0,3 mm a 0,5 mm.

Conforme as fotos da Figura 3 pode verifica-se que houve ocorrência do *spalling* apenas no concreto de referência. Nos demais concretos vale salientar que apesar das fibras de polipropileno terem impedido o lascamento (*spalling*) durante o processo da simulação do incêndio, os fatores de redução da resistência à compressão encontrados no experimento foram bastante acentuadas, revelando que adoção dos teores de fibras de polipropileno utilizadas no experimento precisam ser revistas, com intuito de garantir uma resistência residual adequada à estabilidade estrutural.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados dos ensaios realizados pode-se concluir que:

- A incorporação da fibra de aço provocou diferenças significativas na resistência à compressão promovendo ganho de resistência à compressão em relação ao concreto de referência de até 12,89% para o teor de 40 kg/m<sup>3</sup>;
- Para a tenacidade à flexão a adição da fibra de aço acusou relevante significância, pois os valores médios de tenacidade encontrados se mostraram superiores ao proposto para o projeto. O teor de 40kg/m<sup>3</sup> obteve um aumento da absorção de energia na ordem de 108,9% para o fator de tenacidade em relação ao proposto;
- Conforme a equação da correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibra de aço, pode-se estimar o teor ótimo de fibra de aço em aproximadamente 23 kg/m<sup>3</sup> para atender ao requisito do fator de tenacidade proposto ao projeto;
- A incorporação da fibra de polipropileno, nos teores avaliados, não produziu efeito significativo para a propriedade da resistência à compressão à temperatura ambiente;
- Quanto à resistência à compressão residual dos concretos após altas temperaturas, verificou-se que houve o lascamento (*spalling*) apenas no concreto de referência (REF), sem fibras de polipropileno. Quanto aos demais concretos (CRFP0,5, CRFP1,0 e CRFP1,5), as fibras de polipropileno tiveram papel satisfatório pois não se observou o *spalling* dos mesmos, contudo não se constatou um teor ótimo, dentre os avaliados para a temperatura ensaiada.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] FIGUEIREDO, A. D. *Concreto reforçado com fibras*. Tese de D.sc., Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 2011.
- [2] NINCE, A. A., FIGUEIREDO, A. D., BITTENCOURT, T. N. “Absorção e índice de vazios em concreto reforçado com fibra de polipropileno exposto a 400°C e 600°C”, In: *Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, São Paulo, 2003.
- [3] FIGUEIREDO, A. D. *Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 1997.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [5] \_\_\_\_\_. NBR NM 43 - Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [6] \_\_\_\_\_. NBR 11.579 - Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [7] \_\_\_\_\_. NBR NM 65 - Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [8] \_\_\_\_\_. NBR 11.582 - Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier test. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- [9] \_\_\_\_\_. NBR 7.215 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

- [10] \_\_\_\_\_. NBR NM 15 -: Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [11] \_\_\_\_\_. NBR NM 18 - Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [12] \_\_\_\_\_. NBR 6.473 - Cal virgem e cal hidratada – Análise química. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [13] \_\_\_\_\_. NBR NM 16 - Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [14] \_\_\_\_\_. NBR 7.211 - Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [15] \_\_\_\_\_. NBR NM 248 - Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [16] \_\_\_\_\_. NBR NM 30 - Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [17] \_\_\_\_\_. NBR NM 52 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [18] \_\_\_\_\_. NBR NM 45 - Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [19] \_\_\_\_\_. NBR NM 49 - Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [20] \_\_\_\_\_. NBR 7.218 - Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [21] \_\_\_\_\_. NBR NM 46 - Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [22] \_\_\_\_\_. NBR 9.917 - Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [23] \_\_\_\_\_. NBR 6.467 - Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [24] \_\_\_\_\_. NBR NM 53 - Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [25] \_\_\_\_\_. NBR 15.577 – 4 - Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4 - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [26] \_\_\_\_\_. NBR NM 51 - Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [27] \_\_\_\_\_. NBR 7.809 - Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [28] \_\_\_\_\_. NBR 15.530 - Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [29] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCSF4. Concrete Library of JSCE. Parte III-2 Method of test for steel fiber reinforced concrete. n. 3, pp. 58-61, June 1984.
- [30] LIMA, R.C.A. *Investigação do Comportamento de concretos em temperaturas elevadas*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.
- [31] ANDERBERG, Y. *Mechanical properties of steel reinforcement*, In: course on effect of heat on concrete, Udine, Itália, International Centre for Mechanical Sciences, 2003.
- [32] INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. ISO 834: fire resistance tests – elements of building construction, Genève, 1994.
- [33] BENTUR, A., MINDESS, S. “Fibre Reinforced Cementitious Composites”, United Kingdom. *Barking*, Elsevier. 1990.
- [34] HANNANT, D. J. *Fibre cements and fibre concretes*. Chichester, John Wiley, 1978.
- [35] JOHNSTON, D. C. “Fiber-Reinforced Cements and Concrete. Advances in Concrete technology”, *International Center for Sustainable development of Cement and Concrete*. v. 1. Canada: Ontario, Ottawa, 2001.

- [36] BEZERRA, A. C. S. *Concreto com fibras curtas de aço submetido à altas temperaturas*. Tese de D. Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, 2012.
- [37] GARCEZ, E. O. A. *Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a cargas de impacto*. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.
- [38] BARROS, J.A.O., V. M. C. F. CUNHA; A. F. RIBEIRO, *et al.* “Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, v. 38, pp. 47-56, 2005.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- [40] TANESI, J., FIGUEIREDO, A.D. “Polypropylene fiber reinforced concrete: shrinkage cracking”, In: *International Conference Composites in Constructions – CCC2001*, 2001, pp. 39-42, Porto, Composites in Construction. Lisse, A.A. Balkema Publishers, 2001.
- [41] GRATTAN-BELLEW, P.E. “Micro-structural investigation of deteriorated Portland cement concretes”, *Construction and building materials*, v. 10, n.1, pp. 3-16, 1996.
- [42] SILVA, J.S. *Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão quando submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET)*, Dissertação M.Sc., Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2013.
- [43] FU, Y., LI, L. Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures, *Materials and Structures*. Beijing, China, v.44, p. 361-376, 2011.
- [44] SUN, Z., XU, Q. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete, *Materials Science and Engineering*. Austin, EUA, v. 527, p. 198-204, 2009.