



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

ANDRÉ RÓSEO DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM ADIÇÃO  
DE FIBRAS PARA CONFECCÃO DE ANÉIS PRÉ-MOLDADOS SEGMENTADOS  
PARA REVESTIMENTO DE TÚNEL DE METRÔ**

FORTALEZA-CE  
2016

ANDRÉ RÓSEO DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM ADIÇÃO  
DE FIBRAS PARA CONFEÇÃO DE ANÉIS PRÉ-MOLDADOS SEGMENTADOS  
PARA REVESTIMENTO DE TÚNEL DE METRÔ**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA-CE  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C321a Carvalho, André Róseo de.  
Avaliação das propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô / André Róseo de Carvalho. – 2016.  
93 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.
1. concreto com fibras. 2. dosagem. 3. túneis. 4. tenacidade. I. Título.

CDD 624.1

---

ANDRÉ RÓSEO DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM ADIÇÃO  
DE FIBRAS PARA CONFEÇÃO DE ANÉIS PRÉ-MOLDADOS SEGMENTADOS  
PARA REVESTIMENTO DE TÚNEL DE METRÔ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como estudante, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer. Sem Ele não teria chegado aqui e por isso, tudo o que possa escrever é pouco para descrever a gratidão que sinto por tudo o que o Senhor fez e faz por mim.

A minha esposa, Fabianne Ferreira Costa Róseo, companheira e amiga que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

A minha mãe Maria Neusa de Carvalho, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Obrigado a minha filha, minhas irmãs e sobrinhos, que nos momentos de minha ausência dedicados aos estudos, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, agradeço a paciência, todo o tempo dedicado, os ensinamentos passados e os incentivos.

A todo corpo técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil, sempre com sorrisos, alto astral, muita vontade e competência para trabalhar na resolução dos desafios operacionais do experimento.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.

(Paulo Beleki)

## RESUMO

No Brasil, as aplicações de Concreto Reforçado com Fibra (CRF) estão associadas a obras de grande demanda social, como obras de infraestrutura. Apesar do CRF ser utilizado em obras que exigem grandes volumes de concreto, não se tem uma preocupação na definição de teores mais precisos de fibras, revelando um descaso em assegurar um comportamento adequado aos requisitos de projeto de forma economicamente viável. 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. Este estudo investiga o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço e fibras de polipropileno para confecção de aduelas segmentadas de revestimento de metrô. Para tanto, o concreto deverá conter fibras de aço num teor apropriado que promoverá a transferência de tensões pelas fissuras, para garantir a capacidade resistente após fissuração e fibras de polipropileno 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 diferentes teores de fibras de aço ( $25\text{kg/m}^3$ ;  $35\text{ kg/m}^3$  e  $40\text{ kg/m}^3$ ) e fibras de polipropileno ( $0,5\text{ kg/m}^3$ ,  $1,0\text{ kg/m}^3$  e  $1,5\text{ kg/m}^3$ ) para avaliar parâmetros mecânicos de tenacidade e resistência ao fogo por meio do método de exposição a elevadas temperaturas. Para análise dos resultados utilizou-se de teste estatístico (ANOVA), onde foi demonstrado um ganho de até 12,89% de resistência à compressão (CRFA40) à medida que foram adicionados a fibra de aço, enquanto que, para a tenacidade os resultados revelaram acréscimos de até 108,9% do fator de tenacidade (CRFA40) proposto para o projeto. Enquanto que a análise do comportamento do concreto frente a elevadas 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, devido ao elevado aquecimento sofrido que provocou uma série de reações na pasta do cimento endurecido.

**Palavras-Chave:** Concreto com fibras; dosagem; túneis; tenacidade.

## ABSTRACT

In Brazil, the applications of Reinforced Concrete with Fiber (CRF) are associated to works of great social demand, such as infrastructure works. Although CRF is used in works that require large volumes of concrete, there is no concern with the definition of more precise fiber contents, revealing a lack of assurance of adequate behavior of the design requirements in an economically viable way. However, the study of CRF is necessary because without careful analysis the CRF can cause an increase in the unit cost and hinder the mobility of the larger particles, thus reducing the fluidity of the material. This study investigates the mechanical behavior of reinforced concrete with steel fibers and polypropylene fibers for the construction of segmented subway flooring staves. For this purpose, the concrete should contain steel fibers in an appropriate content that will promote the transfer of tensions through the cracks, to guarantee the capacity to resist after cracking and fibers of polypropylene enough to minimize the risk of plastic cracking, besides protecting against physical damages in the case Occurrence of fires. The experimental program consisted in evaluating the mechanical properties of steel fiber and polypropylene fiber in concrete. Reinforced concretes with different fiber content (25 kg/m<sup>3</sup>, 35 kg/m<sup>3</sup> and 40 kg/m<sup>3</sup>) and polypropylene fibers (0,5kg/m<sup>3</sup>, 1,0 kg/m<sup>3</sup> and 1,5 kg/m<sup>3</sup>) to evaluate mechanical parameters of toughness and fire resistance by means of the high temperature exposure method. Statistical analysis (ANOVA) was used to analyze the results, where a gain of up to 12,89% of compressive strength (CRFA40) was obtained as the steel fiber was added, while for the toughness the results Revealed increases of up to 108,9% of the tenacity factor (CRFA40) proposed for the project. While the analysis of the behavior of the concrete in front of elevated temperatures, it was verified that the adoption of polypropylene fibers acted in an efficient way in the fight against spalling, however it caused a marked reduction of the residual resistance, due to the high heating that caused a series of Reactions in the hardened cement paste.

**Keywords:** Concrete with fibers; dosage; tunnels, tenacity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conceituação do Fator de Forma da fibra.....	25
Figura 2 - Processos de absorção de energia em CRF.....	28
Figura 3 - CRF em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	28
Figura 4 - CRF com compatibilidade dimensional (A) e sem compatibilidade (B).....	31
Figura 5 - Comportamento do concreto submetido à flexão com vários teores de fibras .....	33
Figura 6 - Esquema de ensaio segundo a JSCE-SF4 (1984) e esforços solicitados de cortante e momentos máximos.....	34
Figura 7 - Ilustração da curva $x$ deslocamento vertical obtido no ensaio de tenacidade.....	34
Figura 8 - Alteração na resistência e coloração do concreto .....	39
Figura 9 - Alívio da pressão interna de vapor no concreto através de canais formados pela fusão das fibras de polipropileno.....	43
Figura 10 - Curva DSC/TG e DTG da fibra de polipropileno.....	44
Figura 11 - Perspectiva do anel composto por aduelas .....	45
Figura 12 - Fluxograma do Programa Experimental.....	47
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	49
Figura 14 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos.....	51
Figura 15 - Esquema da sequência da colocação de materiais na betoneira .....	54
Figura 16 - Ensaio no concreto, (a) Teor de Ar Incorporado, (b) Resistência à Compressão, (c) Abatimento do Tronco de Cone.....	55
Figura 17 - Posicionamento do corpo de prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão. ....	56
Figura 18 - Corpos de prova prismáticos (A) durante o ensaio segundo JSCE-SF4, (B) após o ensaio.....	57
Figura 19 - Forno elétrico utilizado no experimento com CP's .....	58
Figura 20 - Curvas força x deflexão para CRFA25.....	64
Figura 21 - Curvas força x deflexão para CRFA35.....	65

Figura 22 - Curvas força x deflexão para CRFA40.....	65
Figura 23 – Correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibras.....	67
Figura 24 - Resistência à Compressão a temperatura ambiente e a 900°C dos concretos.....	68
Figura 25 - Aspectos visuais dos CP's sem e com fibra de polipropileno submetido a 900°C. .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto .....	23
Tabela 2 - Requisitos especificados pela norma ABNT NBR 15.530 para fibras de aço .....	24
Tabela 3 - Requisitos de fator de forma mínimo das fibras de aço para concreto especificado pela NBR 15.530. ....	25
Tabela 4 - Plano de amostragem preconizado pela norma ABNT NBR 15.530 para um lote de fibras. ....	25
Tabela 5 - O teor de fibra de aço em projetos que utilizaram o CRF. ....	30
Tabela 6 - Métodos de ensaios para determinação da tenacidade especificada para concreto reforçado com fibras de aço. ....	32
Tabela 7 - Transformações sofridas por pastas de cimento durante o aquecimento .....	37
Tabela 8 - Prováveis causas da ocorrência do <i>Spalling</i> .....	40
Tabela 9 - Classificação do tipo de lascamento .....	42
Tabela 10 - Fatores que influenciam em cada tipo de lascamento .....	42
Tabela 11 - Caracterização do aglomerante .....	48
Tabela 12 - Ensaio de descrição Petrográfica do agregado miúdo. ....	49
Tabela 13 - Caracterização do agregado miúdo .....	50
Tabela 14 - Ensaio de descrição Petrográfica da rocha .....	50
Tabela 15 - Caracterização dos agregados graúdos .....	51
Tabela 16 - Características dos aditivos utilizados. ....	52
Tabela 17 - Características da Fibra de Aço. ....	52
Tabela 18 - Características da Fibra de Polipropileno. ....	52
Tabela 19 - Verificação dimensional da Fibra de Aço .....	53
Tabela 20 - Traços do CRF com diferentes teores de fibras para estudo. ....	53
Tabela 21 - Relação de ensaios realizados e quantidade de corpos-de-prova .....	55
Tabela 22 - Resumo do ensaio de tenacidade à flexão .....	57

Tabela 23 - Modelo de Variância de ANOVA .....	59
Tabela 24 - Resultados dos ensaios do concreto no estado fresco. ....	60
Tabela 25 – Resultados do Ensaio de Absorção de Água .....	61
Tabela 26 - Análise de variância da absorção de água do concreto com fibra de aço .....	61
Tabela 27 - Análise de variância da absorção de água do concreto com fibra de polipropileno .....	61
Tabela 28 - Significância da absorção de água do concreto.....	61
Tabela 29 – Resultados do Ensaio de Resistencia à Compressão aos 28 dias.....	62
Tabela 30 - Significância da Resistencia à Compressão aos 28 dias.....	62
Tabela 31 - Variação de aumento da resistência à compressão em função de aumento do teor de fibra de aço.....	63
Tabela 32 - Ganho de resistência à compressão após adição de fibra de polipropileno a temperatura ambiente. ....	64
Tabela 33 - Resultados médios do Ensaio de Tenacidade à Flexão .....	64
Tabela 34 - Significância da Tenacidade à Flexão aos 28 dias .....	65
Tabela 35 - Ganho de Tenacidade à Flexão .....	66
Tabela 36 - Fator de tenacidade médio para os concretos propostos no experimento. ....	67
Tabela 37 – Significância da Resistencia à Compressão a temperatura de 900°C .....	68
Tabela 38 - Redução da Resistência à compressão após exposição a 900°C .....	69
Tabela 39 - Resumo da significância dos ensaios realizados .....	71

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACI - American Concrete Institute  
ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
CP – Corpos de prova  
CRF – Concretos Reforçados com Fibras  
CRFA – Concreto Reforçado com Fibras de Aço  
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado  
DIMAT – Divisão de Materiais  
FR – Fator de Redução  
FT – Fator de Tenacidade  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ISO – International Organization for Standardization  
LVDT – Linear Variable Differential Transformers  
METROFOR – Metrô de Fortaleza  
NATM – New Austrian Tunnelling Method  
NBR – Norma Brasileira Regulamentar  
NUTEC – Fundação Núcleo de Tecnologia do Ceará  
RLE – Rail Link Engineering  
TBM – Tunnel Boring Machine  
UFC – Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1.	Justificativa .....	14
1.2.	Objetivos.....	17
1.2.1.	<i>Objetivo Geral</i> .....	17
1.2.2.	<i>Objetivos Específicos</i> .....	17
1.3.	Estrutura da Dissertação .....	17
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
2.1.	Aspectos Históricos do Metrô.....	19
2.2.	Fibras para uso no Concreto .....	20
2.2.1.	<i>Fibras de Polipropileno</i> .....	20
2.2.2.	<i>Fibras de Aço</i> .....	22
2.3.	Concreto Reforçado com Fibras (CRF) .....	25
2.3.1.	<i>Introdução</i> .....	25
2.3.2.	<i>Interação fibra-matriz</i> .....	27
2.3.3.	<i>Volume crítico das fibras</i> .....	28
2.4.	Dosagem de concreto com fibra .....	29
2.5.	Métodos de Avaliação da Tenacidade .....	32
2.6.	Impactos das Elevadas Temperaturas sobre o Concreto.....	36
2.6.1.	<i>Alterações da microestrutura do concreto com elevadas temperaturas</i> .....	37
2.6.2.	<i>Efeitos macroestruturais da exposição a elevadas temperaturas</i> .....	38
2.6.3.	<i>Lascamento (Spalling)</i> .....	40
2.7.	Aduelas para revestimento de túnel.....	45
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>47</b>
3.1.	Materiais.....	48
3.1.1.	<i>Cimento Portland CP VARI RS</i> .....	48
3.1.2.	<i>Agregado miúdo</i> .....	49
3.1.3.	<i>Agregado graúdo</i> .....	50
3.1.4.	<i>Aditivo</i> .....	52
3.1.5.	<i>Fibras</i> .....	52
3.2.	Dosagem do Concreto .....	53
3.3.	Produção do Concreto.....	54
3.4.	Métodos de Ensaio.....	54
3.4.1.	<i>Ensaio de Tenacidade à flexão segundo JSCE-SF4</i> .....	56
3.4.2.	<i>Método de Exposição a Elevadas Temperaturas</i> .....	58
3.5.	Análise Estatística.....	59
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
4.1.	Apresentação e Análise dos Resultados.....	60
4.1.1.	<i>Resultados de propriedades dos concretos no estado fresco</i> .....	60
4.1.2.	<i>Resultados da Absorção de Água</i> .....	60
4.1.3.	<i>Resultados da Resistência à Compressão</i> .....	62
4.1.4.	<i>Resultados da Tenacidade à Flexão</i> .....	64
4.1.5.	<i>Resultados da Simulação de Incêndio</i> .....	68
4.2.	Discussão dos Resultados .....	71
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>73</b>
5.1.	Conclusão .....	73

<b>5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE A – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE B – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS ENSAIOS DE TENACIDADE... </b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE C – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS ENSAIOS DE FORNO .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS.....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE F – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA TENACIDADE À FLEXÃO DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS. ....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE G – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA RESISTENCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS APÓS ELEVADAS TEMPERATURAS (900°C).....</b>	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Justificativa

No Brasil, existe grande necessidade de obras de infraestrutura para impulsionar o desenvolvimento econômico do país. Tal fato pode ser evidenciado na necessidade de reaparelhamento das ferrovias na busca pela integração de mobilidade de transporte.

O sistema metroferroviário apresenta-se como um dos tipos de transporte coletivo mais eficiente nos grandes centros urbanos pelo fato de transportar um grande número de passageiros ao mesmo tempo. Conforme o Relatório da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2014), os 14 (catorze) sistemas metroferroviários existentes no Brasil são responsáveis pelo transporte de 2,4 bilhões de passageiros/ano. Perante os dados apresentados pela Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC) do IBGE, divulgada em julho de 2013, no ano de 2012 o metrô estava presente em apenas 0,3% dos municípios brasileiros.

Conforme Figueiredo (2011) no cenário brasileiro, a utilização do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) está focada na viabilidade de aplicações em revestimentos de túneis e em pavimentos (obras de infraestrutura), onde as fibras utilizadas nos reforços dos concretos podem ser de aço e/ou poliméricas.

As fibras de aço possuem norma específica NBR 15.530 (ABNT, 2007a) que permite estabelecer requisitos e tolerâncias específicas do material que se apresenta em tipos e classes de fibras. As fibras de polipropileno são divididas em duas formas básicas: microfibras e macrofibras. As microfibras possuem dois tipos: monofilamentos e fibriladas (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Figueiredo (2005), as propriedades das fibras de maior relevância são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, uma vez que estas propriedades são responsáveis pela capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto. Desse modo, fibras com módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido (da ordem de 20 GPa a 30 GPa) são conhecidas como fibras de baixo módulo (exemplo: polipropileno), enquanto que se este for superior tem-se fibras de alto módulo (exemplo: aço).

A incorporação de fibras no concreto é justificada pelo relevante fato de promover capacidade de reforço através de suas propriedades. As fibras de aço, por possuírem alta resistência e alto módulo, atuam como reforço do concreto endurecido, enquanto que as fibras de baixa resistência e baixo módulo podem ser úteis em concreto para minimizar o risco de fissuração plástica, além de proteger contra danos físicos durante incêndios em túneis. Com o



aumento da temperatura, as fibras de baixo módulo se fundem produzindo o caminho livre para a saída do vapor de água. Apesar de o fogo promover a redução da capacidade resistente do concreto, a fibra de baixo módulo possibilita manter íntegro o concreto mesmo que degradado (NINCE; FIGUEIREDO; BITTENCOURT, 2003).

A utilização de fibras no concreto deve ser cuidadosamente observada e estudada, uma vez que esta provoca um aumento no custo unitário do mesmo e poderá dificultar a mobilidade das partículas maiores reduzindo assim a fluidez do material. Todavia, as fibras deverão ser adicionadas com resistência e módulo de elasticidade adequada e em um teor apropriado que proporcionará uma transferência de tensões pelas fissuras, promovendo uma redução significativa na velocidade da propagação das fissuras, ou seja, transformando o concreto, que é um compósito frágil, em um compósito de ruptura pseudo-dúctil (com capacidade resistente após a fissuração). Outro fator relevante é o fato da fibra se distribuir aleatoriamente por toda a peça promovendo o reforço do compósito.

Vale ressaltar também, que a utilização das fibras, mesmo em concretos convencionalmente armados, promove benfeitorias em sua estrutura, transformando-as em uma armadura complementar para reduzir a fissuração do material (MINDESS, 1995).

Por ser um compósito, o comportamento do CRF pode ser influenciado por uma série de características das fibras, tais como: teor, geometria e resistência. O efeito do teor de fibras é um fator importante, uma vez que, quanto maior for o teor, maior será o número de fibras, atuando como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura, o que aumenta o reforço pós-fissuração do concreto. O efeito da geometria das fibras é outro fator considerável, porque caso o comprimento da fibra seja inferior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado do concreto, esta não atuará a contento, função da incompatibilidade dimensional entre agregado e fibra (MAIDL, 1991). Por fim, o efeito da resistência das fibras está intrinsecamente ligado à transferência de tensões, visto que quanto maior for à resistência da fibra maior será a capacidade resistente residual do concreto. Este fato ocorre no momento em que a matriz cimentícia do concreto fissurar, quando então acontecerá uma transferência de tensões da mesma para a fibra, cuja resistência é acionada (FIGUEIREDO, 1997).

De acordo com Bentur e Mindess (1990), a melhor forma de avaliar e controlar as propriedades mecânicas do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) é por meio da medida da tenacidade, que no Brasil se utilizam de normas internacionais por ausência de método normatizado nacionalmente. Dessa forma para Callister (2010), a tenacidade refere-se

à capacidade do material de absorver energia e se deformar no regime elástico e regime plástico.

Contudo o CRF sem um minucioso estudo pode se tornar uma problemática. Apesar deste fato, para Figueiredo (1997) a utilização do CRF ainda é desenvolvida de forma empírica devido à falta de especificações técnicas e normas específicas. No entanto tem-se na prática a utilização de teores fixos de fibras sem a menor preocupação com o desenvolvimento de uma dosagem com teores mais precisos (otimização).

Entretanto, para garantir a confiabilidade da obra, se faz necessária a realização de ensaio em corpos de prova de grandes dimensões com o intuito de obter uma homologação do material (FERNANDES, 2005). Este estudo ocorre em paralelo aos estudos em corpos de prova de pequena dimensão para determinação das propriedades como resistência à compressão, resistência à tração na flexão e tenacidade.

Para a confecção de segmentos pré-moldados (aduelas) para revestimento de túneis, se faz imprescindível, à utilização de um concreto especial para atender aos requisitos mecânicos da tenacidade e da resistência ao fogo, no entanto, o concreto convencional é um material de característica frágil. Dessa forma, a adição das fibras de aço ao concreto surge como alternativa viável, quão fortemente altera o comportamento do concreto após sua ruptura, sendo capaz de apresentar uma capacidade estrutural mesmo na fase de pós-fissuração do concreto (tenacidade), passando de um material frágil para dúctil, porque estas características contribuem conseqüentemente para a impermeabilidade e a durabilidade da estrutura.

Outro elemento indispensável para compor o CRF é a utilização das fibras de polipropileno com a finalidade de combater danos físicos durante incêndios em túneis. Entretanto, os incêndios em túneis tornam-se uma preocupação internacional devido ao risco da destruição da estrutura pela ação do fogo que pode trazer sérias conseqüências como mortes e prejuízo financeiros para reparos.

Desse modo, o CRF apesar de ser utilizado em obras com grandes volumes de concreto, não recebe a mesma atenção para definição de teores mais precisos de fibras. Isto, praticamente, revela uma omissão da utilização de qualquer método para assegurar um comportamento adequado aos requisitos de projeto de forma economicamente viável.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo Geral***

O objetivo desta dissertação é avaliar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço e fibras de polipropileno para confecção de aduelas segmentadas de revestimento de metrô.

### ***1.2.2. Objetivos Específicos***

- Avaliar o comportamento mecânico (tenacidade) dos corpos-de-prova prismáticos ensaiados à flexão;
- Avaliar a influência do teor de fibra na tenacidade do concreto reforçado com fibra de aço;
- Avaliar o desempenho macroestrutural, expresso em termos de resistência à compressão de corpos-de-prova submetidos a elevadas temperaturas;
- Avaliar a eficiência de adições fibrosas (polipropileno) como forma de atenuar a degradação do concreto e garantir a estabilidade estrutural por um maior intervalo de tempo;

## **1.3. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos conforme a seguir.

O capítulo 1 aborda a introdução do estudo, justificativa e apresentação dos objetivos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre tipos e características das fibras, concreto reforçado com fibras, dosagem, métodos de ensaios e comportamentos mecânicos de concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados e o programa experimental que consiste na seguinte análise: dosagem do concreto, a produção do concreto e os procedimentos de ensaios para avaliar o desempenho do concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, a análise e a discussão.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o desempenho do concreto reforçado com fibras (aço e polipropileno) e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos Históricos do Metrô

O primeiro metrô do mundo foi criado em Londres no começo do século XIX por Charles Pearson, com o intuito de amenizar os transtornos causados por congestionamento de carroças, carruagens e ônibus de dois andares puxados a cavalos. A linha que ligaria a rua Farringdon à rua Paddington com 6,5 Km de extensão teve sua inauguração em 10 de janeiro de 1863 (LEAL, 2013).

Já no Brasil, esta tecnologia somente chegaria bastante tempo depois, em 1974, com o Metrô de São Paulo. O metrô paulistano teve sua primeira linha (Linha 1 - Azul) que entrou em operação comercial em 14 de setembro de 1974, com 16,7 Km de extensão e 20 estações. O trecho percorrido foi de Jabaquara a Vila Mariana, cumprindo com seu papel de transportar, de forma rápida e segura, uma grande quantidade de pessoas.

Atualmente, o metrô de São Paulo possui seis linhas em operação com uma extensão de 78,3 Km, contemplando 68 estações, transportando cerca de 4,7 milhões de passageiros diariamente. O metrô de São Paulo é o maior e o mais antigo do Brasil, ocupando o 37º lugar no *ranking* mundial em extensão (MOBILIZE, 2015).

