



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS  
AVANÇADOS À BASE DE PÓS-REATIVOS COM  
MISTURAS HÍBRIDAS DE FIBRAS E REDUZIDO  
IMPACTO AMBIENTAL**

**ROBERTO CHRIST**

São Leopoldo, fevereiro 2014.



C554d

Christ, Roberto

Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental / Roberto Christ. – 2014.

110 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2014.

“Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio”

1. Engenharia Civil. 2. Concreto de alta resistência. 3. Concreto – Aditivos. I. Título.

CDU 624  
624.012.4

Catálogo na fonte:  
Mariana Dornelles Vargas – CRB 10/2145



ROBERTO CHRIST

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS AVANÇADOS À BASE DE  
PÓS-REATIVOS COM MISTURAS HÍBRIDAS DE FIBRAS E  
REDUZIDO IMPACTO AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Mauricio Mancio

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo, fevereiro de 2014.

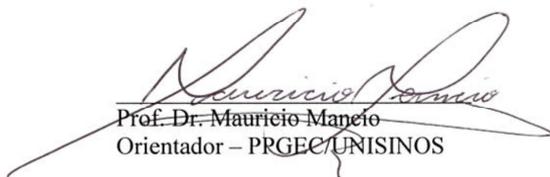


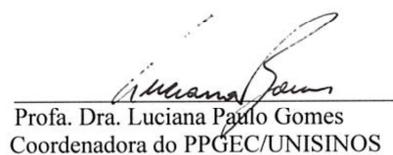
**ROBERTO CHRIST**

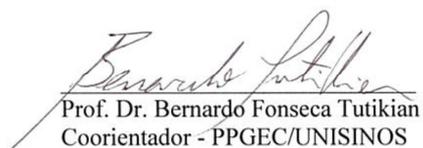
**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS  
AVANÇADOS À BASE DE PÓS-REATIVOS COM MISTURAS  
HÍBRIDAS DE FIBRAS E REDUZIDO IMPACTO  
AMBIENTAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2014

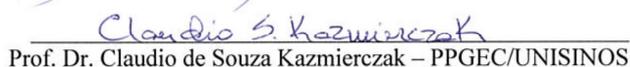
  
Prof. Dr. Maurício Mançó  
Orientador – PPGEC/UNISINOS

  
Profa. Dra. Luciana Paulo Gomes  
Coordenadora do PPGEC/UNISINOS

  
Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian  
Coorientador - PPGEC/UNISINOS

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho - PPGEC /UFRGS

  
Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak – PPGEC/UNISINOS



Dedico este trabalho a minha esposa Viviane  
Aos meus filhos Lucas e Bruno  
Aos meus pais Remi e Romana  
Aos meus irmãos Fábio, Marcelo e Márcia



## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa que durante todo o tempo esteve do meu lado me auxiliando nos momentos difíceis com um carinho incondicional e aos meus filhos que me dão a alegria de prosseguir e continuar a carreira docente.

Aos meus orientadores pela dedicação e atenção prestada durante estes curtos dois anos, que além de serem meus orientadores são para mim verdadeiros amigos, em especial ao Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian em quem me inspiro muito.

Aos colegas do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Unisinos, Mauricio, Rodrigo, Felipe e Ingrid pela ajuda e toda a atenção dada durante as moldagens e ensaios lá realizados.

Um agradecimento especial ao Instituto ITT PERFORMANCE pela fonte financiadora, e os colegas do instituto que me auxiliaram durante as moldagens e ensaios, Fernanda, Gustavo, Luiz, Frederico e Emir.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da instituição pelo conhecimento transmitido.

Muito Obrigado!



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	23
1.2	OBJETIVOS .....	25
1.2.1	<i>Objetivos específicos</i> .....	25
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA .....	25
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>27</b>
2.1	HOMOGENEIDADE DA MISTURA .....	28
2.2	PRINCÍPIOS DE DOSAGEM POR EMPACOTAMENTO DE MATERIAIS .....	31
2.3	CURA TÉRMICA .....	34
2.4	PRESSÃO CONFINANTE.....	36
2.5	ADIÇÕES MINERAIS .....	38
2.6	ADIÇÃO DE FIBRAS .....	40
2.7	DURABILIDADE .....	45
2.8	MATERIAIS CONSTITUINTES DO CPR .....	47
2.8.1	<i>Cimento</i> .....	48
2.8.2	<i>Areia</i> .....	48
2.8.3	<i>Pó de quartzo</i> .....	49
2.8.4	<i>Sílica ativa</i> .....	49
2.8.5	<i>Aditivos superplastificantes</i> .....	50
2.8.6	<i>Fibras</i> .....	50
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>52</b>
3.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS .....	52
3.1.1	<i>Variáveis de resposta</i> .....	54
3.1.2	<i>Variáveis de controle</i> .....	55
3.2	MATERIAIS.....	56
3.2.1	<i>Cimento</i> .....	56
3.2.2	<i>Cinza volante</i> .....	57
3.2.3	<i>Sílica Ativa</i> .....	59
3.2.4	<i>Pó de quartzo</i> .....	61
3.2.5	<i>Areia</i> .....	62
3.2.6	<i>Aditivos</i> .....	63
3.2.7	<i>Fibras</i> .....	63
3.3	PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS .....	64
3.4	MÉTODOS.....	65
3.4.1	<i>Procedimento de mistura dos materiais</i> .....	65
3.4.2	<i>Trabalhabilidade</i> .....	66
3.4.3	<i>Cura</i> .....	67
3.4.4	<i>Ensaio de resistência à compressão axial</i> .....	67
3.4.5	<i>Ensaio de resistência à tração na flexão</i> .....	69
3.4.6	<i>Absorção de água por sucção capilar</i> .....	76
3.4.7	<i>Ataque químico</i> .....	76
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
4.1	PRIMEIRA ETAPA .....	78
4.1.1	<i>Substituição parcial do cimento por cinza volante</i> .....	78
4.2	SEGUNDA ETAPA .....	81
4.2.1	<i>Trabalhabilidade</i> .....	82
4.2.2	<i>Resistência à compressão</i> .....	83
4.2.3	<i>Resistência à tração na flexão</i> .....	84
4.2.4	<i>Módulo de elasticidade na flexão</i> .....	85
4.2.5	<i>Tenacidade</i> .....	87
4.3	TERCEIRA ETAPA.....	89

4.3.1	<i>Resistência à compressão</i> .....	90
4.3.2	<i>Resistência à tração</i> .....	91
4.3.3	<i>Ataque químico</i> .....	92
4.3.4	<i>Absorção de água por sucção capilar</i> .....	95
4.3.5	<i>Estudo piloto 1: Microtomografia 3D</i> .....	97
4.3.6	<i>Estudo piloto 2: Microscopia Eletrônica de Varredura</i> .....	100
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>104</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	105