No Ceará, no município de Fortaleza, o sistema metroferroviário teve início em 25 de setembro de 1987, por meio do Consórcio do Trem Metropolitano de Fortaleza. Com a extinção do consórcio foi criado o metrô de Fortaleza (Metrofor) fundado em 02 de maio de 1997. Sua operação teve início em 15 de junho de 2012, apresentando uma extensão do sistema de 68,7 Km distribuída em 5 (cinco) linhas e 53 (cinquenta e três) estações. Dentre as linhas existentes (Sul, Oeste, Leste, Mucuripe e Maranguape) apenas duas estão em operação, enquanto as demais se encontram em construção e em estudo. Atualmente as linhas em operação são responsáveis pelo transporte de 485 mil passageiros por dia.

A concretização da Linha Leste do metrô de Fortaleza almeja transportar 400 mil pessoas por dia, melhorando a mobilidade na área de abrangência da cidade. O projeto apresenta um traçado subterrâneo de 12,4 quilômetros de extensão e a construção de 12 estações ao longo deste, onde para sua execução será necessária à confecção de 10.827 anéis pré-moldados segmentados, sendo utilizado um volume total de concreto (CRF) de 96.500 m<sup>3</sup> (METROFOR, 2015).

As grandes obras subterrâneas requerem intensos esforços para sua execução, onde durante o século XX houve um grande avanço na tecnologia das escavações

mecanizadas. Os primeiros túneis tiveram sua execução através do método de construção *cut-and-cover* (cortar e cobrir). Este método causava inúmeros transtornos, uma vez que consiste em escavação a céu aberto.

Dentre os métodos de escavação de túneis atualmente utilizados, os mais empregados no mundo são o TBM (*Tunnel Boring Machine*) e o NATM (*New Austrian Tunnelling Method*). O método TBM constitui no emprego de escavações mecanizadas que promovem velocidade do avanço e eliminação dos desconfortos ambientais (FRANCIS; ROCHA, 1998). O método NATM revela-se como um processo de escavação subterrânea que emprega, no seu revestimento, o concreto projetado para estabilizar as tensões do solo por meio do alívio controlado das tensões atuantes (FERRARI, 1993).

## **2.2. Fibras para uso no Concreto**

De acordo com Accetti e Pinheiro (2000), as fibras foram utilizadas pela primeira vez, em 1911, quando Grahan propôs o uso de fibras de aço em conjunto com armadura convencional com o intuito de promover aumento da resistência do concreto armado. Contudo, apenas na década de 60, ocorreu efetivamente o início de um programa de desenvolvimento de caráter técnico e científico das aplicações práticas das fibras no concreto.

De forma geral, as fibras podem ser classificadas em quatro grupos distintos: naturais, poliméricas, minerais e metálicas. As fibras podem ser diferenciadas através de sua composição física e química, de suas propriedades mecânicas e durabilidade quando expostas aos meios agressivos (VENDRUSCOLO, 2003).

Conforme Strong (2008), a fibra na matriz de concreto age como reforço, porque, geralmente é capaz de dar resistência, rigidez e tenacidade para o compósito, como também, diminuir outras propriedades como o coeficiente de expansão térmica e condutividade.

Segundo Figueiredo (2005), o papel que a fibra desempenha no concreto depende basicamente de uma série de características da mesma. No entanto, para realizar uma classificação básica adotam-se como relevantes duas propriedades da fibra: o módulo de elasticidade e a resistência mecânica.

### **2.2.1. Fibras de Polipropileno**

O polipropileno é uma resina, que foi inserida comercialmente a partir de 1957, de grande volume de produção em escala mundial. O polipropileno isostático representa a

principal forma de produção devido as suas diversas propriedades de interesse: baixo custo, facilidade de processamento, excelente resistência química, resistência mecânica e rigidez moderadas, boa ductilidade e excelente resistência à fadiga (EBEWELE, 1996).

Atualmente é possível relatar a diversificação de obras que utilizam a incorporação de fibras de polipropileno. Este fato pode ser explicado, devido à fibra de polipropileno possuir compatibilidade mecânica, física e química com o concreto, ou seja, o polipropileno apresenta-se quimicamente inerte, não absorve água, é imputrescível e não enferruja. Pode-se também, enfatizar os aspectos econômicos, pois a fibra de polipropileno é de baixo custo e de fácil disponibilidade.

As fibras de polipropileno são constituídas de material polimérico (termoplástico) e podem ser classificadas como fibras de baixo módulo de elasticidade e apresentar grande capacidade de deformação, boa resistência aos álcalis e baixo custo, onde atuam no controle da fissuração por retração plástica do concreto. A incorporação de fibras de polipropileno tem como um de seus objetivos promover o controle da fissuração causada por mudanças de volume em matrizes de concreto (ABDULL-WAHAB; AHMAD, 1992; AL-TAYYIB *et al.*, 1988). Dada a sua reduzida resistência à tração, este tipo de fibra não promove resultados significativos de desempenho quando utilizadas para reforço de concreto sujeito a cargas de impacto (BERNARDI, 2003).

Outro objetivo do uso destas fibras é a de combater danos físicos ao concreto durante incêndios. Este uso foi evidenciado após o acidente ocorrido no Eurotúnel, (França - Inglaterra) onde um incêndio provocou o lascamento do revestimento de concreto do túnel devido à tensão interna gerada pela pressão de vapor (FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002).

As microfibras de polipropileno apresentam-se em dois tipos: monofilamentos e fibriladas. Segundo Nince (2006), as fibras fibriladas apresentam menor eficiência na prevenção ao lascamento se comparadas às fibras de monofilamentos, devido esta última possuir um maior número de fibras por massa, provocando dessa forma um maior número de vazios.

Conforme *Rail Link Engineering - RLE* (1997), a utilização destas fibras de polipropileno evidencia uma solução para o problema, pois com o aumento da temperatura elas se fundem permitindo a liberação do vapor de água com aquecimento e conseqüentemente há o relaxamento da poro-pressão. Para Nince, Figueiredo e Bittencourt (2003), a sua aplicação em concreto destinado ao revestimento de túnel revela-se como fator essencial a segurança, pois apesar do fogo reduzir a capacidade resistente do concreto, as

fibras de polipropileno garantem a integridade do material mesmo quando este se encontra degradado.

### 2.2.2. *Fibras de Aço*

Para Johnston (2001), as fibras de aço são as mais utilizadas em reforço de concreto por serem mais eficazes, econômicas e de fácil mistura à matriz. No Brasil, existe uma norma específica para fibras de aço a NBR 15.530 (ABNT, 2007a). Geralmente, as fibras de aço possuem deformações geométricas nas extremidades para aumentar a ancoragem e comprimento variando de 25 mm (curta) a 60 mm (longa). Estas podem ser fornecidas soltas ou coladas em pentes.

As fibras de aço são basicamente definidas por três características inerentes à sua utilização como reforço em matriz de concreto (FIGUEIREDO, 2011):

- a) **Fator de Forma** – Consiste na relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro do círculo com área equivalente à sua seção transversal. A alteração do fator de forma pode modificar os efeitos das transferências de tensões e a aderência da fibra/matriz. Quanto maior for este fator, maior será a tenacidade neste compósito, proporcionando um melhor reforço;
- b) **Geometria** – Representa a relação de aspecto (comprimento e variação da seção transversal). Estas características podem influenciar, significativamente, o comportamento pós-fissuração do compósito. Desse modo, tem-se que, quanto menor for à seção transversal, maior será a quantidade de fibra presente na mistura e, conseqüentemente, maior será a probabilidade de uma fissura ser interceptada pela fibra. Quando se aumenta o comprimento da fibra aumenta-se, também, a região de contato entre a matriz e a fibra e, conseqüentemente, a aderência. Com isso é preciso um maior gasto de energia para que ocorra um arrancamento da fibra devido o comprimento embutido na matriz também ser maior;
- c) **Resistência à tração** – Esta característica afeta significativamente a capacidade resistente pós-fissuração (tenacidade). O esforço de tração ocorre no instante em que a matriz fatura transferindo tensões da mesma para a fibra, cuja resistência é acionada.



Fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam uma série de características: fator de forma da ordem de 30 a 50 e comprimento da ordem da 0,1 cm a 7,6 cm. Para Bentur e Mindess (1990), o papel principal das fibras de aço no CRF é garantir a ponte de transferência de tensões através das fissuras. Este fato ocorre logo após a ruptura da matriz de concreto, onde as fibras passam a sofrer tração que demanda uma quantidade extra de energia para deformação e ruptura do compósito, proporcionando uma maior tenacidade.

A NBR 15.530 (ABNT, 2007a), prevê a tipologia e a classificação das fibras de aço, conforme apresentado na Tabela 1. Os formatos previstos são variáveis, uma vez que objetiva-se aumentar a aderência da mesma com a matriz cimentícia.

**Tabela 1** - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto

Tipo (Geometria)	Classe de fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Figueiredo, 2011

A NBR 15.530 (ABNT, 2007a) prevê três tipos de fibras, que dependem da conformação geométrica, e três classes de fibras que estão associadas ao tipo de aço que as originaram. Os tipos de fibras previstos são: tipo A, a qual possui ancoragem nas extremidades; tipo C, feita de aço corrugada e tipo R, a qual é produzida com aço reto. Quanto às classes previstas são: classe I, produzido com arame trefilado a frio; classe II, oriunda de chapa laminada cortada a frio e classe III, procedente de arame trefilado e escarificado.

Para que as fibras de aço promovam significativo desempenho no compósito, são requeridos pela norma brasileira dois fatores primordiais: a geometria da fibra e a resistência do aço que lhe deu origem. Dessa forma a NBR 15.530 (ABNT, 2007a) estabelece requisitos e tolerâncias para as fibras de aço os quais estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Requisitos especificados pela norma ABNT NBR 15.530 para fibras de aço

<b>Tipo (Geometria)</b>	<b>Classe da Fibra</b>	<b>Limite de resistência à tração do aço <math>f_u</math> (MPa) <sup>(*)</sup></b>
A	I	1000
	II	500
C	I	800
	II	500
	III	800
R	I	1000
	I	500

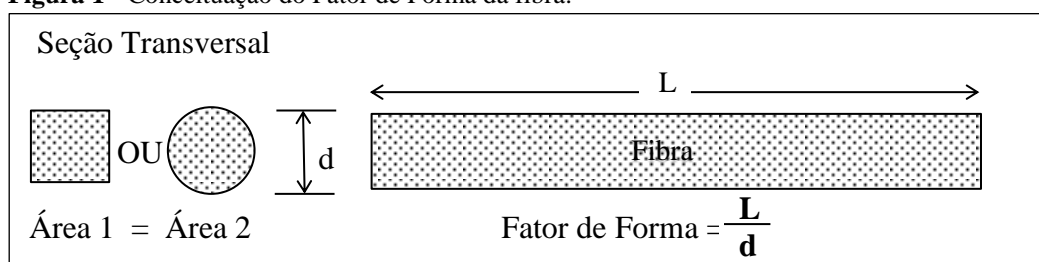
<sup>(\*)</sup> Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

Fonte: NBR 15.530 (ABNT, 2007a)

Conforme a Tabela 2, a menor resistência à tração prevista para o aço da fibra é de 500 MPa, enquanto que na normatização internacional (ASTM A 820, 2001) evidencia-se um nível mínimo especificado de 345 MPa, independente do tipo de fibra de aço.

A ductilidade da fibra é importante para impedir a fragilidade do compósito. Portanto, foi estabelecido o ensaio de dobramento da fibra onde em cada lote é retirado uma amostra de 10 exemplares aleatoriamente e realizado o ensaio de dobramento manualmente sobre um pino de 3,2 mm de diâmetro a uma temperatura acima de 16°C. As fibras deverão ser dobradas até atingir um ângulo de 90° sem quebra, em no mínimo 90% das fibras ensaiadas (FIGUEIREDO, 2011).

O fator de forma é a relação geométrica obtida a partir da divisão do comprimento da fibra (L) não alongado, pelo diâmetro do círculo com área equivalente à sua seção transversal (d), conforme ilustra a Figura 1.

**Figura 1** - Conceituação do Fator de Forma da fibra.

Fonte: AGOPYAN e NUNES, 1998.

Dessa maneira, a norma brasileira prevê requisitos mínimos para o fator de forma, conforme a classe da fibra apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Requisitos de fator de forma mínimo das fibras de aço para concreto especificado pela NBR 15.530.

Classe da Fibra	Tipo de aço	Fator de forma mínimo $\lambda$
I	Fio de aço trefilado	40
II	Chapa de aço cortada	30
III	Fio de aço trefilado e escarificado	30

Fonte: NBR 15.530 (ABNT, 2007a)

A norma NBR 15.530 (ABNT, 2007a) também prevê requisitos para o controle de qualidade das fibras. O lote de fibra amostrado e ensaiado deve apresentar conformidade com todas as exigências estabelecidas: (i) resistência ao dobramento; (ii) variação dimensional e (iii) quantidade de fibras defeituosas (Tabela 4).

**Tabela 4** - Plano de amostragem preconizado pela norma ABNT NBR 15.530 para um lote de fibras.

Ensaio	Amostra Mínima	Porcentagem mínima de fibras conformes
Dobramento	10 fibras	90
Verificação dimensional	60 fibras	90
Verificação de defeitos	200 g	95

Fonte: NBR 15.530 (ABNT, 2007a)

## 2.3. Concreto Reforçado com Fibras (CRF)

### 2.3.1. Introdução

O concreto convencional tem comportamento frágil e baixa capacidade de deformação antes da ruptura, uma vez que a concentração de tensões causa a ruptura da matriz levando a extensão da fissura e, conseqüentemente, a um processo contínuo até a ruptura completa do concreto (FIGUEIREDO, 2011). Com o incremento de fibras de forma aleatória ou de forma orientada e alinhada na matriz de cimento, esta se torna um compósito

com pelo menos duas fases distintas: matriz cimentícia e as fibras propriamente ditas. Para Strong (2008), os materiais compósitos são materiais sólidos cuja matriz envolve outro material com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas.

A adição de fibras no concreto provoca mudanças em algumas de suas propriedades, seja no estado fresco e/ou no estado endurecido. No estado fresco há uma redução da retração plástica, da exsudação e da trabalhabilidade do concreto, enquanto que no estado endurecido há incrementos na tenacidade, na resistência à propagação de fissuras e na resistência ao impacto. Para conferir o incremento das propriedades, existe a dependência de condicionantes como: i) tipo e volume das fibras, e ii) propriedades da matriz (CECCATO; NUNES; FIGUEIREDO, 1997).

As fibras podem, de fato, produzir melhorias no comportamento do concreto se forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia e em bastante quantidade.

Para Figueiredo (2011), a adição de fibras com resistência e módulo de elasticidade adequado e em teor acertado promoverá uma mudança significativa no comportamento frágil concreto, ou seja, as fibras servirão como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, para garantir a capacidade resistente após fissuração.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o incremento de fibras no concreto provoca um aumento de energia associado à ruptura do material e à restrição a propagação das fissuras. Enquanto Li (1992) afirma que a adição de fibras assegura uma menor fissuração do concreto.

A presença da fibra no concreto, além de garantir o controle da fissuração promove ganho de ductilidade (SCOARIS; BARBOSA; PINTO JÚNIOR, 2005).

De acordo com Figueiredo (2011), todos os concretos podem ser reforçados com fibras, mas o ganho de desempenho somente é atingido se houver controle de princípios tecnológicos por meio de ensaios nos materiais constituintes e no próprio concreto com a finalidade de verificar principalmente a durabilidade, resistência mecânica e adequabilidade funcional. As fibras podem ocasionar também, problemas como: aumento no custo unitário e dificuldade na mobilidade das partículas maiores, reduzindo assim a trabalhabilidade do material. Dessa forma, para amenizar tais problemas, se faz necessário realizar estudos de dosagem para permitir o maior acréscimo possível de tenacidade sem comprometer a trabalhabilidade e viabilidade econômica.

Conforme a ACI 544.4R-3 (1994), as propriedades mecânicas do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) são intrinsecamente influenciadas pelos seguintes condicionantes: tipo de fibra, fator de forma e quantidade das fibras, resistência da matriz

cimentícia, tamanho, formato e método de preparação dos corpos de prova e tamanho dos agregados. Dentre os condicionantes citados, o teor de fibras é assinalado como o principal parâmetro definidor do comportamento do compósito (FIGUEIREDO, 2011).

Ainda, de acordo com Figueiredo (2011):

Naturalmente, se o número de fibras presente na seção de ruptura aumentar, maior será o número de cargas e, portanto, maior será a resultante de tração e a capacidade resistente do compósito.

Outro fator importante é o efeito da resistência da fibra, uma vez que “[...] quanto maior a resistência da fibra, tão maior será a capacidade resistente residual do CRF.” (FIGUEIREDO, 2011).

Além disso, Fernandes (2005) conceitua que:

O CRFA é um compósito onde a matriz é de pasta de Cimento Portland (material de ruptura à compressão e a tração do tipo frágil) e o reforço é feito pela adição de fibras de aço (material dúctil).

O teor e o tipo das fibras de aço estão condicionados à finalidade ao qual o CRF é direcionado, tendo um consumo médio de 20 Kg/m<sup>3</sup> a 30 Kg/m<sup>3</sup> para pisos e pavimentos industriais, de 45 Kg/m<sup>3</sup> a 60 Kg/m<sup>3</sup> para concreto projetado e para confecção de aduelas para revestimento de túneis em torno de 30 Kg/m<sup>3</sup> a 60 Kg/m<sup>3</sup> (FERNANDES, 2005).

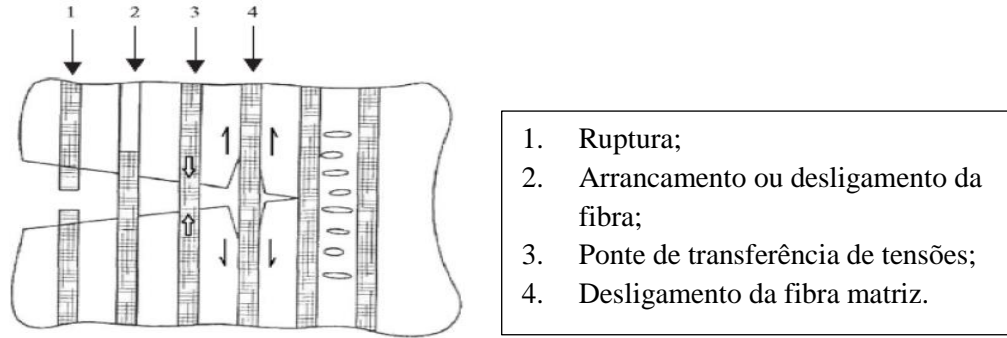
### **2.3.2. Interação fibra-matriz**

Segundo Pasa (2007), a interação da fibra matriz no CRFA é influenciada por uma série de fatores, como: resistência da matriz, orientação, comprimento, seção transversal e volume crítico das fibras. Figueiredo (2011) ressalta que a eficácia da fibra encontra-se extremamente dependente da resistência da matriz de concreto.

No comportamento da pós-fissuração dos compósitos reforçados com fibras estão os processos de interação fibra matriz, responsáveis pela contribuição para a considerável capacidade em absorver energia, ductilidade e resistência (SINGH; SHUKL; BROWN, 2004).

Tais processos podem ser definidos conforme a ilustração apresentada na Figura 2:

**Figura 2** - Processos de absorção de energia em CRF



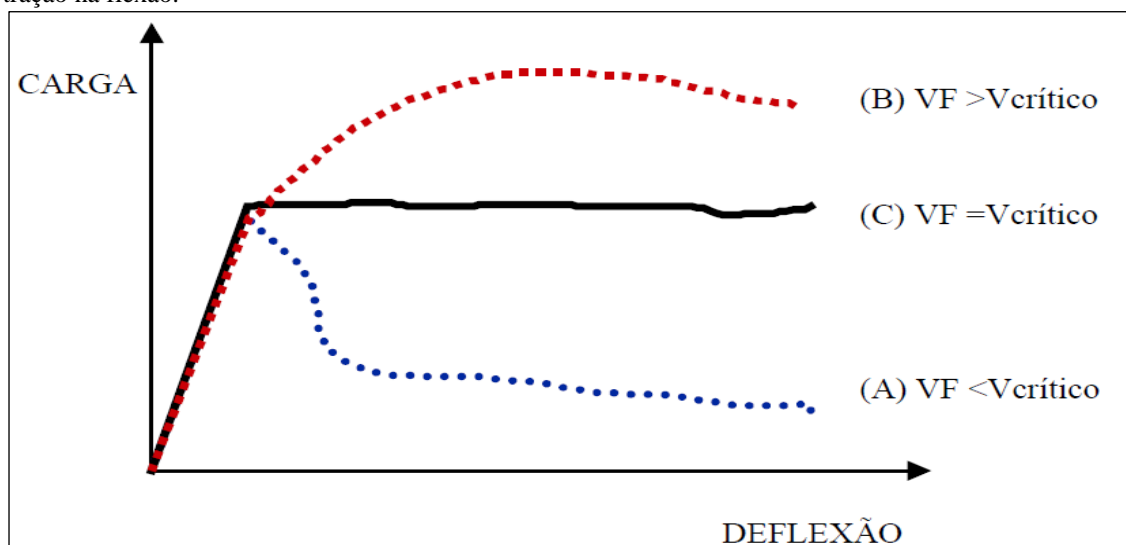
Fonte: Singh, Shukl e Brown, 2004.

### 2.3.3. Volume crítico das fibras

Para Hannant (1978), o volume crítico de fibras é definido como o volume mínimo de fibras suficiente para suportar, após a fissuração da matriz, o carregamento que o compósito suportava antes da fissuração. Figueiredo (2011) preconiza que o primeiro elemento a determinar carga resistiva ao concreto, após a fissuração da matriz, é o volume das fibras (volume crítico). Para tanto, Hannant (1978) ressalta que se o volume crítico for alcançado, o concreto muda seu comportamento de material frágil, com fratura única e de baixo consumo de energia, para um material de comportamento mecânico com melhor desempenho na absorção das sobrecargas.

A Figura 3 ilustra o comportamento do CRF após a ruptura da matriz cimentícia com teores de fibras acima, abaixo e igual ao volume crítico.

**Figura 3** - CRF em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.



Fonte: Figueiredo, 2011.

Na Figura 3 observa-se um trecho elástico linear inicial correspondente ao estágio da pré-fissuração da matriz do CRF e outro trecho referente ao escoamento do mesmo, que diferencia o comportamento do concreto com teores abaixo, acima e igual ao volume crítico.

O volume crítico (teórico) pode ser calculado pelo modelo matemático de Aveston, Cooper e Kelly (1971) que preconizam um compósito ideal, ou seja, fibras contínuas e alinhadas ao eixo das tensões (Equação 1). Figueiredo (2011) destaca que, conforme a modelagem de Aveston, Cooper e Kelly (1971), o volume crítico teórico de fibras no concreto gira em torno de um consumo de aproximadamente 23 Kg/m<sup>3</sup> para fibras de aço e 1 Kg/m<sup>3</sup> para fibras de polipropileno. Dessa forma, esse modelo não representa a realidade vivenciada em estudos práticos, pois as fibras utilizadas nos experimentos apresentam-se curtas e aleatoriamente distribuídas no concreto (descontínuas). Ainda conforme Figueiredo (2011), este fato ocorre devido às fibras se mostrarem com certa inclinação em relação à fissura (não ortogonal a fissura) e ao fato de que a carga de arrancamento que a fibra suportará é inferior ao seu comprimento, sendo, no máximo, equivalente a metade de seu comprimento, caso a fissura ocorra precisamente na metade da fibra.

$$V_{fcrit} = \left( \frac{\varepsilon_{mu} * E_c}{\sigma_{fu}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$V_{fcrit}$  - Volume crítico;

$\varepsilon_{mu}$  - Deformação última da matriz;

$E_c$  - Módulo de elasticidade

$\sigma_{fu}$  - Tensão última das fibras.

#### 2.4. Dosagem de concreto com fibra

O ACI 544.1R (2002) conceitua o concreto reforçado com fibras (*fiber reinforced concrete*) como “concreto feito de cimentos hidráulicos contendo agregados miúdos ou miúdos e graúdos e fibras discretas e descontínuas”. As fibras dificultam o início e a propagação das fissuras da matriz, mas no estado de pós-fissuração, as fibras exercem o seu principal efeito que é de interceptar a progressão das microfissuras, evitando a ruptura brusca.

Um fator considerável para o processo de dosagem é a compatibilização entre o processo de produção do concreto e o tipo da fibra e sua eficiência no estado endurecido. Visto que fibras longas de pequeno diâmetro são mais eficientes no estado endurecido, mas dificultam a mistura e trabalhabilidade no estado fresco. Diante da problemática da compatibilização, são usualmente adotadas algumas estratégias: (i) modificação da fibra (na geometria e na superfície para melhorar a aderência e a mistura), (ii) modificação das propriedades da matriz (com a utilização de aditivos superplastificantes, pozolanas, sílicas, entre outros) e (iii) desenvolvimento de técnicas especiais de produção (processo mais dispendioso).

Numa dosagem de concreto com adição de fibras é indispensável o uso de aditivos plastificantes devido aos seus efeitos benéficos (redução de água e adequação da plasticidade do compósito), no entanto, o cuidado com a dosagem do aditivo é primordial, pois uma superdosagem pode provocar problemas como a segregação dos agregados, o aumento dos efeitos da exsudação, entre outros. Dessa maneira, a dosagem do aditivo é dependente do tipo de material e do aditivo em si, geralmente varia de 0,2% a 2% em massa.

Outra preocupação na dosagem do CRF está em garantir que o volume da fibra a ser utilizada esteja o mais próximo possível do volume crítico, visto que uma dosagem superior ao volume crítico pode gerar, além do desperdício do material, perda da trabalhabilidade do compósito.

Para Mehta e Monteiro (2008) a quantidade máxima de fibra de aço utilizada é cerca de 2% em volume, pois acima deste valor provocará uma acentuada perda de trabalhabilidade. Já para Ramakrishnan (1989, *apud* Góis, 2010) o teor de fibra de aço variando de 0,5% a 2% é suficiente para promover um acréscimo da resistência à flexão de 15% a 129%.

Segundo Figueiredo (2011), no Brasil, o consumo de fibras de aço é normalmente de 30 Kg/m<sup>3</sup> independente do tipo. Quanto às fibras poliméricas, são fixados consumos de 600 g a 1.000 g por metro cúbico. Já Fernandes (2005) reforça que o consumo de fibras de aço para aduelas normalmente varia entre 30 e 60 Kg/m<sup>3</sup>, conforme alguns projetos executados pelo mundo (Tabela 5).

**Tabela 5** - O teor de fibra de aço em projetos que utilizaram o CRF.

<b>Projeto</b>	<b>Resistência do Concreto</b>	<b>Dosagem da Fibra de Aço</b>
Metro de Paris	Desconhecido	60 kg/m <sup>3</sup>
Metro de Napolis	40-50 MPa	40 kg/m <sup>3</sup>
Heathrow Baggage Tunnel	50-60 MPa	30 kg/m <sup>3</sup>

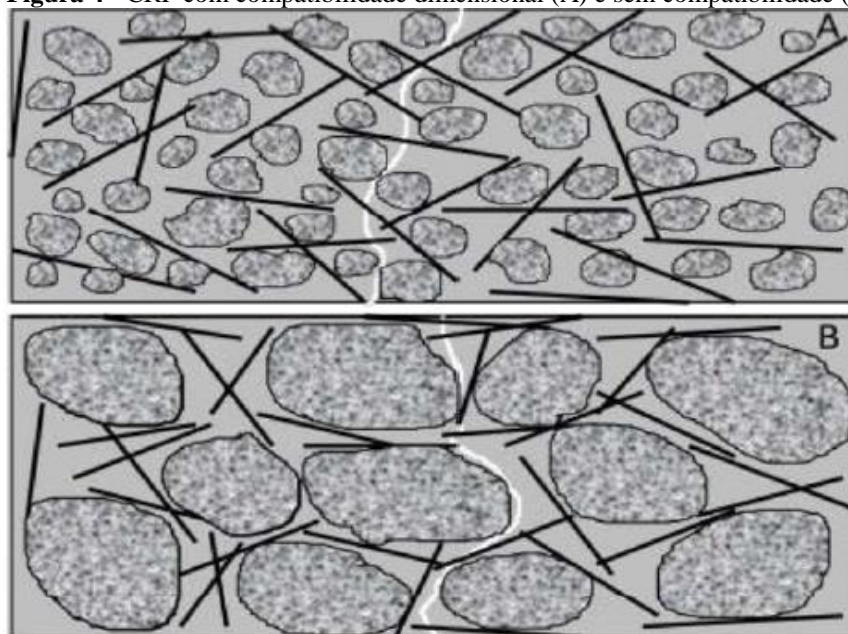
Fonte: Fernandes, 2005.



Figueiredo (2011) afirma que: “atualmente, o que se tem proposto como metodologia de dosagem para concretos com fibras são procedimentos experimentais que complementam aqueles já utilizados para o concreto convencional”.

Conforme Pinto Junior *et al.* (2000), na dosagem de concreto para confecção de um compósito com fibras de aço recomenda-se utilizar uma mistura com maior porcentagem de argamassa, como também, vale ressaltar que o diâmetro máximo do agregado graúdo, não deve ultrapassar 2 vezes o comprimento da fibra, pois o efeito de ponte de transferência de tensões da fibra de aço no compósito pode ficar reduzido. Tal fato ocorre devido à fissura se propagar na interface do agregado graúdo com a pasta (Figura 4).

**Figura 4** - CRF com compatibilidade dimensional (A) e sem compatibilidade (B)



Fonte: Figueiredo, 2011.

Para Salvador (2012), a dosagem de concreto com a incorporação de fibra de polipropileno influencia as propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, sua incorporação durante a mistura provoca uma dispersão entre as fibras e conseqüentemente uma redução da trabalhabilidade, como também, uma diminuição na mobilidade dos agregados. Para o concreto na fase plástica, a fibra de polipropileno por possuir uma alta área superficial absorve água em sua superfície promovendo a redução da exsudação e da segregação. Por fim, no estado endurecido, ocorre a interação das fibras com a matriz no nível das microfissuras, promovendo transferência de tensões com intuito de retardar a propagação de microfissuras na matriz.

Na pesquisa realizada por Nince (2006) foram encontrados 28 trabalhos sobre concreto com adição de fibra de polipropileno expostas a altas temperaturas. Ainda, conforme Nince (2006), não se tem um valor consolidado quanto ao teor mínimo necessário para reduzir/eliminar o lascamento, pois os teores dos estudos variaram de  $450 \text{ g/m}^3$  a  $4.560 \text{ g/m}^3$ .

## 2.5. Métodos de Avaliação da Tenacidade

O controle do CRF está voltado para a análise da interação da matriz cimentícia com a fibra. Para Arif (2014) existe uma série de técnicas disponíveis para determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço, conforme mostrado na Tabela 6.

**Tabela 6** - Métodos de ensaios para determinação da tenacidade especificada para concreto reforçado com fibras de aço.

Norma/Recomendação	Forma do CP	Dimensões do CP (mm)	Parâmetros monitorados	Medida da tenacidade
Norma Americana ASTM C1550 (American Society for Testing and Materials)	Painel Circular	D=800 h=75	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Relação entre a energia absorvida para valores solicitados da deflexão central
Norma Japonesa JSCE-SF4 (Japan Society of Civil Engineers)	Prisma	b=100 ou 150 h = 100 ou 150 L = 300 ou 450 C = 380 ou 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão equivalente a L/150. Fator de tenacidade para uma deflexão equivalente a L/150.
Norma Europeia EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures)	Prisma	b=125 h = 75 L = 450 C = 600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência residual para valores de deflexão de 0,5mm a 4mm.
	Placa	b=600 h = 100 L = 500 x 500 C = 600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão de 25 mm.
FIB 2010 (Fédération Internationale Du Béton)	Prisma	b=150 h = 150 L = 500 C = 550	Carga x abertura de fissura medida no meio do vão.	Limite de proporcionalidade (LOP), resistências residuais para valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm.
ASTM C1609 (American Society for Testing and Materials)	Prisma	b=150 h = 150 L = 450 C = 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistencia de pico, resistências residuais para valores de deflexão de L/600 e L/150.

b = largura do CP; d = altura do CP; L = vão livre entre cutelos; C = Comprimento do CP; D = diâmetro do CP.  
Fonte: ARIF, 2014.

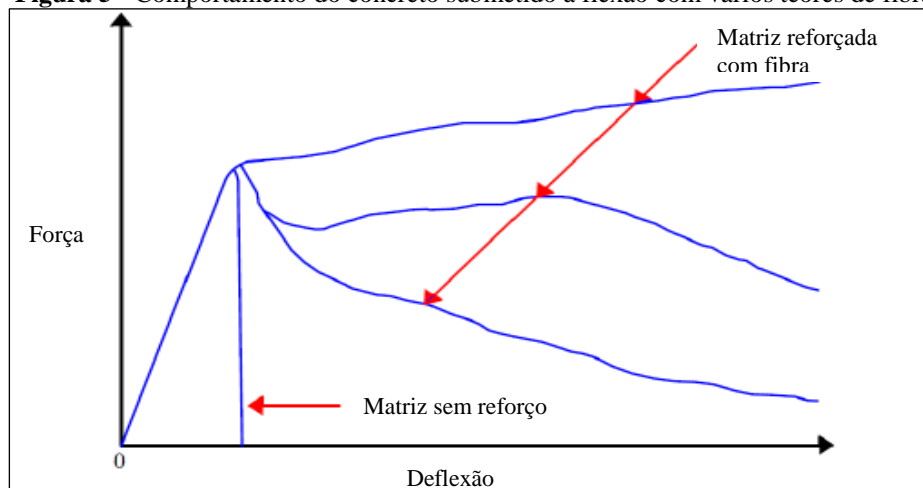
Segundo Robins (1995), os métodos mais empregados para determinação da tenacidade são:

- a) *Japan Society of Civil Engineers (JSCE –SF4, 1984);*

- b) *European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures* (EFNARC, 1996);
- c) *American Society for Testing and Materials* (ASTM C1399, 2002);
- d) *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials Systems and Structures* (RILEM TC162 –TDF, 2002).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o concreto sem a presença de fibras apresenta pequena resistência à tração, baixa capacidade de deformação sendo acometido a uma rápida propagação das fissuras, enquanto, que o concreto reforçado com fibras, tem sua ruptura caracterizada pelo suporte de esforços após a sua fissuração, conforme é evidenciado na Figura 5.

**Figura 5** - Comportamento do concreto submetido à flexão com vários teores de fibras



Fonte: ACI 554 1R, 2002.

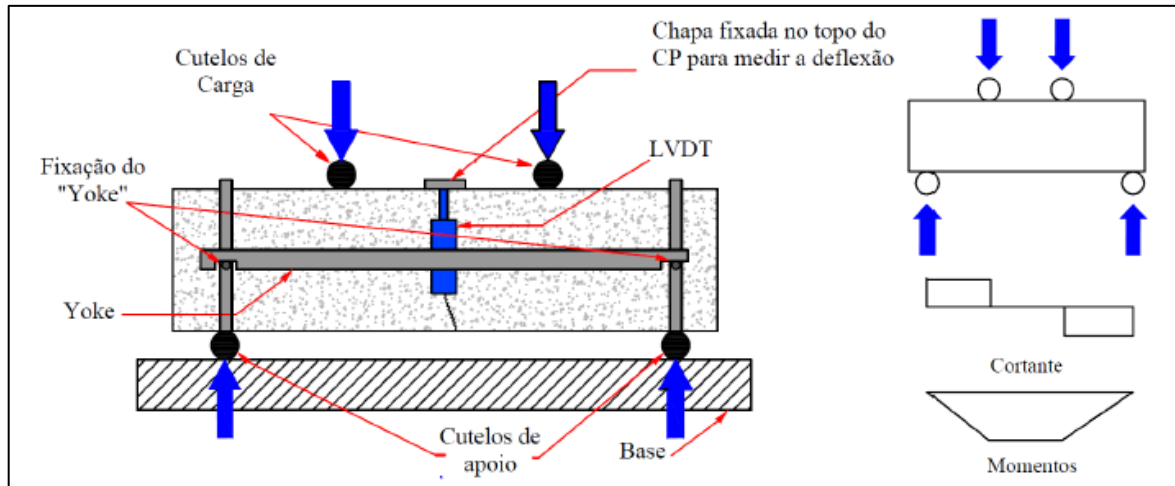
Conforme a ASTM (2002) e JSCE (1984), a tenacidade pode ser influenciada pelo tamanho e pela geometria do corpo de prova, pois quanto maior for às dimensões da seção transversal do corpo de prova, maior será a energia absorvida. Para Villares (2001), a variação das dimensões dos corpos de prova altera o processo de ruptura e a distribuição de tensões.

O intuito dos ensaios elencados acima é avaliar a tenacidade do compósito. O ensaio com maior aplicação no Brasil é o método definido pela *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE-SF4, 1984). Este ensaio consiste num prisma bi apoiado no terço médio com dois apoios centrais que exercem a função de transmitir a carga. A partir do momento em que o carregamento é aplicado, o prisma deforma-se até a ruptura. Nessa situação, o momento máximo é constante e o esforço cortante é nulo no trecho entre os apoios de transmissão da carga.

Através da utilização de células de carga e dos transdutores acoplados ao equipamento (LVDT), é possível transmitir a um computador a leitura simultânea dos dados

de deformação e o carregamento aplicado num determinado tempo de ensaio (Figura 6). De posse dos dados, é possível traçar um gráfico de tensão *versus* deformação com a finalidade de descrever o comportamento mecânico do material (tenacidade), conforme ilustra Figura 7.

**Figura 6** - Esquema de ensaio segundo a JSCE-SF4 (1984) e esforços solicitados de cortante e momentos máximos

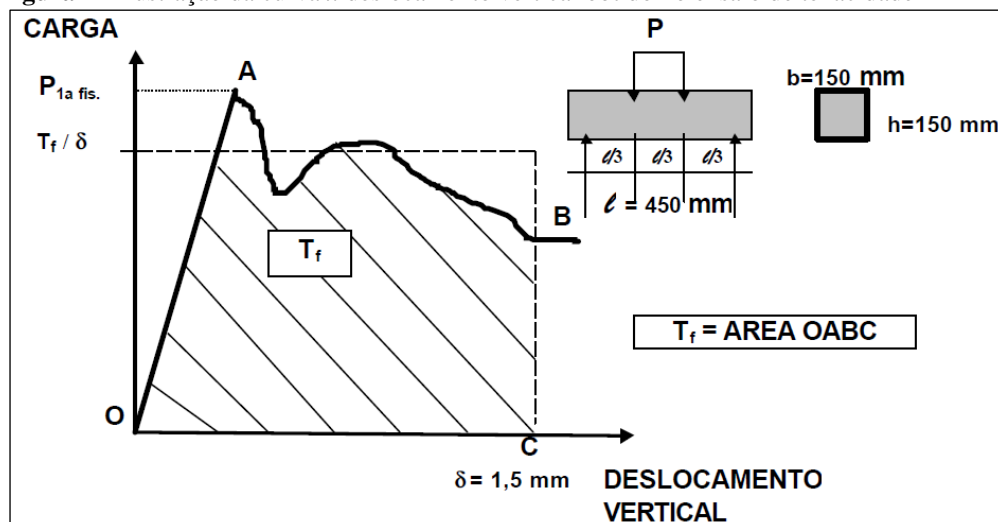


Fonte: ARIF, 2014.

Os prismas podem ser confeccionados com as seguintes dimensões: 100 mm x 100 mm x 400 mm (altura x largura x comprimento) ensaiado com 300 mm de vão ou 150 mm x 150 mm x 500 mm (altura x largura x comprimento) ensaiado com 450 mm de vão. A norma preconiza que a menor dimensão do prisma seja no mínimo maior do que três vezes o comprimento da fibra de aço utilizada (JSCE-SF4, 1984).

A tenacidade do compósito é representada pelo resultado da área total ( $T_f$ ), formada pela curva da carga  $\times$  deslocamento medida em joules ou KN.mm dividida pelo deslocamento  $L/150$  sendo  $L$  (mm) o comprimento do vão do prisma, isto é, a carga média que o compósito suportou durante o ensaio até o dado nível de definido por  $L/150$ .

**Figura 7** - Ilustração da curva  $\times$  deslocamento vertical obtido no ensaio de tenacidade



Fonte: Fernandes, 2005.

De posse do valor da tenacidade ( $T_f$ ), pode-se calcular o Fator de Tenacidade (FT)<sup>1</sup> que representa a média de carga resistiva pelo CRF após a fissuração da matriz expressa em MPa, conforme Equação 2:

$$FT = \frac{T_f}{\delta_{tf}} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

Onde:

FT– Fator de Tenacidade na flexão (MPa);

$T_f$  – Tenacidade na flexão (KN.mm);

$\delta_{tf}$ .- Deslocamento equivalente a L/150 (mm);

$b$  – Largura do corpo de prova (mm);

$h$  – Altura do corpo de prova (mm);

$L$  – Vão do corpo de prova durante o ensaio (mm).

Para Carnio (1998) pode-se calcular a Resistência Equivalente Relativa ( $R_{e,3}$ )<sup>2</sup> onde seu valor é função do tipo da fibra, fator de formada fibra, teor da fibra e resistência da matriz determinada pela Equação 3:

$$R_{e,3} = \frac{f_{e,3}}{f_{ct,M}} \quad (3)$$

Onde:

$R_{e,3}$ – Resistência Equivalente Relativa (%);

$f_{e,3}$  – Resistência Equivalente para Deformação L/150 (Fator de Tenacidade) (MPa);

$f_{ct,M}$ .- Resistência à Tração na Flexão da Matriz do Concreto. (MPa).

Outra forma de se determinar a tenacidade é por meio do ensaio de punção de placas (ROBINS, 1995). Para Figueiredo e Helene (1997), o ensaio de punção de placas possui algumas dificuldades com relação a sua realização:

- a) A placa é muito pesada, aproximando-se facilmente dos 100 Kg, o que dificulta a execução do ensaio tornando-o perigoso para o operador;

<sup>1</sup> Fator de Tenacidade refere-se à Resistência Equivalente para deformação L/150 ( $f_{e,3}$ ) medida em MPa.

<sup>2</sup> Resistência Equivalente Relativa ( $R_{e,3}$ ) também é denominada de Coeficiente de Ductilidade.

- b) Apresenta deformações provocadas na confecção da placa pelo jato do impacto do concreto que dificultam a garantia das condições de apoio contínuo em todos os lados e, conseqüentemente, concentram esforços durante o ensaio;
- c) O ensaio deve ser realizado até que o concreto atinja um nível de 25 mm e, conseqüentemente, um nível muito grande de abertura de fissura.

Outro fator importante para garantir o controle do CRF é a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, onde o incremento da fibra pode provocar algumas alterações. Estas alterações são provocadas por dois fatores básicos: i) dimensões das Fibras; ii) área superficial da fibra (FIGUEIREDO, 2011). A preocupação com a trabalhabilidade e a compactação é justificada, pois estas podem evitar problemas como a formação de ouriços e/ou formação de ninhos de concretagem, problemas estes que comprometem a aderência das fibras no compósito.

Para essa avaliação, o ACI 544.1R (2002) recomenda dois ensaios para avaliar a trabalhabilidade do CRF: i) ensaio de cone invertido e ii) VeBe.

No trabalho de Ceccato (1998) foi comprovado que o ensaio de cone invertido não foi adequado para avaliação da trabalhabilidade do CRF em qualquer teor. Enquanto que no estudo de Ceccato, Nunes e Figueiredo (1997), o ensaio de abatimento de cone conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) apresentou um resultado satisfatório para a medida da consistência de CRF com teores de fibras inferiores a 60 Kg/m<sup>3</sup>.

Conforme ARIF (2014), dentre os métodos de determinação da tenacidade utilizados no Brasil, o método recomendado pela norma japonesa (JSCE-SF4) é 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. Já os demais métodos usam máquina de sistema fechado (*closed loop*) que dificultam o processo do ensaio ocasionado pela presença do *feedback* que manipula e ajusta suas entradas com base num critério previamente determinado.

## **2.6. Impactos das Elevadas Temperaturas sobre o Concreto**

Mehta e Monteiro (2008) revelam que o concreto submetido a altas temperaturas apresenta comportamento diversificado sofrendo influência de vários fatores tais como: composição do concreto, permeabilidade, tamanho da peça e a taxa de aquecimento. Para Castollote *et al.* (2003), a pasta de cimento apresenta-se bastante suscetível a temperaturas

elevadas, pois quando aquecidas sofrem várias transformações químicas, que são responsáveis pelo aparecimento de micro - fissuras e movimentações térmicas diferenciais que comprometem a capacidade portante da estrutura.

Para Silva (2013), as alterações mais presentes em concretos submetidos a elevadas temperaturas são fissuras, deslocamentos, desidratação da pasta e alterações de cor.

### 2.6.1. Alterações da microestrutura do concreto com elevadas temperaturas

Conforme Lima (2005) as alterações microestruturais ocorrem

“[...] nas fases cimentícias (C-S-H, portlandita, etringita, calcita, fases anidras, ar incorporado e misturas), efeito dos agregados e armaduras, adições fibrosas, aplicação ou não de carga durante os ensaios, pois durante o processo de aquecimento, as partículas hidratadas sofrem transformações químicas que originam novos compostos.”

As transformações sofridas no concreto acontecem à medida que a temperatura vai aumentando. Desse modo, com o aquecimento do concreto até 80°C não haverá alterações consideráveis na estrutura. Já entre 80°C e 150°C inicia-se a decomposição da etringita ao mesmo tempo, que ocorre a perda de água adsorvida e interlamelar. De 400°C a 600°C ocorre à formação de pressão de vapor de água que ocasiona a desidratação da portlandita. Acima de 800°C a pasta sofre reações cerâmicas e a 1.100°C inicia-se o derretimento total dos cristais.

Na Tabela 7 constam todas as transformações inerentes ao processo de aquecimento da pasta de cimento conforme Castellote *et al.* (2003).

**Tabela 7** - Transformações sofridas por pastas de cimento durante o aquecimento

Temperatura (°C)	Transformações
20 – 80	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução de forças de coesão.
100	Marco no aumento da permeabilidade a água.
80 – 200	Aumento na taxa de perda d'água capilar e fisicamente combinada.
80 – 850	Perda da água quimicamente combinada.
150	Pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H.
300+	Marco no aumento da porosidade e micro-fissuras.
350	Decomposição de alguns tipos de agregados de rio.
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre.
400 – 600	Dissociação do C-S-H em CaO e água.
573	Transformação da fase? Para? dos agregados quartzosos e ligeira expansão.
550 – 600+	Marco no aumento dos efeitos térmicos.
700+	Dissociação do CaCO <sub>3</sub> em CaO e CO <sub>2</sub> (pasta e agregados carbonáticos).
720	Segundo pico da decomposição do C-S-H em ? C <sub>2</sub> S e CS
800	Modificação das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica.
1.060	Começo do derretimento de alguns constituintes.

Fonte: Castellote *et al.*, 2003.

A perda de água quimicamente combinada que se inicia a 100°C, interfere em todas as propriedades do concreto. As tensões de deslocamentos são dependentes da quantidade de água presente na pasta, visto que, a água liberada pela desidratação da fase cimentícia e dos agregados, como também, a água quimicamente combinada podem influenciar intrinsecamente no fenômeno do lascamento, pois esta água é capaz de se transformar em vapor e gerar poro-pressão (MAJORANA *et al.*, 2003).

Lima (2005) também enfatiza que a perda de água livre, capilar e quimicamente combinada provocada pelo aquecimento, favorece o aumento da porosidade. A quantidade de poros num concreto aumenta com o incremento da temperatura, mas não ocorre de forma linear. Para Andrade *et al.* (2003), quando a faixa de exposição a temperatura ultrapassa os 600°C ocorre um acréscimo no volume total de poros e no tamanho dos poros. Já acima de 900°C o volume dos poros continua a crescer, enquanto que há redução dos poros de pequenos diâmetros.

Outra consequência do aquecimento do concreto é o surgimento de micro-fissuras, que para Georgali & Tsakiridis (2005) é fruto da perda de água sofrida pelos produtos hidratados do cimento e pelas variações volumétricas sofridas pelos agregados e pela matriz cimentícia, após temperaturas superiores a 300°C.

Para Fu & Li (2011), estes fatores responsáveis pelo surgimento de fissuras podem ocorrer de três tipos:

- a) Fissuras de retração, induzidas pela decomposição dos materiais;
- b) Fissuras radiais, tangenciais e nas proximidades do agregado, induzidas pela diferença de comportamento térmico entre a pasta de cimento endurecida e o agregado;
- c) Fissuras internas e externas, induzidas pelo gradiente de temperatura.

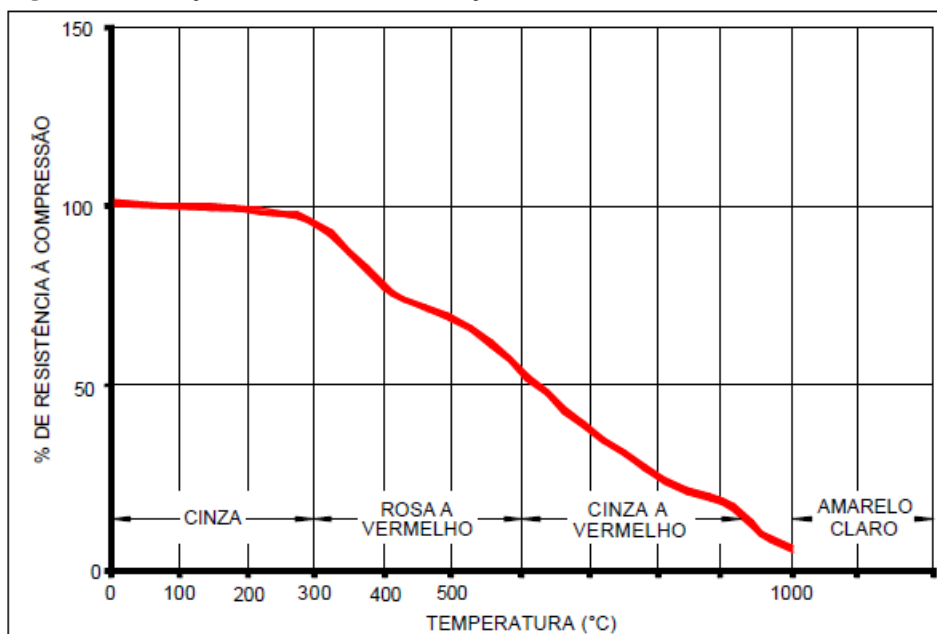
### ***2.6.2. Efeitos macroestruturais da exposição a elevadas temperaturas***

A exposição do concreto a altas temperaturas pode provocar perda de rigidez e redução de resistência mecânica, comprometendo a estabilidade estrutural (LIMA, 2005). Dessa maneira, a análise de estruturas sinistradas tende a começar por meio da inspeção visual, com o intuito de verificar as alterações de coloração do concreto, pois esta alteração pode estar ligada a perda de resistência (LIN *et al.*, 1996).



Para melhor elucidação foi utilizada a Figura 8 que representa as alterações de coloração do concreto correlacionada com a resistência mecânica em diferentes patamares de temperatura.

**Figura 8** - Alteração na resistência e coloração do concreto



Fonte: Cánovas, 1998.

Conforme a Figura 8 de Cánovas (1998) pode-se revelar que até 200°C a coloração do concreto torna-se acinzentada e sem redução de resistência à compressão. A partir daí até cerca de 300°C, tem-se constatado a perda média de 10% da resistência. Já entre 300°C a 600°C ocorre mudança de coloração de rosa para vermelho e as perdas de resistência à compressão são da ordem de 50%. No patamar de 600°C a 950°C, o concreto apresenta uma tonalidade acinzentada com pontos avermelhados e resistência ainda em decréscimo. Diante de temperaturas entre 950°C a 1.000°C a cor sofre mudanças, modificando-se para amarelo alaranjado, dando início ao processo de sinterização. E por fim, entre 1.000°C e 1.200°C é intensificado o processo de sinterização, onde a resistência mecânica é praticamente nula.

Conforme Lima (2005), o concreto sofrerá menos a altas temperaturas se for composto por agregados com baixo coeficiente de dilatação térmica e boa granulometria, como também, apresentar um concreto com características de boa compactação, baixa condutividade térmica, baixa umidade e alta resistência à tração.

### 2.6.3. Lascamento (*Spalling*)

O lascamento do concreto, expresso pelo meio técnico através do termo inglês *Spalling*, representa um fenômeno físico caracterizado pelo desprendimento violento ou não, de camadas ou pedaços da superfície de elementos sujeitos a elevadas temperaturas (NINCE, 2006).

Segundo Kalifa, Menneau & Quenard (2000), o *spalling* é tecnicamente resultado de dois processos independentes e que ocorrem simultaneamente no interior da massa do concreto submetido a elevadas temperaturas. O primeiro processo é *termo-mecânico* que está intrinsecamente relacionado ao surgimento de tensões geradas pelos gradientes de deformação térmica. O segundo é denominado de *termo-hidráulico*, que está associado à transferência de massa, através dos poros, resultando no aparecimento de gradientes de pressão no interior da massa.

Conforme Anderberg (1997), a pressão de vapor representa o maior fator de influência do *spalling* na maioria dos casos. Sobretudo são inúmeras as possíveis causas de sua ocorrência, conforme demonstrado na Tabela 8.

**Tabela 8** - Prováveis causas da ocorrência do *Spalling*

<b>Estrutura</b>	<b>Prováveis Causas do <i>Spalling</i></b>
Macroestrutura	Água livre em excesso (concretos saturados).
	Alta densidade (compacidade).
	Elevados gradientes térmicos.
	Distribuição não-uniforme da temperatura nas peças
	Secções transversais delgadas
Microestrutura	Altas taxas de armaduras.
	Pressão de vapor.
	Tensões térmicas.
	Transformações mineralógicas dos agregados.

Fonte: Anderberg, 1997.

Conforme Fu & Li (2011), as fissuras desempenham um duplo papel sobre as propriedades do concreto submetido a elevadas temperaturas. De um lado, as fissuras podem favorecer o escapamento da pressão de vapor reduzindo a probabilidade da ocorrência do *spalling*. Por outro lado, pode enfraquecer a resistência do concreto comprometendo a capacidade portante da estrutura.

Lima (2005) afirma que a ocorrência do *spalling* é dependente da “[...] interação entre a pressão nos poros e o desenvolvimento de fissuras e que estão estreitamente relacionadas com a taxa de aquecimento e com a heterogeneidade do material.”.

Na literatura são definidos cinco tipos de lascamentos e Silva (2013) os conceitua como:

O **lascamento de agregado** ocorre quando o agregado está próximo da superfície e se desprende do concreto devido a sua expansão térmica, deixando pequenas crateras na superfície. O mesmo por ser causado pelo surgimento de tensões de cisalhamento, frente a altas taxas de aquecimento, ou pela ruptura do agregado em função da temperatura máxima atingida e em decorrência de transformações físicas ou químicas. Normalmente os danos ao concreto devido a este tipo de deslocamento, não são graves, e sua ocorrência fica limitada aos primeiros 20 minutos do incêndio. O processo não remove grandes quantias da seção transversal do elemento, nem afeta o cobrimento da armadura.

O **lascamento de quina** ocorre quando os cantos vivos de um elemento estrutural se desprendem do resto após 30 minutos de exposição ao calor. Connly apud Hertz apud Nince (2006) comenta inclusive que após o resfriamento da estrutura, chega a ser possível retirar os pedaços lascados com a própria mão, afirmando que este tipo de lascamento é a combinação da fissuração com as tensões térmicas na superfície. Este fenômeno parece ser governado mais pela temperatura do elemento do que pela taxa de aquecimento, podendo ser minimizado pelo emprego de concretos com baixo coeficiente de dilatação térmica, com razoável resistência residual após aquecimento e com a presença de fibras.

O **lascamento superficial** é definido como uma esfoliação gradual e progressiva de grandes extensões (aproximadamente 100 x 100 mm e espessura de 25 a 50 mm) e a área afetada pode se estender por todo o elemento, particularmente em concretos de alta resistência, deixando novas camadas expostas. Este tipo de lascamento pode implicar na exposição direta da armadura ao calor e ocasionar alterações na resistência ao fogo do elemento. Este tipo de lascamento ocorre quando as tensões originadas pela poro-pressão superam a resistência do material.

O **lascamento durante o resfriamento** do concreto é função da absorção de umidade pelo material e da consequente re-hidratação do CaO, que é acompanhada de uma expansão, como já discutido. O CaO pode ser produzido durante o aquecimento, pela reação de desidratação do  $\text{Ca(OH)}_2$ , que ocorre a temperaturas próximas a  $400^\circ\text{C}$ , e/ou pela reação de descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$ , que se transforma em CaO, liberando  $\text{CO}_2$ , quando as temperaturas do material estão entre  $600^\circ\text{C}$  e  $700^\circ\text{C}$ . Este problema pode ser minimizado através de medidas que reduzem a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCO}_3$  no concreto aquecido.

O **lascamento explosivo** ocorre repentina e violentamente, com grande liberação de energia e perda parcial de matéria, formando grandes cavidades nos primeiros trinta a quarenta minutos de exposição ao fogo. Normalmente é restrito a áreas não armadas e não se estende às camadas de concreto atrás das armaduras. Este se caracteriza pela separação forçada de camadas de concreto e pela emissão de um som típico de explosão. O fenômeno pode ocorrer por meio de uma única ou de uma sequência de explosões.

Para Khoury e Majorana (2001), a classificação do lascamento é dividida entre o tipo, o tempo de ocorrência, o nível do dano e os esforços que influenciam na sua ocorrência, conforme as Tabelas 9 e 10.

**Tabela 9** - Classificação do tipo de lascamento

Lascamento		Tempo de Ocorrência (min.)	Natureza	Som	Nível dos danos
Categoria	Tipo				
1	Do agregado	7-30	Splitting	Pipoca	Superficial
2	Superficial	7-30	Violento	Fissuração	Pode ser sério
3	Explosivo	7-30	Violento	Estouro	Sério
4	Das quinas	30-90	Não violento	Nenhum	Pode ser sério

Fonte: Khoury e Majorana, 2001.

**Tabela 10** - Fatores que influenciam em cada tipo de lascamento

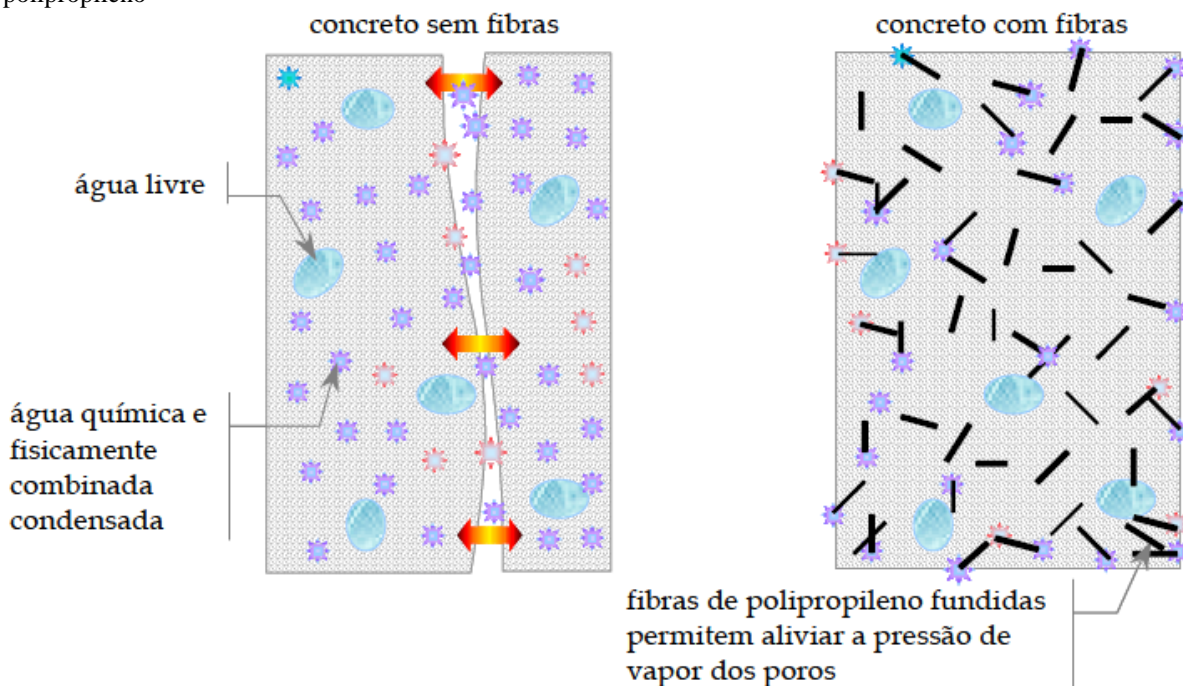
Fatores que influenciam	Tipos de Lascamento			
	Do agregado	Superficial	Explosivo	De quina
Expansão térmica do agregado	X		X	X
Difusividade térmica do agregado	X			
Tamanho do agregado	X		X	
Resistência à tração		X		X
Resistência ao cisalhamento			X	
Carregamento/restrições			X	
Armadura			X	X
Idade			X	
Taxa de aquecimento	X	X		
Perfil do aquecimento			X	
Permeabilidade		X	X	
Umidade	X	X	X	
Temperatura máxima				X
Formato da seção			X	
Tamanho da seção			X	

Fonte: Khoury e Majorana, 2001.

Em se tratando da prevenção do lascamento, pode-se atenuá-lo por meio do uso de filamentos fibrosos para diminuir as tensões internas do concreto, evitando colapso imediato, oferecendo maior tempo para eventuais medidas de segurança. Para Sun & Xu (2009), as fibras de polipropileno são as mais usuais porque além de ajudar na redução do lascamento, melhoram algumas propriedades do concreto, tais como resistência à compressão e a retração plástica.

O fundamento técnico para o uso de fibras de polipropileno para evitar o *spalling* está baseado no princípio de que as fibras derretem com o aumento da temperatura, provocando poros adicionais no concreto que permitem a fuga dos gases quentes para a superfície, reduzindo a poro-pressão e conseqüentemente minimizando a probabilidade do *spalling* conforme ilustração na Figura 9.

**Figura 9** - Alívio da pressão interna de vapor no concreto através de canais formados pela fusão das fibras de polipropileno



Fonte: WALRAVEN apud COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002.

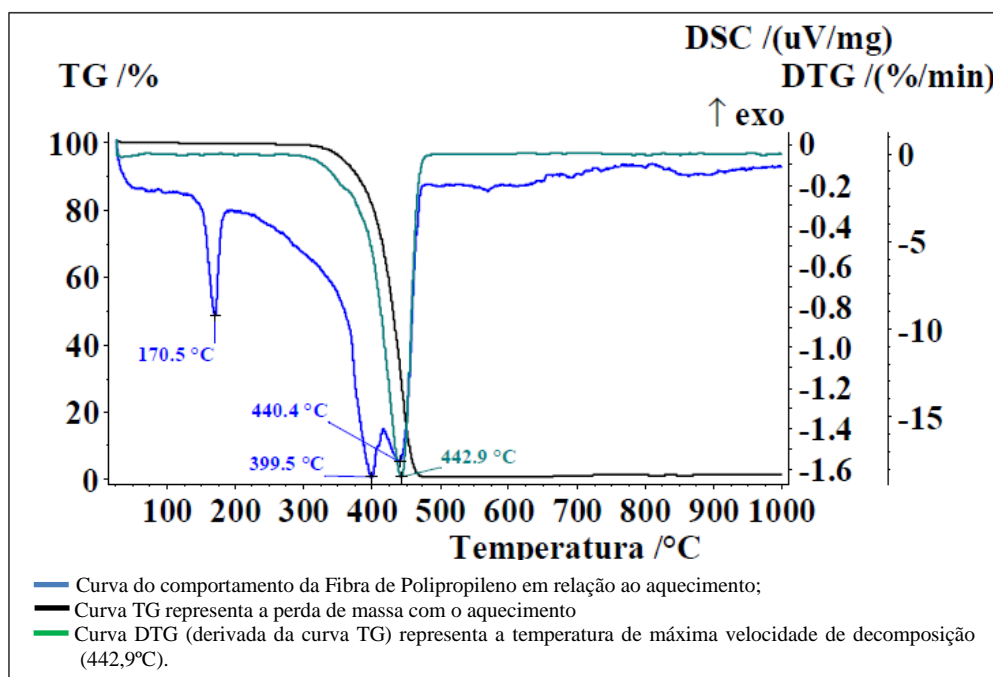
Ainda para Hertz; Sorensen (2005) e Hertz (2003), a grande vantagem da aplicação da fibra de polipropileno na redução do lascamento é a formação de novos poros na matriz do concreto após a fusão das fibras, ocasionando a formação de fissuras térmicas a aproximadamente 5 cm da fase exposta, aliviando assim as tensões de compressão térmica existentes.

Outra razão da eficiência das fibras de polipropileno foi evidenciada por Sullivan (2004), que em seu estudo revelou que a incorporação de fibras de polipropileno além de aliviar a pressão de vapor nos poros, gera incompatibilidade de movimentos com a argamassa, provocando microfissuras antes de sua fusão.

A Figura 10 demonstra a hipótese de derretimento das fibras e a criação de vazios, pois revela o ponto de fusão a 170,5°C e a 399,5°C o ponto de evaporação, e por fim o ponto de ignição a 442,9°C, onde ocorre a desintegração total da fibra.

Para Kalifa; Chéné; Gallé, (2001), ao se fundir a fibra ocorre uma rápida dilatação de aproximadamente 10%, que por sua vez, cria tensões de tração na matriz e consequentemente pode ajudar a nucleação de microfissuras na matriz do concreto.

**Figura 10** - Curva DSC<sup>3</sup>/TG<sup>4</sup> e DTG<sup>5</sup> da fibra de polipropileno



Fonte: Nince, 2006.

Conforme o fabricante (FibroMac), a fibra de polipropileno é utilizada com o intuito de promover o desempenho do concreto endurecido aumentando sua resistência quanto:

- a) Ao desgaste, pois através do controle da exsudação, evita-se o aumento da relação água/cimento responsável pela diminuição da resistência do concreto;
- b) Ao impacto, uma vez que, controlam o índice e profundidades das fissuras, ajudando a preservar a integridade da estrutura;
- c) Ao fogo, uma vez que na fundição das fibras a altas temperaturas, são criadas micro-canais que aliviam a pressão gerada pelos vapores d'água causadores do fenômeno “*spalling*”, aumentando o tempo de degradação das estruturas em caso de incêndios.

<sup>3</sup> DSC - Calorimetria exploratória diferencial – É uma técnica de análise térmica na qual a variação de **energia** (perda ou ganho) de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura.

<sup>4</sup> TG – Termogravimetria – Técnica de análise térmica na qual a variação de **massa** (perda ou ganho) de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura.

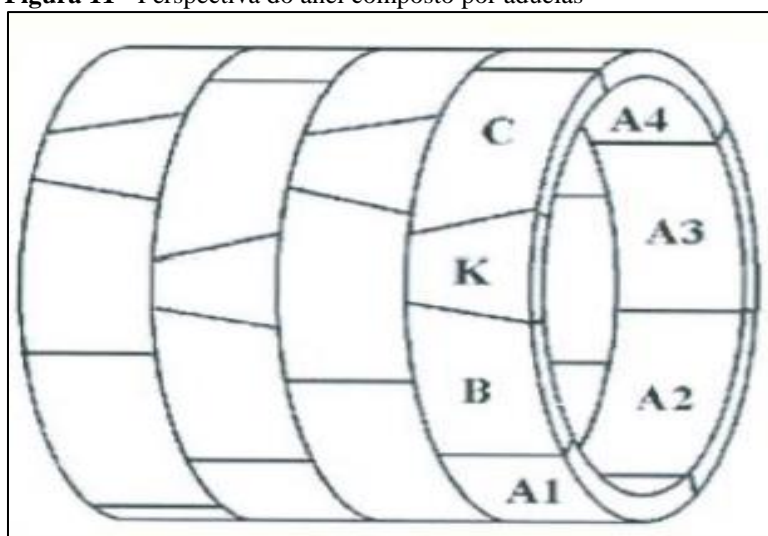
<sup>5</sup> DTG – Termogravimetria Derivada – É a derivada primeira da curva TG em função do tempo ou da temperatura. Nesse modo, os degraus observados nas curvas TG são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais às alterações de massa com o aquecimento da amostra.

## 2.7. Aduelas para revestimento de túnel

Aduelas são peças de concreto produzidas em usina de pré-fabricados, sendo parte integrante da tecnologia construtiva da *Tunnel Boring Machine* (TBM). Normalmente em sua produção utiliza-se concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno, onde estas, por sua vez ajudam a controlar a fissuração, pois funcionam como ponte de transferência de tensões, como também, conferem tenacidade ao concreto, permitindo que este possa sofrer deformações plásticas em áreas de possíveis rupturas sem que ocorram grandes perdas de sua resistência (PINTO JUNIOR, 2003). Para sua confecção são empregadas formas metálicas que devem conferir estabilidade volumétrica, pouca aderência ao concreto e estanqueidade.

Conforme Pinto Junior (2003), o revestimento do túnel é composto por anéis de concreto reforçado com fibras formado pela junção de peças individuais chamadas de segmentos (aduelas) intertravadas longitudinalmente por um sistema tipo macho e fêmea. Na formação de um anel típico são utilizadas aduelas iguais, além da aduela de menor tamanho (segmento chave) que tem o papel de fechar o anel e concluir um passo de avanço (Figura 11).

**Figura 11** - Perspectiva do anel composto por aduelas



Fonte: Especificação Técnica do METROFOR, 2013.

O processo de produção das aduelas é marcado por dois procedimentos cruciais de qualidade: o controle tecnológico do concreto e o controle dimensional das peças. Outro fator importante é a garantia do tempo ideal para a desforma, pois Libório (1990) afirma que a desforma de elemento pré-moldado com baixas resistências mecânicas pode deixar as peças pré-moldadas mais suscetíveis a quebras, deformações excessivas ou mesmo ao aparecimento

de pequenas fissuras. Já a especificação técnica do metrô de Fortaleza preconiza que as aduelas sejam submetidas a processo de cura térmica para garantir uma rápida desforma com resistência de 10 MPa a 15 MPa.

Para Fernandes (2005), o concreto com fibras de aço e de polipropileno vem sendo largamente utilizado na confecção de aduelas por promover algumas vantagens:

- a) Aumento da Ductilidade – Com a incorporação da fibra de aço, tem-se um aumento do comportamento pseudo-dúctil do compósito, provocando o aumento da capacidade de deformação e de absorção de energia (tenacidade);
- b) Diminuição dos Reparos – Com a adição das fibras de aço ocorre um ganho maior na resistência ao impacto que evita prováveis quebras das bordas das peças, minimizando a ocorrência de problemas com reparos;
- c) Reforço Estrutural – Pelo incremento das fibras, o concreto se torna capaz de absorver esforços de tração localizados que surgem durante o processo do transporte e/ou instalação, oferecendo menos riscos em relação à segurança e à integridade estrutural;
- d) Benefícios Adicionais – Incremento de fibras sintéticas (polipropileno) com o intuito de reduzir os deslocamentos explosivos do concreto frente a ações nocivas do fogo.

Para Fernandes (2005), a combinação de diferentes tipos de fibras (aço e polipropileno) em aduelas provou,

[...] ser importante tanto na fase construtiva, através do significativo aumento da resistência ao impacto, quanto na fase executiva, onde pode aumentar a resistência ao lascamento frente ao eventual ataque por fogo.

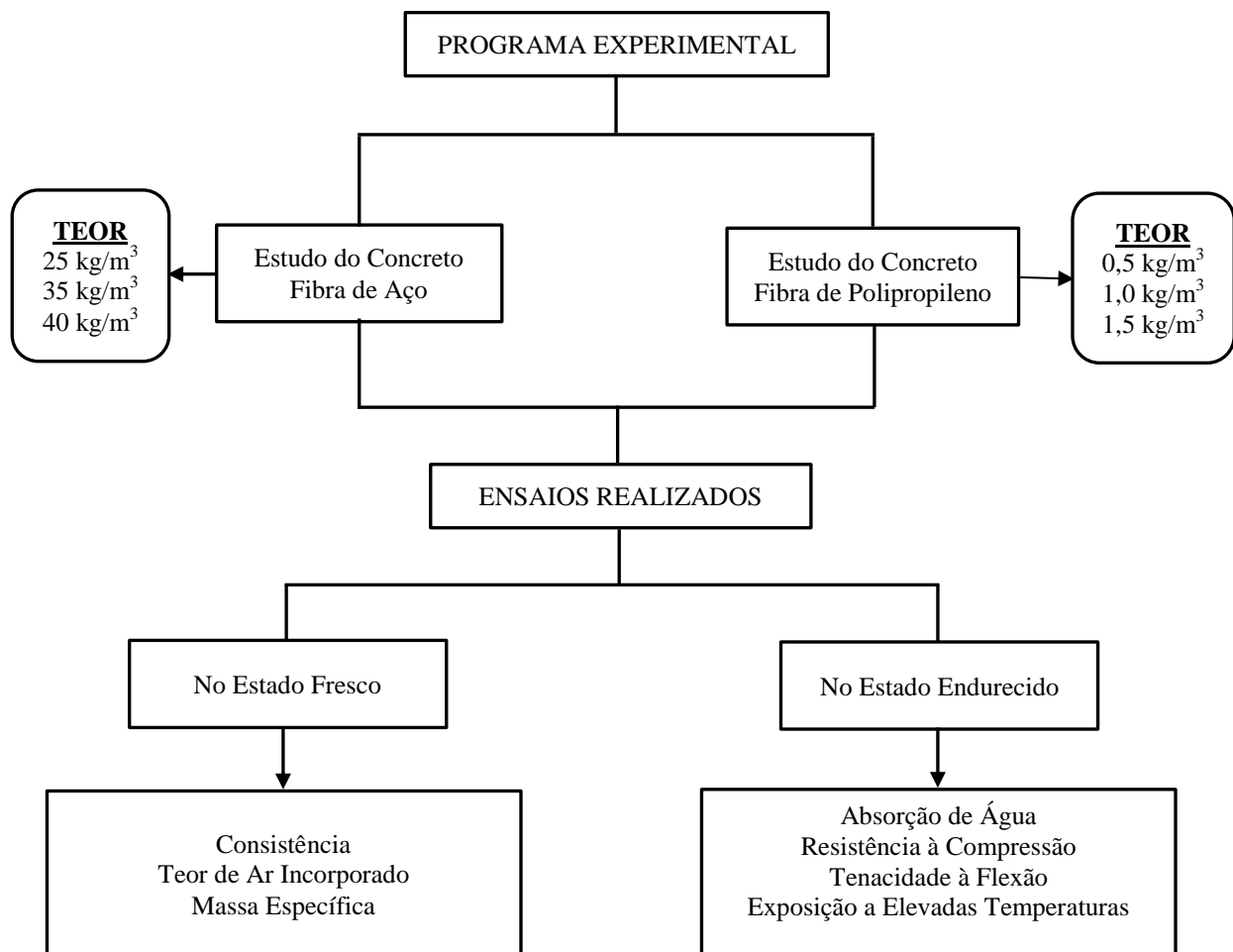


### 3. MATERIAIS UTILIZADOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados na produção do concreto com adição de fibras (CRF), bem como, todos os ensaios realizados no programa experimental.

O programa experimental foi dividido em duas etapas com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras (aço e polipropileno) para confecção de anéis pré-moldados segmentados do revestimento de metrô.

**Figura 12** - Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A primeira etapa do programa experimental denominada de avaliação das propriedades mecânicas do concreto com fibras de aço consiste em verificar o desempenho da fibra de aço no ganho de tenacidade através de corpos-de-prova de pequenas dimensões, com o intuito de realizar uma parametrização simultânea do controle de produção das aduelas.

A segunda etapa do programa, denominada de avaliação das propriedades mecânicas do concreto com fibras de polipropileno, consiste na verificação da ocorrência ou

não do efeito *spalling* nos corpos de prova sem e com adição de fibra de polipropileno, submetidos a elevadas temperaturas.

O concreto com fibras foi produzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC).

### 3.1. Materiais

Foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto, conforme prescrições da NBR 5.738 (ABNT, 2015b) que utilizaram os seguintes materiais expostos abaixo.

#### 3.1.1. Cimento Portland CP VARI RS

Para a produção do concreto dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos foi utilizado o cimento CP VARI RS da marca MIZU, pois apresenta um teor quase nulo de adições e portanto não influenciará nas propriedades mecânicas em idades futuras. Na Tabela 11 constam as características físicas e químicas do cimento utilizado.

**Tabela 11** - Caracterização do aglomerante

Propriedades Físicas		Resultados	Limite	Método de Ensaio
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )		3,00	-	NBR NM 23 (ABNT, 2001a)
Pasta de Consistência (%)		32,00	-	NBR NM 43 (ABNT, 2003c)
Finura peneira 75 mm		0,94	≤ 6 %	NBR 11.579 (ABNT, 2013)
Tempo de pega (min.)	Início de pega	100,00 min	≥ 60 min	NBR NM 65 (ABNT, 2003e)
	Fim de pega	205,00 min	≤ 600 min	
Expansividade (mm)	a quente	1,30 mm	≤ 5 mm	NBR 11.582 (ABNT, 2016)
	a frio	1,00 mm	≤ 5 mm	
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	21,80 MPa	≥ 14 MPa	NBR 7.215 (ABNT, 1997)
	3 dias	30,00 MPa	≥ 24 MPa	
	7 dias	36,40 MPa	≥ 34 MPa	
Propriedades Químicas		Resultados	Limite	Método de Ensaio
Resíduo Insolúvel (%)		0,97 %	≤ 1 %	NBR NM 15 (ABNT, 2012b)
Perda ao fogo (%)		3,98 %	≤ 4,5 %	NBR NM 18 (ABNT, 2012d)
Teor de óxido de magnésio (%)		1,36 %	≤ 6,5 %	NBR 6.473 (ABNT, 2003a)
Teor de trióxido de enxofre (%)		3,09 %	≤ 3,5%	NBR NM 16 (ABNT, 2012c)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Como revelado na Tabela 11 todas as propriedades físicas e químicas do aglomerante foram atendidas.

### 3.1.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia lavada de rio procedente da Mineradora TVJ LTDA, do bairro Lagoa Redonda, no município de Aquiraz - CE.

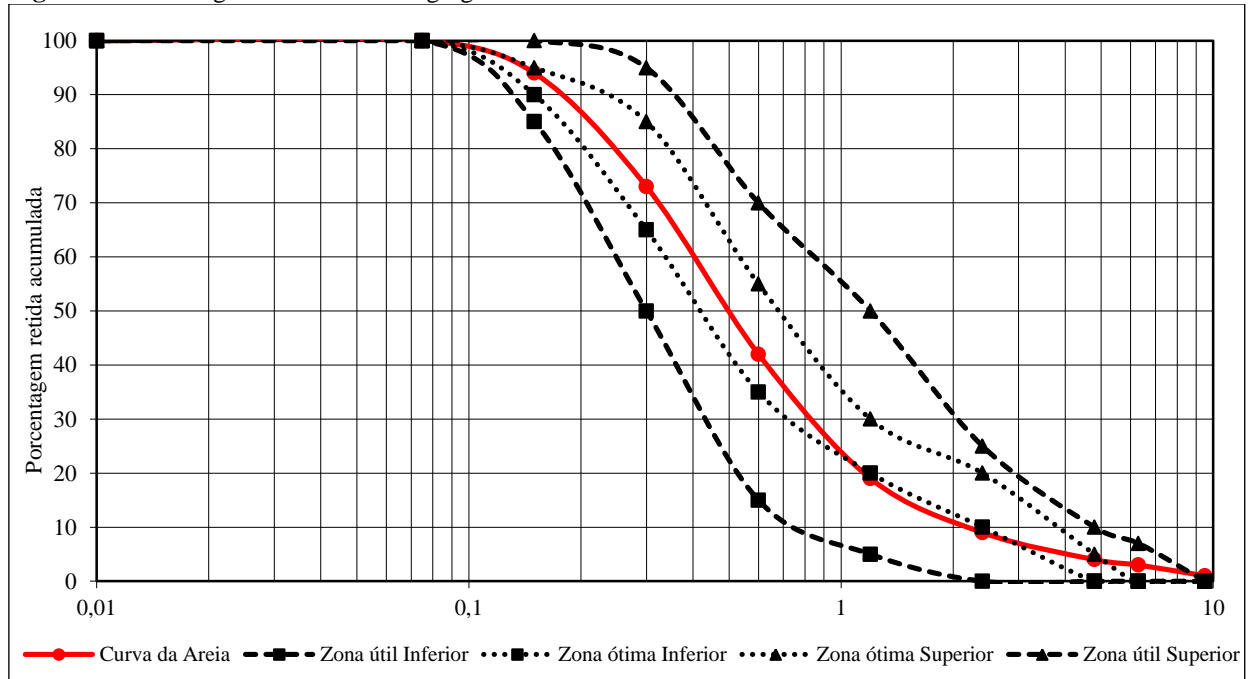
O ensaio de petrografia revelou uma amostra composta basicamente, por quartzo, muscovita e feldspato (Tabela 12). Apresenta-se na Figura 13 a curva granulométrica referente ao agregado miúdo, revelando que o enquadramento do agregado nos limites granulométricos está parcialmente dentro da zona ótima, conforme NBR 7.211 (ABNT, 2009c). Os demais ensaios apresentaram valores compatíveis aos normatizados, com exceção do ensaio de teor de cloretos solúveis que se mostrou em desacordo com o parâmetro limite normatizado (Tabela 13).

**Tabela 12** - Ensaio de descrição Petrográfica do agregado miúdo.

Descrição	Arredondamento	Esfericidade	Composição	Porcentagem (%)
Areia Grossa	0,7	0,7	Quartzo	85
			Feldspato	10
			Micas	5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 13** - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Tabela 13** - Caracterização do agregado miúdo

Ensaio Realizado	Resultados	Limite	Método de Ensaio
Granulometria	DMC = 4,75 MF = 2,42	-	NBR NM 248 (ABNT, 2003b)
Absorção de Água (%)	0,85	-	NBR NM 30 (ABNT, 2001b)
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,63	-	NBR NM 52 (ABNT, 2009g)
Massa Unitária no estado solto (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,46	-	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Impurezas Orgânicas	Satisfatório	Satisfatório	NBR NM 49 (ABNT, 2001c)
Argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,3	≤ 3,0%	NBR 7.218 (ABNT, 2010)
Teor de material pulverulento (%)	3,4	≤ 5,0%	NBR NM 46 (ABNT, 2003d)
Teor de cloretos solúveis (%)	0,12	< 0,1%	NBR 9.917 (ABNT, 2009f)
Teor de sulfatos solúveis (%)	< 0,01	< 0,1%	NBR 9.917 (ABNT, 2009f)
Inchamento	1,22		NBR 6.467 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Apesar do resultado do teor de cloretos solúveis ter excedido o limite permitido, pode-se empregar este agregado miúdo na confecção do concreto, pois o teor total de cloretos trazidos por todos os componentes certamente não excederá 0,40% para concreto armado em condições não severas.

### 3.1.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi procedente da Pedreira NORDBRITA.

O ensaio de petrografia do agregado graúdo revelou uma rocha com textura porfirítica<sup>6</sup> em matriz fanerítica<sup>7</sup>, inequigranular<sup>8</sup> conforme apresentado na Tabela 14.

**Tabela 14** - Ensaio de descrição Petrográfica da rocha

Descrição	Composição	Porcentagem (%)
Rocha com textura porfirítica em matriz fanerítica, inequigranular.	Quartzo (Qtz)	36
	Feldspato Potássico (Kf)	50
	Biotita (Bt)	10
	Minerais Opacos (Opc)	4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As curvas granulométricas dos agregados graúdos (Figura 14) revelaram que a brita denominada tipo zero encontra-se entre as zonas granulométricas para agregados de 4,75/12,5 e 9,5/25 e a brita denominada tipo 1, está dentro da zona para agregados de 9,5 mm

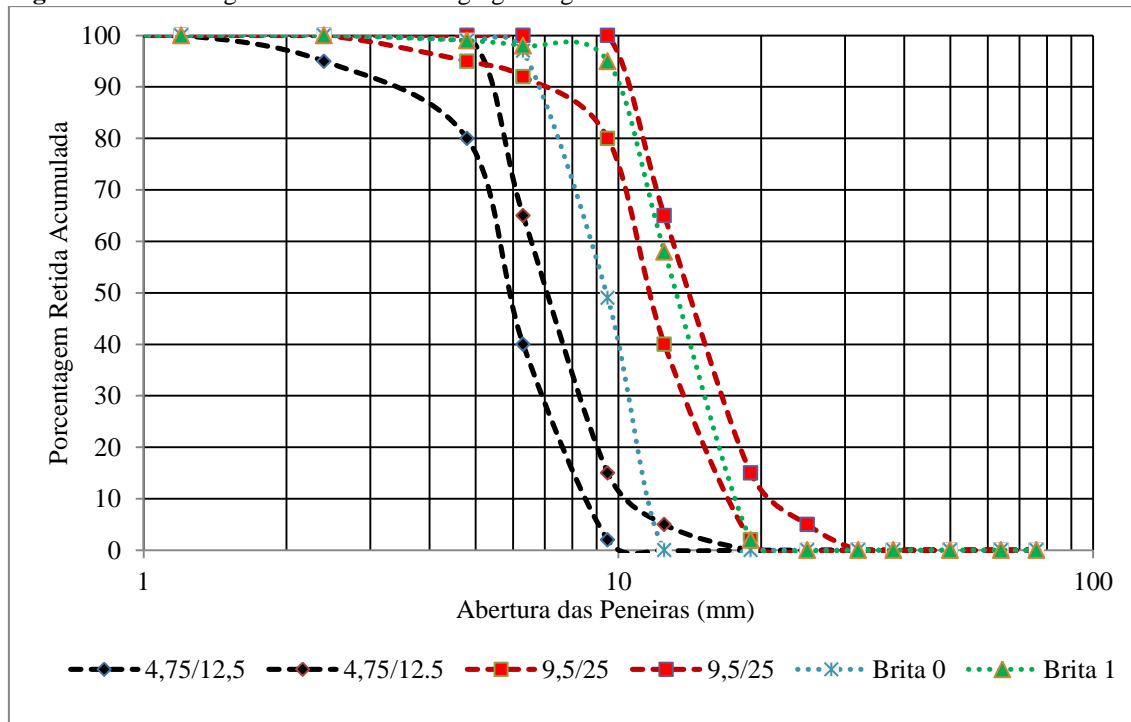
<sup>6</sup> Porfirítica é um tipo de textura inequigranular em que os cristais de maiores dimensões estão envolvidos por uma matriz fanerítica de grão mais fino;

<sup>7</sup> Fanerítica classificação quanto à dimensão dos cristais, onde os cristais são visíveis e identificáveis a vista desarmada;

<sup>8</sup> Inequigranular é uma classificação quanto ao tamanho relativo dos cristais, onde os cristais diferem substancialmente no tamanho.

a 25mm. Por fim, foram realizados mais 9 (nove) ensaios de caracterização que apresentaram valores compatíveis aos limites normatizados (Tabela 15).

**Figura 14** - Curvas granulométricas dos agregados graúdos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Tabela 15** - Caracterização dos agregados graúdos

Ensaio 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 (ABNT, 2003b)
Absorção de Água (%)	0,80	0,70	-	NBR NM 30 (ABNT, 2001b)
Massa Específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,60	2,60	-	NBR NM 53 (ABNT, 2009h)
Massa Unitária no estado solto (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,35	1,42	-	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa Unitária no estado compactado (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,48	1,55	-	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,00	0,00	≤ 3,0%	NBR 7218 (ABNT, 2010)
Teor de material pulverulento (%)	0,63	0,40	≤ 1,0%	NBR NM 46 (ABNT, 2003d)
Reatividade potencial de álcalis em agregado - Método Acelerado (%)	0,06	0,06	< 0,19%	NBR 15.577-4 (ABNT, 2009a)
Abrasão Los Angeles (%)	38,80	35,60	≤ 50%	NBR NM 51 (ABNT, 2001d)
Índice de Forma	2,40	2,20	≤ 3,0	NBR 7809 (ABNT, 2008)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.1.4. Aditivo

As características dos aditivos superplastificantes que foram utilizados na dosagem dos concretos estão apresentadas na Tabela 16.

**Tabela 16** - Características dos aditivos utilizados


<b>SIKA VISCOCRETE 5800 FTN</b>	<b>SIKAMENT RM 300</b>
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: $1,18 \pm 0,02 \text{ Kg/Litro}$

Fonte: Ficha Técnica do Aditivo - SIKA.

### 3.1.5. Fibras


As características das fibras utilizadas no estudo estão explicitadas nas Tabelas 17 e 18. A fibra de polipropileno utilizada é da marca FibroMac<sup>®</sup> 6 composta por filamentos extremamente finos, produzida a partir de processo de extrusão. A fibra de aço utilizada é da marca Wirand<sup>®</sup> 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 (ABNT, 2007a).

**Tabela 17** - Características da Fibra de Aço

<b>Características</b>	<b>Fibra de aço</b>	<b>Imagem</b>
Resistencia à Tração	> 1.100 MPa	
Diâmetro Nominal da Fibra (d)	0,75 mm	
Comprimento Nominal (l)	50 mm	
Fator de Forma (relação l/d)	67	
Unidade/Kg	5.767	
Módulo Elástico	210.000 MPa	

Fonte: Maccaferri, 2014.

**Tabela 18** - Características da Fibra de Polipropileno

<b>Características</b>	<b>Fibra de Polipropileno</b>	<b>Imagem</b>
Peso Específico	0,91g/cm <sup>3</sup>	
Ponto de Fusão	160° C	
Ponto de Ignição	365° C	
Comprimento Nominal	6 mm	
Seção	Circular	
Diâmetro	18µm	
Nº de fibra/Kg	720.000.000	
Resistência à tração	300 Mpa	
Módulo de Young	3.000 Mpa	

Fonte: Maccaferri, 2014.

Para a fibra de aço procedeu-se um controle de recebimento conforme parâmetros da norma NBR 15.530 (ABNT, 2007a). Na sua verificação dimensional foram analisadas 60

fibras de aço através da utilização de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm. Os resultados obtidos constam na Tabela 19.

**Tabela 19** - Verificação dimensional da Fibra de Aço

Fibra de Aço	Dimensão Média
Comprimento	49,81±0,46
Diâmetro da Fibra	0,75 ± 0,01
Fator de Forma	66,66 ± 1,05

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Dessa forma, a fibra de aço encontra-se em conformidade com os critérios normativos em relação ao fator de forma, pois para NBR 15.530 (ABNT, 2007a) o fator de forma mínimo para fibra de aço do tipo A e Classe I é 40 e conforme o ACI 318 (2011) o fator de forma máximo é igual a 100. Na verificação de defeitos foram analisados 250g de fibra de aço que por inspeção visual não foram encontrados defeitos na região da ancoragem.

### 3.2. Dosagem do Concreto

O traço do concreto (REF) utilizado no estudo foi adquirido em uma concreteira que comercializava este concreto para fabricação de aduelas. A partir do concreto de referência (REF) foram adicionadas fibras de aço e polipropileno conforme Tabela 20. Com o intuito de avaliar apenas o teor de fibras, todos os concretos aplicados foram similares (consumo de cimento, teor de argamassa, entre outros), necessitando ajustar apenas a dosagem de superplastificante em função do teor de fibras, para a obtenção da mesma trabalhabilidade do concreto de referência (REF). Os concretos foram denominados seguindo a nomenclatura CRFXY, 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>.

**Tabela 20** - Traços do CRF com diferentes teores de fibras para estudo.

Componentes (Kg/m <sup>3</sup> )	Referência	Fibra de Aço			Fibra de Polipropileno		
	REF	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.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.3. Produção do Concreto

O volume do concreto de referência (REF) e cada concreto com adição de fibra de aço (CRFA25, CRFA35 e CRFA40) foram iguais a 54 litros por traço, enquanto que para os concretos com adição de fibra de polipropileno (CRFP0,5, CRFP1,0 e CRFP1,5) foi de 32 litros por traço. Na produção do concreto foi utilizada uma betoneira de 120 litros para misturar a quantidade do concreto por traço.

O procedimento para a produção do concreto seguiu os seguintes passos:

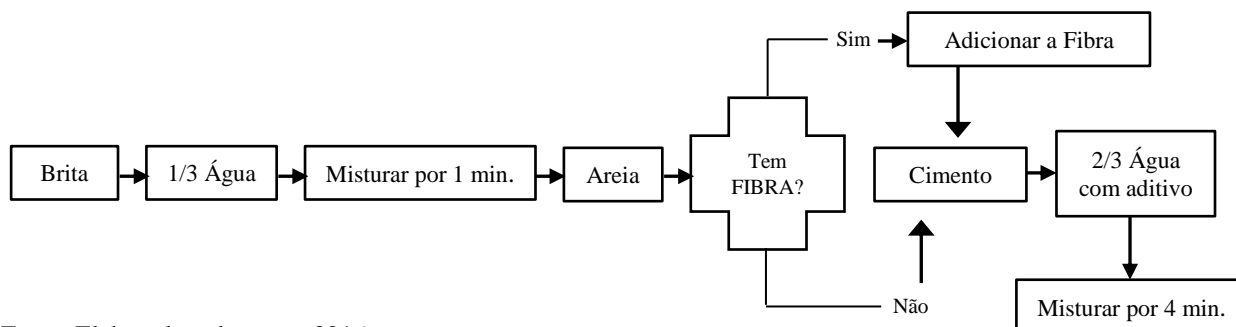
**Passo 1** – Separação dos materiais para cada concreto;

**Passo 2** - Imprimação da superfície interna da betoneira, com o propósito de evitar que a água da mistura fosse absorvida pelas paredes internas, anteriormente secas;

**Passo 3** - A ordem de colocação dos materiais na betoneira em movimento foi mantida constante para todas as misturas conforme a Figura 15;

**Passo 4** – Execução da moldagem dos corpos de prova.

**Figura 15** - Esquema da sequência da colocação de materiais na betoneira



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4. Métodos de Ensaio

Os ensaios foram realizados com o propósito de caracterizar o concreto no estado fresco e endurecido. No estado fresco foram realizados os ensaios de consistência de abatimento do tronco de cone (Figura 16a), massa específica e teor de ar incorporado do concreto (Figura 16b). Para os concretos no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial (Figura 16c), absorção de água por imersão e ferverura, exposição a elevadas temperaturas e ensaio de tenacidade à flexão todos realizada na idade de 28 dias.

Ao total foram moldados em formas metálicas padronizadas, 84 (oitenta e quatro) corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) (diâmetro x altura) e 8 (oito) corpos-de-



prova prismáticos (150 mm x 150 mm x 500 mm) (largura x altura x comprimento), conforme Tabela 21. Após 4 horas de sua moldagem, os corpos de prova foram cobertos por um pano molhado e mantidos por 24 horas, em seguida foram desmoldados e conservados em cura submersa até a realização dos ensaios.

**Figura 16** - Ensaio no concreto, (a) Teor de Ar Incorporado, (b) Resistência à Compressão, (c) Abatimento do Tronco de Cone.



(a)



(b)



(c)

**Tabela 21** - Relação de ensaios realizados e quantidade de corpos-de-prova

Ensaio	Norma de Ensaio	Nº de CP por Concreto	Nº de CP Total
<b>Estado Fresco</b>			
Consistência do concreto ( <i>Slump – Test</i> )	NBR NM 67 (ABNT, 1998)	-	-
Massa Específica	NBR 9.833 (ABNT, 2009e)	-	-
Teor de ar incorporado	NBR NM 47 (ABNT, 2002)	-	-
<b>Estado Endurecido</b>			
Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2007b)	9	63
Absorção de água por imersão e fervura	NBR 9778 (ABNT, 2009d)	3	21
Tenacidade à Flexão	JSCE SF4: 1984	2	8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Tendo em vista que o ensaio de Tenacidade e o método de elevadas temperaturas não são comuns, decidiu-se por explicá-los mais detalhadamente.

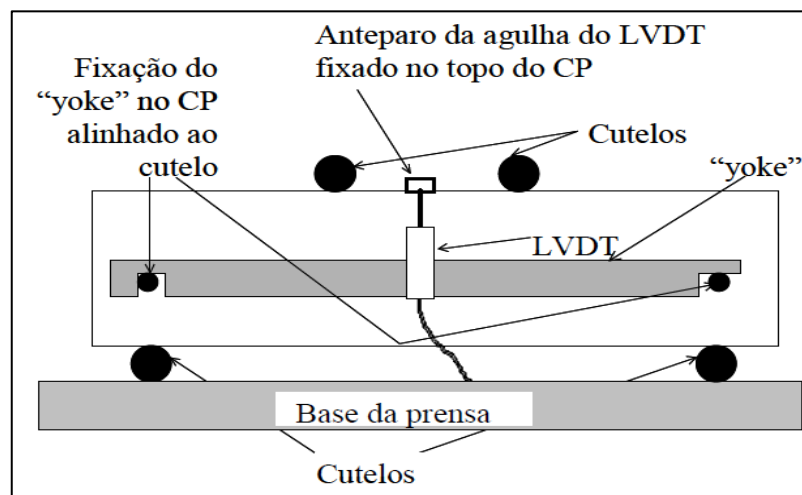
### 3.4.1. Ensaio de Tenacidade à flexão segundo JSCE-SF4

Foram confeccionados 8 (oito) corpos-de-prova prismáticos sendo dois para cada concreto com fibra de aço para a realização dos ensaios de tenacidade. Este, por sua vez, revelou-se como o ensaio mais importante para o controle do concreto com adição de fibras de aço (BENTUR; MINDESS, 1990). Dessa forma foram desenvolvidos ensaios para avaliar a tenacidade do compósito através da norma Japonesa JSCE SF4 “*Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete*”, que teve sua última revisão em 1984. Conforme os parâmetros de recomendação da norma Japonesa JSCE SF4 foram confeccionados corpos de provas prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm (altura x largura x comprimento) ensaiados com 450 mm de vão.

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, para facilitar a aplicação do dispositivo “YOKE” no corpo de prova. Na realização deste ensaio se utilizou uma prensa com controle eletrônico de deslocamento por meio de dois transdutores (*Linear Variable Differential Transformers - LVDT*).

Os transdutores foram colocados na região central da face lateral do corpo de prova, a fim de evitar o efeito de confinamento das extremidades conforme Figura 17. Os transdutores que foram utilizados têm base de medida de 100 mm e sensibilidade de 0,0001mm. Para obter os dados de força, durante o ensaio, foi utilizada célula de carga de 500kN e sensibilidade de 0,001 kN. A velocidade de carregamento do ensaio de tenacidade à flexão foi de 0,15 mm/min.

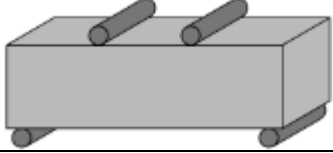
**Figura 17** - Posicionamento do corpo de prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão.



Fonte: Figueiredo, 2011.

O resumo de execução do método de ensaio de tenacidade à flexão segue apresentado na Tabela 22.

**Tabela 22** - Resumo do ensaio de tenacidade à flexão

Resumo	Norma de Ensaio – JSCE-SF4	
Esquema do Ensaio		
Geometria dos corpos de prova	Geometria	Prismático
	Tamanho	150 mm x 150 mm x 500 mm
	Vão	450 mm
Produção dos corpos de prova	Moldagem	Sim
	Tipo de compactação	Externa (Vibrador)
	Cura	Submersa
Variáveis	Entrada	Frequência; geometria do CP e taxa de carregamento.
	Saída	Tempo; dados de força e dados de deflexão.
Dados do Equipamento	Tipo de máquina de ensaio	Open loop
	Tipo de equipamento de medição	LVDT
	Taxa de carregamento	0,15 mm/min
	Controle de ensaio	Deslocamento da máquina

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

A realização do ensaio de tenacidade à flexão (Figura 18) ocorreu no Laboratório da Divisão de Materiais – DIMAT da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – NUTEC, onde foi utilizada uma máquina eletromecânica EMIC DL 1000 KN, seguindo rigorosamente as orientações da JSCE-SF4. Nos ensaios realizados foi determinada a tenacidade à flexão, fator de tenacidade (Equação 2) e o coeficiente de ductilidade (Equação 3) conforme apresentado no item 2.5.

**Figura 18** - Corpos de prova prismáticos (A) durante o ensaio segundo JSCE-SF4, (B) após o ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4.2. Método de Exposição a Elevadas Temperaturas

Foram confeccionados 16 (dezesseis) corpos de prova para a realização dos ensaios de exposição a elevadas temperaturas nas dependências do Laboratório de Bio - Materiais do Departamento de Materiais da Universidade Federal do Ceará, onde foi utilizado um forno elétrico.

Os procedimentos deste ensaio foram realizados conforme metodologia desenvolvida por Lima (2005). O ensaio foi desenvolvido como parâmetro para observar a ocorrência ou não do lascamento, bem como para analisar, o grau de fissuração. Neste ensaio foram colocados os corpos de prova em um forno elétrico (Figura 19), com grande capacidade de aquecimento, cuja temperatura foi elevada a uma taxa constante de  $27,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , pois se revelou como uma taxa de aquecimento em conformidade com as observações de Anderberg (2003) para os primeiros 30 minutos de incêndio da curva de aquecimento padrão ISO 834. A temperatura máxima atingida foi de  $900^{\circ}\text{C}$ . Mantendo-se posteriormente esta temperatura por um período 45 minutos, os corpos de prova foram resfriados gradualmente dentro do forno, até que a temperatura do forno atingisse um valor inferior a  $200^{\circ}\text{C}$ , quando então foi aberta a porta e assim que possível os corpos de prova foram retirados e colocados para resfriar ao ar livre.

**Figura 19** - Forno elétrico utilizado no experimento com CP's



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Após a realização do procedimento (simulação de incêndio) os corpos-de-prova foram submetidos a diferentes análises:

- Observação das mudanças de coloração e aparecimento de fissuras ao final da exposição a elevadas temperaturas através de um registro fotográfico;
- Ensaio mecânico de resistência à compressão de acordo com a norma NBR 5.739 (ABNT, 2007b). Adotado como parâmetro para comparar a resistência dos corpos de prova antes e depois da exposição a altas temperaturas;
- Ensaio de absorção de água conforme recomendações da NBR 9.778 (ABNT, 2009d) com o intuito de caracterizar o concreto e contribuir para análise e discussão do comportamento do mesmo, onde não teve êxito pois a resistência residual após a exposição a 900°C foi extremamente baixa (~3MPa) o que impossibilitou a realização do ensaio de absorção de água por imersão e fervura, onde as amostras se desintegraram durante o ensaio.
- Por fim realizou-se uma análise do lascamento de forma qualitativa, por meio de registro fotográfico e visual na hora em que os corpos de prova foram retirados do forno.

### 3.5. Análise Estatística

A análise dos resultados das amostras ensaiadas foi feita com o uso da Análise da Variância (ANOVA). A Análise da Variância refere-se a um teste estatístico amplamente difundido que se propõe fundamentalmente a verificar se existe diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência significativa em alguma variável dependente. O modelo da tabela de resultados de uma ANOVA encontra-se na Tabela 23.

**Tabela 23** - Modelo de Variância de ANOVA

Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	Teste F
Entre grupos	SQG	g-1	MQG	MQG/MQR
Dentro dos grupos	SQE	g.(n-1)	MQE	
Total	SQT	g.n-1		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Legenda: SQG – Soma dos quadrados entre grupos; SGE – Soma dos quadrados dentro dos grupos; SQT – Soma dos quadrados Totais; GL – Grau de liberdade; g – Número de grupos; n – Número de observações por grupos; MQG – Média quadrada entre grupos; MQE – Média quadrada dentro dos grupos; Teste F – Teste de Fischer<sup>9</sup>.

Para as análises realizadas neste trabalho, utilizou-se o software *Statistica 7.0* com um nível de confiança de 95% (5% de significância).

<sup>9</sup> Ronald Aylmer Fischer (1890 – 1962), estatístico e geneticista inglês que criou em 1924 a Análise de Variância (Analysis of Variance – ANOVA).

## 4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados, a análise dos mesmos por meio da análise da variância (ANOVA) e a discussão envolvendo estudos anteriores.

### 4.1. Apresentação e Análise dos Resultados

#### 4.1.1. Resultados de propriedades dos concretos no estado fresco

Para caracterizar os concretos produzidos no estudo, foram realizados os ensaios de abatimento, massa específica e teor de ar incorporado. O intuito da avaliação das propriedades do estado fresco é pelo fato destas exercerem grande relevância para os processos de moldagem e consequentemente influenciarem nas propriedades no estado endurecido.

A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios do concreto no estado fresco.

**Tabela 24** - Resultados dos ensaios do concreto no estado fresco.

Ensaio	REF	CRFA25	CRFA35	CRFA40	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Abatimento (mm)	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0
Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	2.311,9	2.330,2	2.356,4	2.366,6	2.315,9	2.322,6	2.333,7
Teor de Ar Incorporado (%)	1,8	3,2	2,3	2,0	3,2	4,2	4,5
Aditivo 1 (Kg/m <sup>3</sup> )	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93
Aditivo 2 (Kg/m <sup>3</sup> )	1,20	1,50	1,85	2,14	1,44	1,62	1,83

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

De acordo com os dados da Tabela 24, constatou-se que foram ajustados os valores dos aditivos plastificantes para garantir uma consistência correspondente a elementos estruturais ficando todos os concretos com um abatimento de 140 mm, revelando que aumento do consumo de aditivo utilizado foi diretamente proporcional ao aumento do teor de fibra utilizada. Foi possível evidenciar também que todos os concretos desenvolvidos neste estudo encontram-se classificados pela NBR 8.953 (ABNT, 2015c) como um concreto de densidade normal (com massa variando de 2.000 a 2.800 kg/m<sup>3</sup>) com valor de 2.351,07 ± 18,78 Kg/m<sup>3</sup> para a fibra de aço e 2.324,07 ± 8,99 Kg/m<sup>3</sup> para fibra de polipropileno. Todos os concretos desenvolvidos revelaram um teor de ar incorporado abaixo de 5%.

#### 4.1.2. Resultados da Absorção de Água

A Tabela 25 apresenta os resultados da Absorção de água nos concretos produzidos. No Apêndice D, apresentam – se informações mais detalhadas deste ensaio.

**Tabela 25** – Resultados do Ensaio de Absorção de Água

Ensaio	REF	CRFA25	CRFA35	CRFA40	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Absorção de Água (%)	4,0	3,7	4,4	3,3	5,3	5,4	5,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

De acordo com os dados da Tabela 25, verificou-se que todos os concretos desenvolvidos nesta pesquisa encontram-se abaixo de 8% de absorção, comprovando atendimento aos requisitos mínimos estipulados pela concreteira.

#### - Análise Estatística

Nas Tabelas 26 e 27 estão apresentadas as análises de variância da absorção de água dos concretos produzidos com fibras de aço e fibras de polipropileno. As tabelas de análises de variância dos demais ensaios apresentados a seguir se encontram nos apêndices.

**Tabela 26** - Análise de variância da absorção de água do concreto com fibra de aço

Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,0001918	3	0,0000639	5,5186270	0,023823	4,066181	S
Dentro dos grupos	0,0000927	8	0,0000116				
Total	0,000284	11					

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

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Tabela 27** - Análise de variância da absorção de água do concreto com fibra de polipropileno

Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,000568	3	0,0001895	12,46434	0,0022	4,066181	S
Dentro dos grupos	0,000122	8	0,0000152				
Total	0,00069	11					

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

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Na Tabela 28, estão apresentados os resultados de significância extraídos das tabelas de análise de variância apresentadas acima.

**Tabela 28** - Significância da absorção de água do concreto

Fator	Significância	
	Concreto com Fibra de Aço	Concreto com Fibra de Polipropileno
Absorção de Água (%)	S	S

Legenda: S – Significativo; NS – Não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Constata-se que na Tabela 28 a incorporação de fibra de aço e de fibra de polipropileno no concreto exerceu influência significativa na absorção de água. Este fato revela que a incorporação da fibra de aço no concreto provocou um decréscimo na absorção de água na ordem de 5,0% evidenciando que este concreto mostra-se menos vulnerável a ação de agentes agressivos, enquanto que no concreto com adição de fibra de polipropileno ocorreu um aumento de 37,5% na absorção de água em relação ao concreto de referência (REF).

Apesar de que os resultados obtidos no estudo despontarem diferenças significativas na absorção de água, ainda encontram-se de acordo (<8,0%) com os parâmetros pré-estabelecidos pela concreteira para confecção de aduelas, ou seja, a quantidade utilizada não prejudicou a capacidade de compactação das matrizes dos concretos produzidos, comprovando que o método de adensamento utilizado foi adequado.

#### 4.1.3. Resultados da Resistência à Compressão

A Tabela 29 apresenta os resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos. No Apêndice E, apresenta todos os resultados obtidos.

**Tabela 29** – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão aos 28 dias

Ensaio	REF	CRFA25	CRFA35	CRFA40	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Resistência à Compressão Média (MPa)	48,1	51,7 (+7,42%)	52,1 (+8,25%)	54,3 (12,89%)	48,3 (+0,42%)	48,9 (+1,66%)	49,4 (+2,70%)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Conforme a Tabela 29, todos os concretos calculados, apresentaram desvios padrões,  $\sigma$ , em conformidade com o controle da NBR 12.655 (ABNT, 2015a), respeitando o controle rigoroso no preparo do concreto.

#### - Análise Estatística

Na Tabela 30 consta a significância obtida nas análises de variância da resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos produzidos com fibras de aço e polipropileno. As tabelas de análises de variância encontram-se no Apêndice E.

**Tabela 30** - Significância da Resistência à Compressão aos 28 dias

Fator	Significância	
	Concreto com Fibra de Aço	Concreto com Fibra de Polipropileno
Resistência à Compressão (MPa)	S	NS

Legenda: S – Significativo; NS – Não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.



A Tabela 30 revela que a incorporação de fibra de aço interfere significativamente na resistência à compressão do concreto, enquanto que a fibra de Polipropileno não exerce influência significativa.

O acréscimo de resistência à compressão axial observada no concreto com a adição de fibras de aço encontra-se revelado na Tabela 29. Foi observado que para o aumento do teor de fibra de aço, ocorreu também um aumento gradativo de resistência, chegando até a 12,89% em relação ao concreto de referência (REF).

Quanto à variação da resistência à compressão do concreto em função do aumento do teor de fibras de aço, (Tabela 31) verificou-se que a variação da resistência à compressão mostrou-se muito baixa e a maior entre os concretos CRFA35 e CRFA40 (4,28%), revelando que as fibras de aço influenciam na resistência a compressão do concreto.

Tal fato encontra-se em contraposição aos autores Bentur e Mindess (1990), Hannant (1978), Johnston (2001) e Bezerra (2012), que afirmam que a incorporação de fibras de aço no concreto é pouco relevante com relação à resistência à compressão da matriz. Contudo, Garcez (2005) afirma que a utilização de teores elevados aumenta levemente à resistência a compressão.

**Tabela 31** - Variação de aumento da resistência à compressão em função de aumento do teor de fibra de aço

Concretos	Resistência Média à Compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Ganho de Resistência à Compressão (%)
CRFA25	51,67		
CRFA35	52,07	0,28	0,77
CRFA35	52,07		
CRFA40	54,30	1,58	4,28

Fonte: elaborado pelo autor, 2016.

Quanto aos concretos CRFP0,5, CRFP1,0 e CRFP1,5 (Tabela 32), observa-se que o pequeno ganho de resistência à compressão ocasionada pela adição de fibra de polipropileno, gira em torno de 1,59%. Este evento encontra-se de acordo com a literatura, pois Tanesi e Figueiredo (2001) preconizam que as fibras poliméricas em pequenos teores pouco influenciam a resistência à compressão. Este aumento na resistência pode estar associado ao fato de que com a adição das fibras de polipropileno ocorreu uma redução da relação água/cimento (a/c) efetiva da matriz, pois uma parcela da água de mistura pode ter ficado adsorvida na superfície das fibras, promovendo um incremento da resistência à compressão.

**Tabela 32** - Ganho de resistência à compressão após adição de fibra de polipropileno a temperatura ambiente.

Item	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Ganho de Resistência (%)	0,42	1,66	2,70
Média (%)	1,59		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

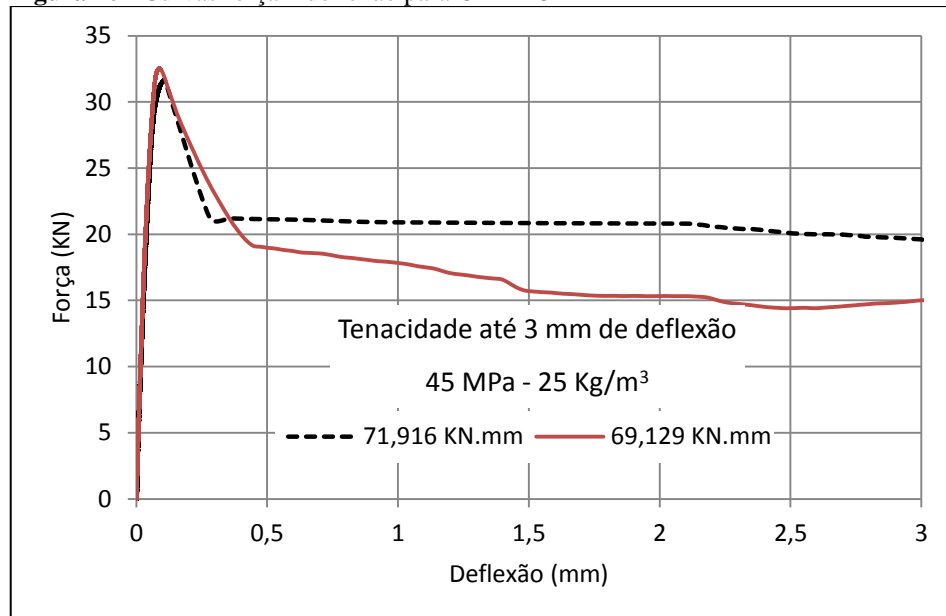
#### 4.1.4. Resultados da Tenacidade à Flexão

As Figuras 20, 21 e 22 juntamente com a Tabela 33 apresentam os resultados da Tenacidade à Flexão dos concretos produzidos CRFA25, CRFA35 e CRFA40. Foi analisada a resistência equivalente à flexão, a resistência à flexão do concreto sem fibras e o coeficiente de ductilidade. No Apêndice F, constam informações mais detalhadas deste ensaio.

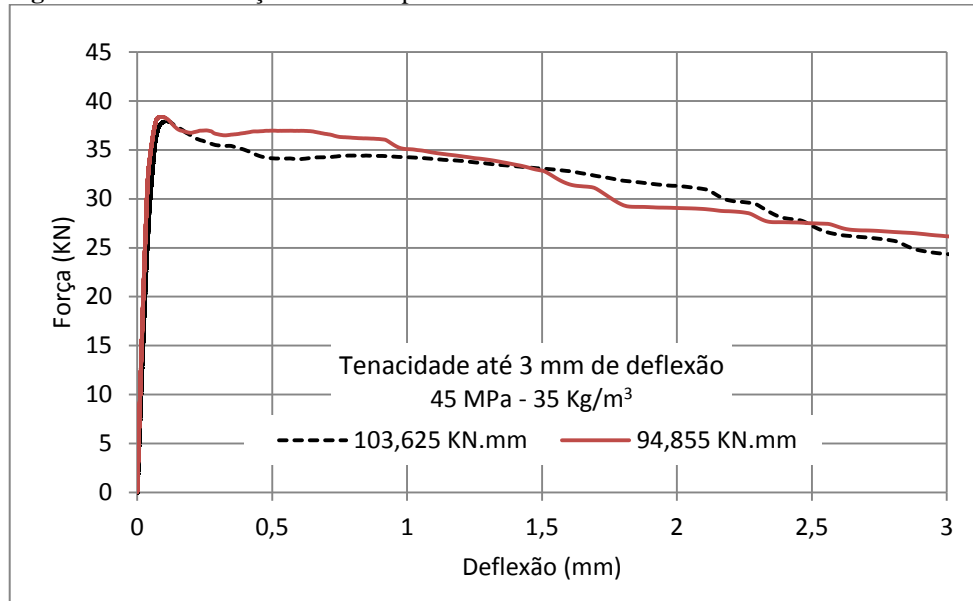
**Tabela 33** - Resultados médios do Ensaio de Tenacidade à Flexão

Concreto	Tenacidade Média até limite de deflexão $L/150=3\text{mm}$ (KN.mm)	Resistencia 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	70,523	3,13	4,28	73,24
CRFA35	99,240	4,41	5,09	86,71
CRFA40	127,012	5,65	4,76	118,59

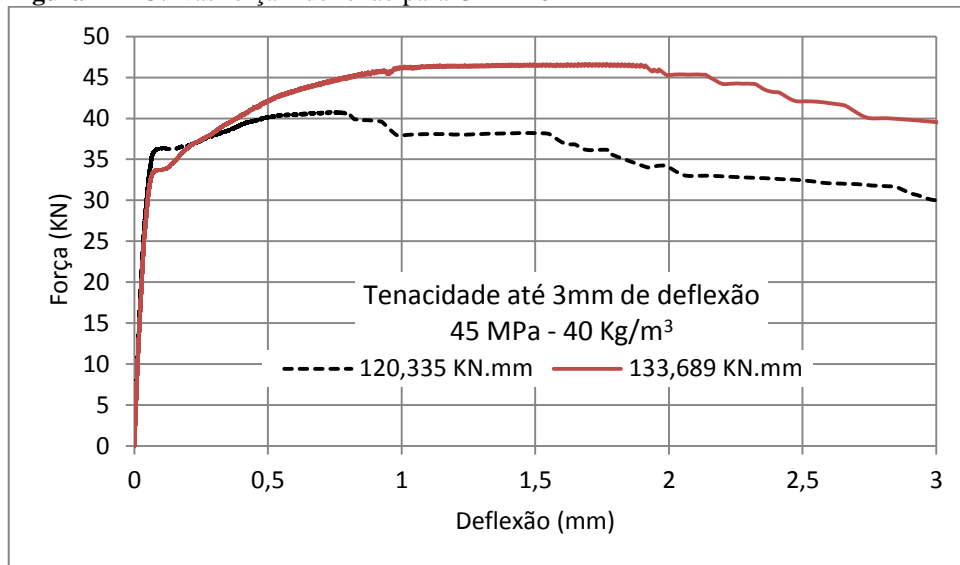
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 20** - Curvas força x deflexão para CRFA25

Fonte: elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 21** - Curvas força x deflexão para CRFA35

Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 22** - Curvas força x deflexão para CRFA40

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### - Análise Estatística

A Tabela 34 apresenta a significância obtida da análise de variância da Tenacidade à Flexão dos concretos produzidos com fibras de aço. As tabelas de análises de variância encontram-se no Apêndice F.

**Tabela 34** - Significância da Tenacidade à Flexão aos 28 dias

Fator	Significância
	Concreto com Fibras de Aço
Tenacidade à Flexão (KN.mm)	S

Legenda: S – Significativo; NS – Não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela 34 revela que a incorporação de fibra de aço exerce interferência significativa na Tenacidade à Flexão. Para Bentur e Mindess (1990), a tenacidade revela-se com a característica de maior importância no compósito reforçado com fibra de aço.

Diante deste fato o ganho de tenacidade à flexão (Tabela 35) é ocasionado pelo aumento do teor de fibra de aço no compósito. Torna-se visível também, que a tenacidade à flexão foi maior entre os concretos CRFA25 e CRFA35 chegando a 40,72%.

**Tabela 35** - Ganho de Tenacidade à Flexão

Concretos	Tenacidade Média (KN.mm)	Ganho de Tenacidade (%)
CRFA25	70,523	
CRFA35	99,240	40,72
CRFA35	99,240	
CRFA40	127,012	27,98

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Para efeitos de comparação observou-se que Barros *et al* (2005) estudaram a incorporação de 35 e 40 kg/m<sup>3</sup> de uma fibra de aço do tipo A1 em um concreto de resistência média de 40 MPa obtendo um ganho no fator de tenacidade de 31,0%, enquanto que o ganho do fator de tenacidade médio obtido neste estudo com os mesmos teores utilizados (35 e 40kg/m<sup>3</sup>) e com concreto de resistência média superior a 50 MPa foram de 27,9%. Tal fato evidencia que o aumento do fator de tenacidade revela-se muito próximo ao apresentado na literatura.

O projeto básico da Linha Leste do Metrô de Fortaleza prevê a execução de segmento de anel pré-moldado com concreto de resistência característica à compressão de 45MPa e com adição de fibra de aço na proporção de 40 kg/m<sup>3</sup>. O valor inicial de tenacidade especificado não foi informado pelo projetista. 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 (FIGUEIREDO, 2011).

Na linha Leste do Metrô de Fortaleza, por falta de informações utilizou-se a correlação proposta pela NBR 6.118 (ABNT, 2014) que correlaciona à resistência a tração na flexão com a resistência característica à compressão, conforme Equação 4:

$$f_{ct,M} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

Onde:

$f_{ct,M}$  = Resistência à Tração na Flexão (MPa);

$f_{ck}$  = Resistência característica à Compressão (MPa).

Desse modo, o valor da resistência a tração na flexão calculado foi de 3,8 MPa e consequentemente, o valor proposto para o fator de tenacidade foi de 2,7 MPa (70%). Utilizando estes valores como requisitos básicos para o estudo de dosagem do concreto com adição de fibras de aço, constatou-se claramente que os valores médios estudados se mostraram superiores ao 2,7 MPa proposto para o projeto (Tabela 36).

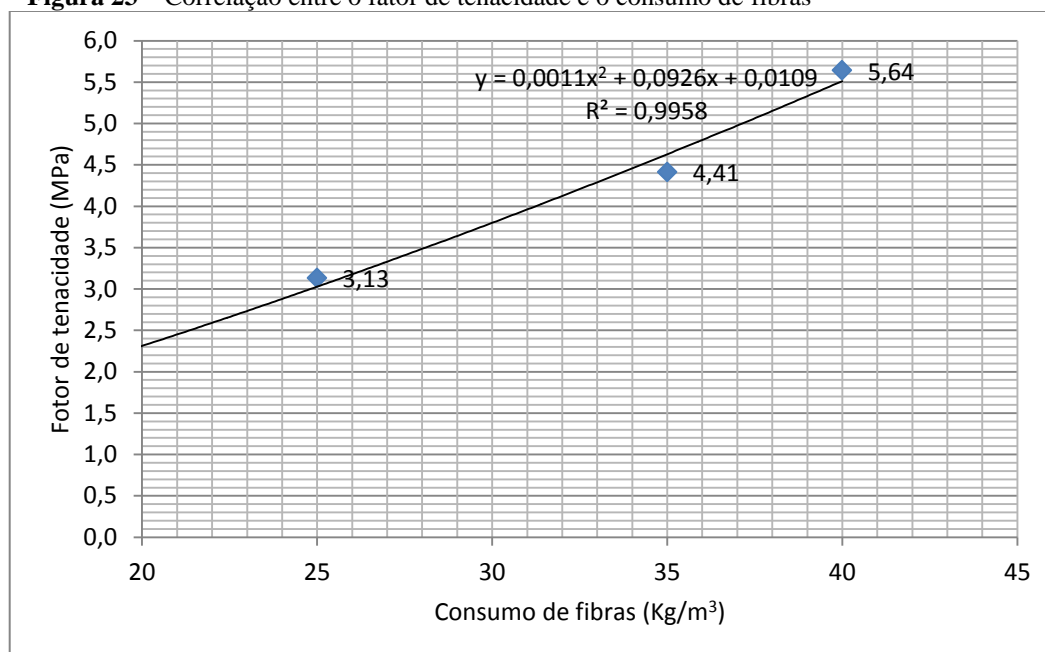
**Tabela 36** - Fator de tenacidade médio para os concretos propostos no experimento.

Concretos	Fator de Tenacidade Média (MPa)	Fator de Tenacidade Proposto (MPa)
CRFA25	3,13	2,7
CRFA35	4,41	
CRFA40	5,64	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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 fibras (Figura 23).

**Figura 23** – Correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibras



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Na Figura 23, pode-se estabelecer o teor de fibra necessário para atender ao requisito do fator de tenacidade proposto (2,7 MPa), fica em torno de aproximadamente 23kg/m<sup>3</sup>. Conforme Fernandes (2005) deve ser considerado questões de segurança, pois o teor de fibras deve ser sempre superior ao proposto para evitar que o concreto seja pré-qualificado atendendo de maneira justa aos requisitos. Este fato decorre dos prováveis riscos de

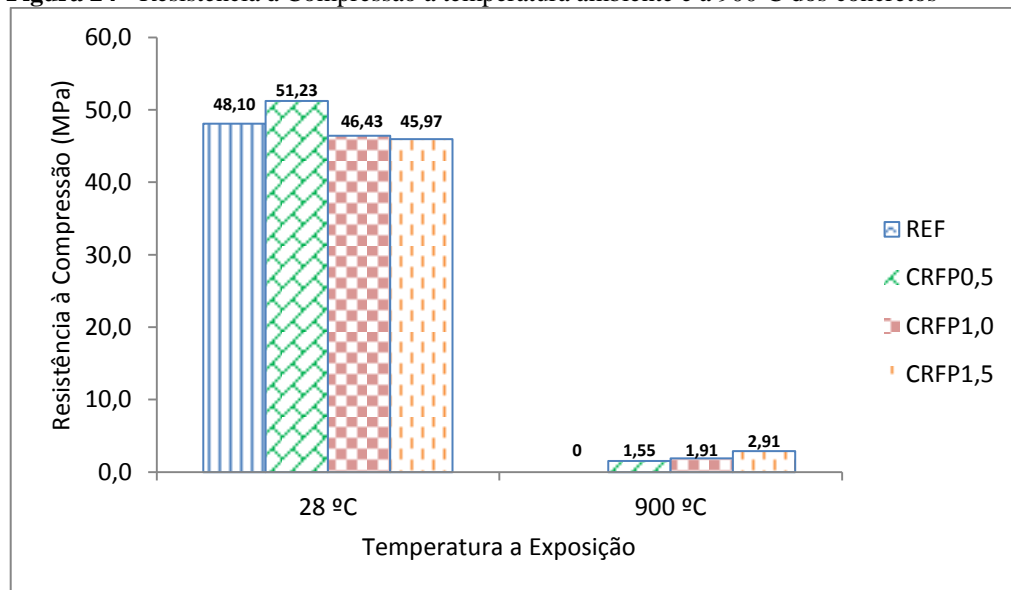
sobrecargas e dos inesperados danos que podem ocorrer em obras de túneis do tipo TBM nos primeiros anéis lançados no início da escavação devido ao momento de adaptação ao equipamento da equipe de operação.

No plano econômico esta dosagem propõe uma redução de 1.447.500 Kg de fibras para o concreto CRFA25 e 482.500 Kg de fibras de aço para o concreto CRFA35, revelando valor muito considerável, pois segundo Figueiredo (2011), a fibra de aço custa cerca de quinze vezes mais que o cimento.

#### 4.1.5. Resultados da Simulação de Incêndio

A Figura 24 apresenta os resultados da Resistência à Compressão dos concretos produzidos com adição de fibra de polipropileno (CRFP0,5, CRFP1,0 e CRFP1,5). No Apêndice G, apresentam – se mais informações detalhadas deste ensaio.

**Figura 24** - Resistência à Compressão a temperatura ambiente e a 900°C dos concretos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### Análise Estatística

Na Tabela 37 apresenta a significância obtida das análises de variância da resistência à compressão dos concretos produzidos com fibras de polipropileno após elevadas temperaturas (900°C). As tabelas de análises de variância encontram-se no Apêndice G.

**Tabela 37** – Significância da Resistência à Compressão a temperatura de 900°C

Fator	Significância
	Concreto com Fibra de Polipropileno
Resistência à Compressão – Temp. de 900°C (MPa)	S

Legenda: S – Significativo; NS – Não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela 37 revela que a presença de fibra de polipropileno no concreto exposto a elevadas temperaturas exerce interferência significativa na resistência à compressão. Foi constatado que a resistência do concreto sofreu uma grave redução quando submetida a um aquecimento de 900°C, pois ocorreu uma série de reações na pasta de cimento endurecida, tais como, dessecação dos poros seguida da decomposição dos produtos de hidratação, destruição do gel de C-S-H e modificação das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica. Todas essas reações químicas surgem associadas da redução de volume, induzindo ao acréscimo de fissuras (GRATTAN-BELLEW, 1996). Também foi evidenciado por Lima (2005), que concretos submetidos a temperaturas superiores a 600°C ficam sujeitos a um acréscimo no tamanho e na quantidade de poros existentes, favorecendo assim a uma redução da resistência.

A Tabela 38 retrata o comportamento da resistência em termos de redução sofrida nos corpos de prova submetidos à temperatura de 900°C em comparação com a resistência a temperatura ambiente (28°C).

**Tabela 38** - Redução da Resistência à compressão após exposição a 900°C

Exposição a 900°C	CRFP0,5	CRFP1,0	CRFP1,5
Teor de Fibra (kg/m <sup>3</sup> )	0,5	1,0	1,5
Redução da Resistência (%)	96,8	96,1	94,1
Fator de Redução <sup>10</sup> (FR)	0,03	0,04	0,06

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os resultados apresentados na Tabela 38, nota-se uma redução da perda de resistência à medida que foi adicionado fibras de polipropileno em relação à resistência à temperatura ambiente, porém, a resistência residual, após a exposição à temperatura de 900°C, revelou um valor extremamente baixo de aproximadamente 3,0 MPa para o concreto CRFP1,5 (teor de 1,5 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno). Conforme o estudo de Lima (2005), o fator de redução para um concreto com teor de 3,0 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno submetido a 900°C resultou em 0,20 (~16 MPa) valor bem superior ao fator de redução determinado experimentalmente no CRFP1,5 (FR=0,06).

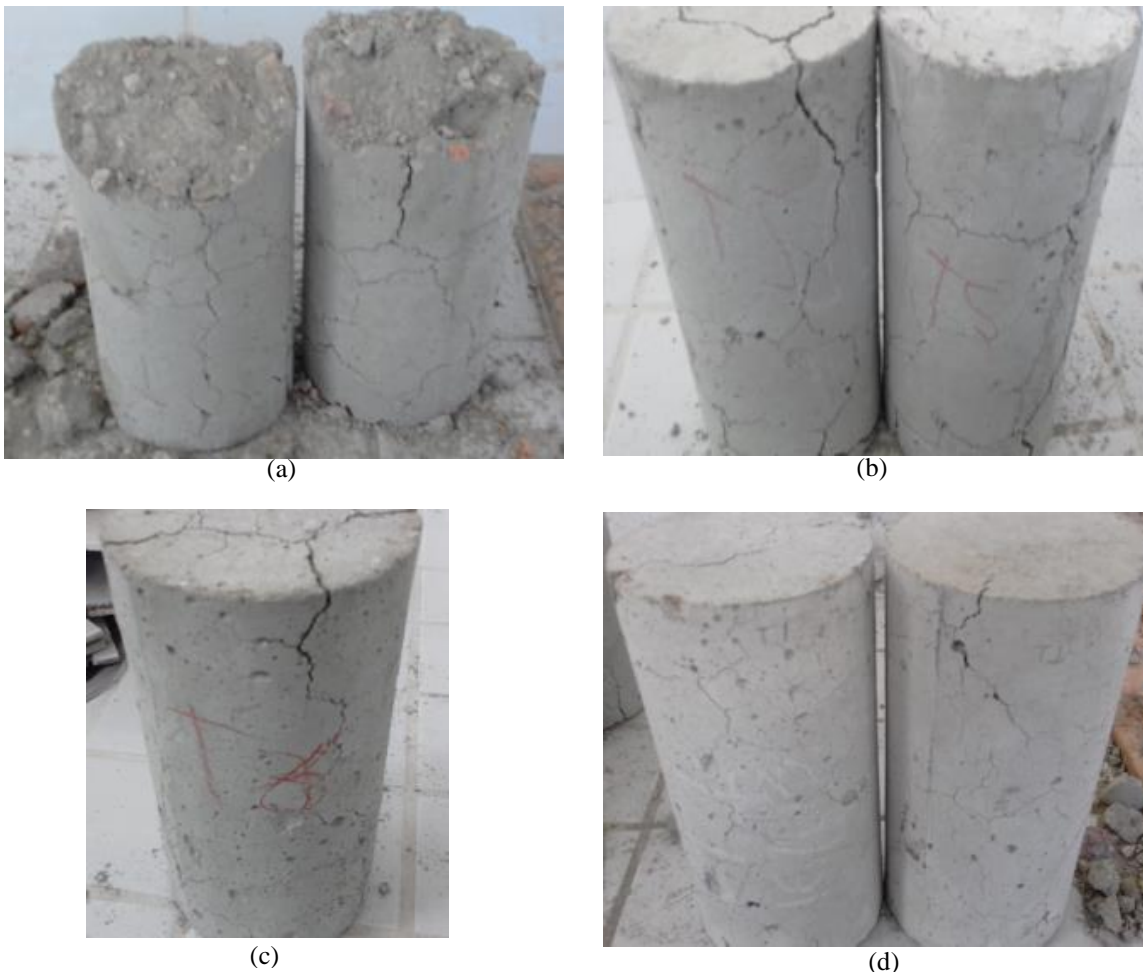
Vale salientar que a NBR 15.200 (ABNT, 2012a) preconiza que para concretos sem mecanismo de proteção passiva para evitar o desencadeamento do *Spalling* à temperatura de 900°C resulta no fator de redução de aproximadamente 0,1, sendo 66,7% superior ao encontrado no experimento de melhor resultado (CRFP1,5). Logo se constatou que apesar das fibras de polipropileno terem impedido o lascamento (*spalling*) durante o processo da

<sup>10</sup> Fator de Redução é resultado da razão entre a resistência à compressão residual do concreto após ser submetido a elevadas temperaturas (900°C) e a resistência à compressão do concreto a temperatura ambiente (28°C).

simulação do incêndio, os fatores de redução da resistência à compressão encontrados no experimento foram bastante preocupantes, necessitando de se rever (aumentar) o teor de fibra de polipropileno, com o intuito de garantir uma resistência residual adequada à estabilidade estrutural.

Por meio das inspeções visuais (Figura 25) e com auxílio de um 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 a desagregação parcial do concreto das amostras devido à ocorrência do *spalling* constatada após a abertura do forno, enquanto que nos demais concretos com adição de fibra de polipropileno (CRFP0,5, CRFP1,0 e CRFP1,5) foram percebidos fissuras na superfície dos corpos de prova, mas sem *spalling*. No concreto CRFP1,5 foram observadas fissuras mapeadas ao longo de todo corpo de prova com abertura da ordem de 0,2 mm, porém nos demais concretos (CRFP0,5 e CRFP1,0) apresentaram piores desempenhos, pois as fissuras se mostraram mais abertas da ordem de 0,3 mm a 0,5 mm.

**Figura 25** - Aspectos visuais dos CP's sem e com fibra de polipropileno submetido a 900°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Legenda: (a) - Concreto de Referência; (b) - Teor de 0,5 kg/m<sup>3</sup>; (c) - Teor de 1,0 kg/m<sup>3</sup>; (d) - Teor de 1,5kg/m<sup>3</sup>.



Analisando os resultados do estudo revelou-se que houve ocorrência de lascamento no REF (Concreto de Referência), enquanto que nos demais concretos (com fibra de polipropileno) não foram constatados lascamentos durante o processo de aquecimento e resfriamento, revelando que a adoção de fibras de polipropileno atuou de forma eficiente no combate ao *spalling*, mas provocou uma acentuada redução da resistência mecânica das amostras.

#### 4.2. Discussão dos Resultados

Para facilitar a discussão dos resultados obtidos no estudo foram resumidas na Tabela 39 as implicações das propriedades mecânicas dos ensaios realizados no Concreto Reforçado com Fibras (CRF) por meio de avaliação de teste estatístico de análise de variância (ANOVA).

**Tabela 39** - Resumo da significância dos ensaios realizados

Ensaio	Análise de Variância (ANOVA)	
	Concreto Reforçado	
	Fibra de Aço	Fibra de Polipropileno
Absorção de Água	S	S
Resistência à Compressão (28°C)	S	NS
Tenacidade à Flexão	S	-
Resistência à Compressão (900°C)	-	S

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Legenda: S – Significativo; NS – Não significativo.

Na Tabela 39, verifica-se que o incremento de fibras de aço no concreto provocou interferência significativa em todos os ensaios realizados, tendo sua influência mais acentuada na propriedade da tenacidade à flexão que evidenciou um aumento de até 108,9% para o fator de tenacidade. Este fato ocorreu devido à presença da fibra de aço que restringiu o avanço das fissuras que se propagaram na interface entre o agregado graúdo e a pasta do concreto, onde para a fissura avançar se faz necessário um gasto maior de energia que conseqüentemente produz um aumento de tenacidade (BENTUR; MINDESS, 1990).

Analisando as propriedades do concreto reforçado com fibras de polipropileno verificou-se que as fibras interferiram significativamente apenas na absorção de água e no comportamento do concreto frente a elevadas temperaturas (900°C). As fibras de polipropileno provocaram no concreto aumento da absorção de água (37,5%), mesmo assim, esta quantidade não prejudicou a capacidade de compactação das matrizes dos concretos produzidos.

Foi evidenciado também que o aumento progressivo da fibra de polipropileno no concreto é diretamente proporcional ao aumento da resistência residual do concreto após aquecimento a temperatura de 900°C.

Contudo, o experimento comprovou que os teores estudados mostram-se eficientes no combate à incidência do *spalling*, mas revelaram um problema (resistência residual extremamente baixa da ordem de aproximadamente 3,0 MPa) que compromete a segurança estrutural numa possível ocorrência de sinistro.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusão

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

- A incorporação das fibras (aço e polipropileno) no concreto com relação à absorção de água segundo a análise de variância (ANOVA) mostrou-se significativa. Este fato evidenciou alterações nos valores da absorção de água no concreto sendo um decréscimo de 5,0% para o concreto com reforço de fibra de aço e um aumento de 37,5% para o concreto com adição de fibra de polipropileno. Apesar de ter percebido um acentuado aumento na absorção de água, esta não ultrapassou o parâmetro pré-estabelecido pela concreteira.
- Para a resistência à compressão a adição das fibras de aço revelou-se com diferenças significativas conforme análise de variância (ANOVA), promovendo um ganho de resistência à compressão em relação ao concreto de referência de até 12,89%;
- Para a tenacidade à flexão a análise de variância (ANOVA), também acusou relevante significância, revelando que os valores médios de tenacidade encontrados se mostraram superiores ao proposto para o projeto. Para o teor de 40 kg/m<sup>3</sup>, (CRFA40) obteve-se um aumento de 108,9% para o fator de tenacidade em relação ao proposto. Isso ocorreu devido à adição das fibras no concreto que contribuíram para o incremento de absorção de energia;
- Diante da correlação entre o fator de tenacidade e o consumo de fibras, o teor de fibra mínimo necessário para atender ao requisito do fator de tenacidade proposto é de aproximadamente 23 kg/m<sup>3</sup>;
- A incorporação de fibra de polipropileno não produziu efeito significativo para a propriedade da resistência a compressão;
- Em relação ao comportamento dos concretos frente a elevadas temperaturas, constatou-se que o aquecimento a que foram submetidos (900°C) provocou no concreto com teor de 1,5 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno (melhor resultado do estudo)

um fator de redução de 0,06 (CRFP1,5), que levou a uma resistência residual extremamente baixa da ordem de aproximadamente 3,0 MPa. Quanto aos demais concretos, estes se mostraram piores do que o apresentado no concreto CRFP1,5, revelando que os teores utilizados no experimento devem ser analisados e revistos;

- Quanto ao aspecto visual das amostras foi possível evidenciar que no concreto de referência (REF) houve desagregação parcial do concreto, evidenciado pela ocorrência do *spalling*, enquanto que nas amostras com a incorporação das fibras de polipropileno foram observadas fissuras mapeadas ao longo de todo corpo de prova. No concreto CRFP1,5 foram constatadas fissuras da ordem de 0,2mm e nos demais concretos (CRFP0,5 e CRFP1,0) os resultados foram menos favoráveis, com fissuras mais abertas, da ordem de 0,3mm a 0,5mm;
- Verificou-se que houve o lascamento (*spalling*) apenas no concreto de referência (REF). Quanto aos demais concretos (CRFP0,5, CRFP1,0 e CRFP1,5) as fibras de polipropileno tiveram um papel satisfatória. Porém os resultados da redução de resistência revelaram valores preocupantes, manifestando-se a necessidade de se rever (aumentar) o teor fibra de polipropileno utilizado.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos futuros têm-se:

- Realizar ensaios em corpos de prova de grandes dimensões (tamanho real) para garantir a confiabilidade da obra, através de ensaios de Fendilhamento (simulação da fase executiva do túnel) e Flexo-Compressão (simulação do túnel em serviço) para os teores estudados;
- Realizar estudos comparativos em concreto reforçado com fibra de aço com mais teores, com objetivo de estabelecer correlações entre os resultados fornecidos para subsidiar o dimensionamento do diagrama de dosagem;

- Realizar estudos comparativos em concretos reforçados com fibras de polipropileno com teores acima de  $1,5 \text{ kg/m}^3$ , com o intuito de determinar exatamente o melhor teor de fibra para controlar o *spalling* e minimizar os prejuízos às propriedades mecânicas;
- Pesquisar mais especificamente as alterações sofridas pelo concreto na faixa de temperatura de  $400^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$ , a fim de determinar a temperatura crítica do concreto, acima da qual suas propriedades sofrem considerável deterioração;
- Avaliar a eficácia da incorporação conjunta dos melhores teores de fibras estudadas, com o intuito de parametrizar o comportamento mecânico do concreto.

## REFERÊNCIAS

ABDULL-WAHAB, H. M. S.; AHMAD, H. K. Fiber effect on cracking of concrete due to shrinkage. *Fibre Reinforced Cement and Concrete. Proceedings of Fourth International Symposium held by RILEM. July 1992, University of Sheffield.*

ACCETTI, K.M.; PINHEIRO, L.M. Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2000.

AGOPYAN, V., NUNES, N. L. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço.** 18p. Boletim Técnico BT/PCC/225, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, 1998.

AL-TAYYIB, A. H.; AL-ZHRANI, M. M., RASHEEDUZZAFAR; AL SULAIMANI, G. F. Effect of polypropylene fiber reinforced on the properties of fresh and hardened concrete. In: THE ARABIAN GULF ENVIRONMENT. *Cement and Concrete Research*, v, 18, 1988.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318M-11:** Building Code Requirements for Structural Concrete. Michigan, USA, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R:** State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. [S.I.]: ACI committee, 1996. Reapproved 2002. 66 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5.** ACI. Design considerations for steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.4R-88). ACI Committee 544. Detroit, USA ,1988.(Reapproved 1994)18p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1399:** Standard test method for obtaining average residual – strength of fiber reinforced concrete. Book of ASTM Standards, USA, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1550:** Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). Pennsylvania, 2010a. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1609:** Standard test method for flexural performance of fiber-reinforce concrete (Using Beam with Third-Point Loading). Pennsylvania, 2010b. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete. ASTM A 820/01.** Annual Book of ASTM Standards, v. 01.03; v. 04.02 August 2001.

ANDERBERG, Y. **Mechanical properties of steel reinforcement.** In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE, 2003, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 12p. Apostila.

ANDERBERG, Y. **Spalling phenomena of HPC and OC**. In: PHAN, Long T.; CIRINO, Nicholas J.; DUTHINH, Dat; GARBOCZI, Edward. International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete – NIST – Gaithersburg, MD, February 13-14, 1997. Proceedings. NIST. Gaithersburg, (E.U.A.), February, 1997.

ANDRADE, C. *et al.* porosity & microcracking. In: Course on effect of heat on concrete. International centre for mechanical sciences. Udine, Itália, 17p, 2003. Apostila.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2014. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11.579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11.582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier test. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12.655**: Concreto de cimento portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15.200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15.530**: Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2007a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15.577- 4**: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4 - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5.738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5.739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6.118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6.467**: Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6.473**: Cal virgem e cal hidratada – Análise química. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7.211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7.215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7.218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7.809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8.953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9.778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9.833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9.917**: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 15**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 16**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009h.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 67**: Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Sistema de Informações da Mobilidade Urbana. **Relatório Geral 2012**. São Paulo. 2014.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. Single and multiple fracture. *In*: Conference on the Properties of Fiber composites, London, 1971. **Proceedings**. NPL. p. 15-26.

BARROS, J. A. O. et al. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 38, p. 47-56, 2005.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. United Kingdom. **Barking**, Elsevier. 1990.

BERNARDI, S.T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de aramida kevlar**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2003.

BEZERRA, A., C., S. **Concreto com fibras curtas de aço submetido à altas temperaturas**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CALLISTER, W., D. **Materials science and engineering: an introduction**. 8ª edição, United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

CÁNOVAS, M.F. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo: Pini, 1988.

CARNIO, M.A. **Análise em Regime Plástico de Placas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço sobre Base Elástica**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CASTELLOTE, M. *et al.* **Microstructure: solid phases**. In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. Apostila.

CECCATO, M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 1998. 98f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CECCATO, M.R., NUNES, N.L., FIGUEIREDO, A.D. Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço. In: IV CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E VI CONGRESSO DE CONTROLE DA QUALIDADE – CONPAT 97. 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: 1997. p. 539-546.

COSTA, C.N.; FIGUEIREDO, A.D.; SILVA, V.P.; O fenômeno do lascamento (“Spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio: uma revisão crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON 2002), 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002.

EBEWELE, R.O. **Polymer Science and Technology**. Nigeria: CRC press LLC, 1996.

EFNARC. **European Specification for Sprayer Concrete**. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, U.K. 1996. 30p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code 2010**: First Complete Draft. v. 1, Switzerland, 2010.

FERNANDES, A. **Utilização de fibras de aço para reforço de concreto em anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túneis**. 2005. 106f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, 2005.

FERRARI, O. A. O NATM como Alternativa Versátil de Método Construtivo. **Revista do Instituto de Engenharia**, São Paulo, v.1, n. 494, p. 58-59, mar. 1993.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: ISAIA, Geraldo Cechelle. (Org.). **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. Cap. 39. p. 1195-1225.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 247f. Tese. (Livre - Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 1997. Tese. (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, A.D., HELENE, P. R.L. O ensaio de punção de placas para o controle da tenacidade no concreto com fibras de aço In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E VI CONGRESSO DE CONTROLE DA QUALIDADE – CONPAT 97, 4., 1997, Porto Alegre. **Anais...** . Porto Alegre: CONPAT, 1997. p. 469 - 476.

FIGUEIREDO, A.D.; TANESI, J.; NINCE, A.A. Concreto com fibras de polipropileno. **Téchne**, São Paulo, v. 10, n. 66, 2002.

FRANCIS, F.O. & ROCHA, H. C. **Obras Subterrâneas Civis**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. 587 p.

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.

GARCEZ, E. O. A. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. **Microstructure of fire-damaged concrete. A case study**. *Cement & Concrete Composites*. Atenas, Grécia, v. 27. p. 255-259, 2005.

GOIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GRATTAN-BELLEW, P.E. Micro-structural investigation of deteriorated Portland cement concretes. **Construction and building materials**. Guildford, Inglaterra, v. 10, n.1, p.3-16, 1996.

HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concretes**. Chichester: John Wiley, 1978.

HERTZ, K. D. Limits of spalling of fire-exposed concrete. **Fire Safety Journal**, Oxford, v. 38, p. 103-116, 2003.

HERTZ, K. D.; SORENSEN, L. S. Test method spalling of fire exposed concrete. **Fire Safety Journal**, Oxford, v. 40, p. 466-476, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa de Informações Básicas Municipais: Perfil dos Municípios Brasileiros 2013**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Perfil\_Municipios/2013/munic2013.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2014.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 834: fire resistance tests – elements of building construction**. Genève, 1994.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE SF4. Concrete Library of JSCE. Parte III-2 Method of test for steel fiber reinforced concrete. n.3 June 1984. p. 58-61.

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.

KALIFA, P.; CHÉNÉ, G.; GALLÉ, C. High temperature behavior of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 31, n.12, p. 1487-1499, 2001.

KALIFA, P.; MENNETEAU, F.D.; QUENARD, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperature. **Cement and concrete research**. Elmsford, v. 30, n. 12, p. 1915-1927, dec. 2000.

KHOURY, G.; MAJORANA, C. E. Modelling of concrete spalling in fire. In: AIMETA CONGRESS OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, 15p., 2001.

LEAL, M. L.F. **Transporte público coletivo em grandes metrópoles: São Paulo e Rio de Janeiro**. 2013. 60 p. Monografia (Especialização – Curso de Especialização em Gestão Pública) - Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2013.

LI, V.C. Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites. In: SWAMY, R. N. Fourth Rilem International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete. RILEM Symposium FRC 92. **Proceedings**. 1992.

LIBÓRIO, J. B. L., **Contribuição ao Estudo Patológico de Construções de Argamassa Armada Existentes no Brasil**. 1990. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

LIMA, R.C.A. **Investigação do Comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIN, W.M. *et al.* **Microstructures of fire-damaged concrete**. ACI structural journal. Detroit, v. 93, p.199-205, 1996.

MACCAFERRI. Manual Técnico. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto**. Disponível em: < <http://www.maccaferri.com.br>>. Acesso em: 06 out 2014.

MAIDL, B. **Stahlfaserbeton**. Berlin: Ernest & Sohn Verlag fur Architektur und technische wissenschaften, 1991.

MAJORANA, C. *et al.* Thermo-hydral behaviour (moisture). In: Course on effect of heat on concret. International centre for mechanical sciences. Udine, Itália, 19p, 2003. Apostila.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

METROFOR. Disponível em: <http://www.metrofor.ce.gov.br/> Acesso em: 19 mai. 2015.

MINDESS, S. Fiber reinforced concrete: challenges and prospects. *In: SECOND UNIVERSITY-INDUSTRY WORKSHOP ON FIBER REINFORCED CONCRETE AND OTHER ADVANCED MATERIALS*, 1995, Toronto, Canada. **Proceedings...** . Toronto, 1995. p. 1-12.

MOBILIZE. Disponível em: <http://www.mobilize.org.br/> Acesso em: 15 mai. 2015.

NINCE, A. A. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. 2006. 336f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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*, 5., 2003, São Paulo. **Anais...** . São Paulo, 2003.

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PINTO JÚNIOR, N. O., **Aduelas pré – moldadas em concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno para revestimento de túneis escavados por TBM**. Campinas: FEC – UNICAMP, 2003. Relatório de Pesquisa.

PINTO JUNIOR, Newton de Oliveira, *et al.* Dimensionamento e análise experimental de aduelas pré-moldadas em concreto reforçado com fibras de aço para revestimento de túneis. *In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 4., 2000, São Paulo. **Artigo Técnico**. São Paulo: 2000. p.17.

RILEM TC 162 – TDF: Test And Design Methods For Steel Fibre Reinforced Concrete – Bending Test – Final Recommendation, **Materials and Structures**, v. 35, November 2002, p. 579-582.

RLE - Rail Link Engineering. Steel fibre reinforced concrete for tunnel linings. **Channel tunnel rail link**, technical report no 000-RUG-RLEEX-00008-AA, 1997.

ROBINS, P. J. Physical properties. *In: AUSTIN, S.A.; ROBINS, P.J. Sprayed Concrete: Properties, design and application*. Scotland. McGraw-Hill. Inc. 1995. p. 52-86.

SALVADOR. R. P. **Análise comparativa de métodos de ensino para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2012. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SCOARIS, M. R.; BARBOSA, M. P.; PINTO JUNIOR, N. O. Aduelas pré-moldadas em concreto reforçado com fibras: avaliação das propriedades mecânicas pelo Método da Maturidade. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO*, 1., 2005, São Carlos. **Anais...** .São Carlos, 2005.

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)**. 2013. 147f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2013.

SINGH, S.; SHUKLA, A.; BROWN, R. Pullout Behaviour of Polypropylene Fibers From Cementitious Matrix. **Cement and Concrete Research**. n. 34, p. 1919-1925, 17 fev. 2004.

STRONG, A. B. **Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications**. 2. ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

SULLIVAN, P. J. E. A probabilistic method of testing for the assessment of deterioration and explosive spalling of high strength concrete beams in flexure at high temperature. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 26, p. 155-162, 2004.

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.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A.D. Polypropylene fiber reinforced concrete: shrinkage cracking In: International Conference Composites in Constructions – CCC2001, 2001, Porto. **Composites in Construction**. Lisse: A.A. Balkema Publishers. p. 39-42. 2001

VENDRUSCOLO, M. A., **Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos Fibrosos para Aplicação como Reforço de Base de Fundações Superficiais**. 2003. 224f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VILLARES, A. N. O. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2001.128f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2001.

## APÊNDICE A – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES

### Relatório de Ensaios do Concreto – Pesquisa de Mestrado André Róseo

#### Informações

Data do Ensaio: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_

**Resistência Característica do Concreto ( $f_{ck}$ ):** 45 MPa.

**Geometria dos corpos de prova:** Cilíndrico (10 mm x 20 mm)

**Moldes:** CP de Concreto Cilíndrico ( ) sem fibra ( ) com fibra – Teor: \_\_\_\_ Kg/m<sup>3</sup>.

#### 1. Ensaios do Concreto no Estado Fresco.

##### 1.1. Ensaios do concreto no estado fresco.

Ensaio	Resultado	Norma	Valor Limite	Data
Slump – test (mm)		NBR NM 67:1998	120±20	
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )		NBR 9.833:2009		
Teor de Ar Incorporado (%)		NBR NM 47:2002		

#### 2. Ensaios do Concreto no Estado Endurecido

##### 2.1. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica – NBR 9778:2009

CP/Idade	Ensaio	Resultado (%)	Valor Limite	Média (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
CP I/28	Absorção de Água		≤8%			
CP II/28						
CP III/28						
CP I/28	Índice de Vazios		-			
CP II/28						
CP III/28						
CP I/28	Massa Específica Real		-			
CP II/28						
CP III/28						

##### 2.2. Ensaio de resistência à compressão – NBR 9778:2009

CP/Idade	Resultado (MPa)	Valor Limite (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Data
CP I/7		-				
CP II/7						
CP III/7						
CP I/28		≥45MPa				
CP II/28						
CP III/28						
$f_{ck}$						

**Equipamento utilizado:** Prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca EMIC de modelo PCE100C com capacidade de 100.000 Kgf do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará.

## APÊNDICE B – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS ENSAIOS DE TENACIDADE

### Relatório de Ensaio de Tenacidade – Pesquisa de Mestrado André Róseo

**Informações**

Data do Ensaio: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

**Geometria dos corpos de prova:** Prismático (150 mm x 150 mm x 500 mm)

**Variáveis de Entrada:** frequência, geometria do CP e taxa de carregamento.

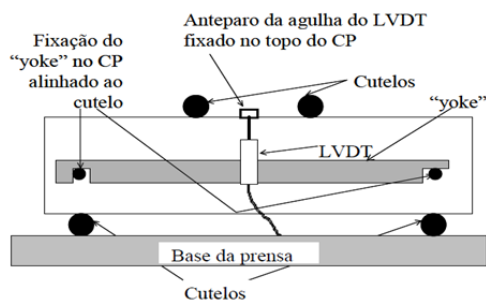
**Variáveis de Saída:** tempo, dados de força e dados de deflexão.

**Tipo de Medição:** LVDT

**Taxa de Carregamento:** 0,15 mm/min

**Moldes:** CP de Concreto Prismático ( ) sem fibra ( ) com fibra – Teor: \_\_\_\_\_ Kg/m<sup>3</sup>.

#### 1. Posicionamento dos corpos de prova, LVDT e Cutelos.



#### 2. Relatório de ensaio

O ensaio iniciou as \_\_\_\_\_ h com temperatura de 28 °C, encerrando-se as \_\_\_\_\_ h.

##### 2.1. Coleta de dados

Ensaio de Tenacidade à Flexão – JSCE-SF4:1984

CP/Idade	Tenacidade (KN.mm)	Fator de Tenacidade (MPa)	Resistência a Flexão sem fibras (MPa)	Coefficiente de Ductilidade (MPa)	Data
CP I/28					
CP II/28					
Média					
Desvio Padrão					
Coefficiente de Variação (%)					

**Equipamento utilizado:** Máquina Eletromecânica EMIC DL 1000 KN do Laboratório da Divisão de Materiais – DIMAT da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – NUTEC.



## APÊNDICE C – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS ENSAIOS DE FORNO

### Relatório de Ensaio de Forno – Pesquisa de Mestrado André Róseo

Informações

Data do Ensaio: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

Temperatura Máxima: 900°C

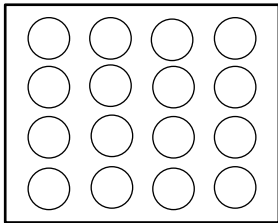
Taxa de Aquecimento: 27,4°C/min

Patamar: 45 min

Moldes: CP de Concreto ( ) sem fibra ( ) com fibra – Teor: \_\_\_\_\_Kg/m<sup>3</sup>.

#### 1. Layout da disposição dos corpos de prova no forno.

---



#### 2. Relatório de ensaio

---

O ensaio iniciou as \_\_\_\_\_ h com forno a temperatura de \_\_\_\_\_ °C, atingido a temperatura máxima as \_\_\_\_\_ h.

#### 3. Impressões Visuais

---

##### 3.1. Cor

---



---



---

##### 3.2. Fissuras e/ou microfissuras

---



---



---

3.3. Lascamento: ( ) SIM ( ) NÃO.

## APÊNDICE D – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS.

A Tabela D1 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água por imersão e fervura dos concretos produzidos com a incorporação de fibra de aço e polipropileno.

Tabela D1 – Resultado do Ensaio de Absorção de Água dos Concretos Produzidos com fibras de aço e polipropileno

Concreto	CP	Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Massa Hidrostática (g)	Absorção de água (%)	Absorção de água Média (%)
REF	1	3.501	3.643	2.086	4,1	4,0
	2	3.525	3.674	2.115	4,2	
	3	3.544	3.672	2.098	3,6	
CRFA25	1	3.528	3.664	2.096	3,9	3,7
	2	3.553	3.686	2.115	3,7	
	3	3.541	3.665	2.109	3,5	
CRFA35	1	3.580	3.721	2.178	3,9	4,4
	2	3.558	3.724	2.164	4,7	
	3	3.613	3.778	2.216	4,6	
CRFA40	1	3.548	3.675	2.139	3,6	3,3
	2	3.698	3.802	2.231	2,8	
	3	3.705	3.834	2.245	3,5	
CRFP0,5	1	3.413	3.608	2.069	5,7	5,3
	2	3.455	3.636	2.083	5,2	
	3	3.467	3.634	2.085	4,8	
CRFP1,0	1	3.438	3.619	2.035	5,3	5,4
	2	3.364	3.566	1.971	6,0	
	3	3.407	3.577	2.046	5,0	
CRFP1,5	1	3.384	3.581	2.042	5,8	5,8
	2	3.318	3.504	1.981	5,6	
	3	3.411	3.614	2.007	6,0	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As Tabelas D2 e D3 apresentam as análises de variância dos resultados de absorção de água dos concretos produzidos com fibras de aço e fibra de polipropileno.

Tabela D2 – Análise de variância da absorção de água dos concretos produzidos com fibra de aço

Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,0001918	3	0,0000639	5,5186270	0,023823	4,066181	S
Dentro dos grupos	0,0000927	8	0,0000116				
Total	0,000284	11					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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

Tabela D3 – Análise de variância da absorção de água dos concretos produzidos com fibra de polipropileno

<b>Fonte da Variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>	<b>Significância</b>
Entre grupos	0,000568	3	0,0001895	12,46434	0,0022	4,066181	S
Dentro dos grupos	0,000122	8	0,0000152				
Total	0,00069	11					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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

## APÊNDICE E – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS.

A Tabela E1 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos produzidos com a incorporação de fibra de aço e polipropileno.

Tabela E1 – Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão dos Concretos Produzidos com fibras de aço e polipropileno

Concreto	CP	Resistencia à Compressão (MPa)	Resistencia à Compressão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	F <sub>ck</sub> (MPa)
REF	1	47,1	48,1	1,1	46,3
	2	47,9			
	3	49,3			
CRFA25	1	48,5	51,7	2,8	47,1
	2	53,7			
	3	52,8			
CRFA35	1	54,2	52,1	3,0	47,2
	2	48,7			
	3	53,3			
CRFA40	1	54,5	54,3	0,2	54,0
	2	54,2			
	3	54,2			
CRFP0,5	1	47,0	48,3	1,3	46,1
	2	48,2			
	3	49,6			
CRFP1,0	1	48,2	48,9	1,5	46,4
	2	50,7			
	3	47,9			
CRFP1,5	1	48,2	49,4	1,5	47,0
	2	51,1			
	3	49,0			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As Tabelas E2 e E3 apresentam as análises de variância dos resultados da resistência à compressão dos concretos produzidos com fibras de aço e fibra de polipropileno.

Tabela E2 – Análise de variância da resistência à compressão dos concretos produzidos 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					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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

Tabela E3 – Análise de variância da resistência à compressão dos concretos produzidos com fibra de polipropileno

<b>Fonte da Variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>	<b>Significância</b>
Entre grupos	3,416667	3	1,138889	0,604185	0,630471	4,066181	NS
Dentro dos grupos	15,08	8	1,885				
Total	18,49667	11					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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

## APÊNDICE F – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA TENACIDADE À FLEXÃO DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS.

A Tabela F1 apresenta os resultados do ensaio de tenacidade à flexão dos concretos produzidos com a incorporação de fibra de aço.

Tabela F1 – Resultado do Ensaio de Tenacidade à Flexão dos Concretos Produzidos com fibras de aço

Concreto	CP	Tenacidade à Flexão (KN.mm)	Resistencia Equivalente à Flexão (MPa)	Resistência à Flexão do concreto sem fibras (MPa)
CRFA25	1	71,916	3,20	4,22
	2	69,129	3,07	4,34
CRFA35	1	103,625	4,61	5,12
	2	94,855	4,22	5,06
CRFA40	1	120,335	5,35	4,67
	2	133,689	5,94	4,85

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela F2 apresenta as análises de variância dos resultados da tenacidade à flexão dos concretos produzidos com fibras de aço.

Tabela F2 – Análise de variância da tenacidade à flexão dos concretos produzidos 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					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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

## APÊNDICE G – RESULTADOS BRUTOS E ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS APÓS ELEVADAS TEMPERATURAS (900°C).

A Tabela G1 apresenta os resultados da simulação de incêndio através da resistência à compressão dos concretos produzidos com a incorporação de fibra de polipropileno após elevadas temperaturas (900°C).

Tabela G1 – Resultado da simulação de incêndio (resistência à compressão) dos concretos produzidos com fibras de polipropileno após elevadas temperaturas (900°C).

Concreto	CP	Resistencia à Compressão a 900°C (MPa)	Resistencia à Compressão Média a 900°C (MPa)	Fator de Redução (FR)
REF	1	0,00	0,00	0,00000
	2	0,00		
CRFP0,5	1	1,41	1,55	0,03209
	2	1,68		
CRFP1,0	1	2,11	1,91	0,03906
	2	1,71		
CRFP1,5	1	3,21	2,91	0,05891
	2	2,61		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela G2 apresenta as análises de variância dos resultados da simulação de incêndio (resistência à compressão) dos concretos produzidos com fibras de polipropileno após elevadas temperaturas (900°C).

Tabela G2 – Análise de variância da simulação de incêndio (resistência à compressão) dos concretos produzidos com fibra de polipropileno após elevadas 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					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

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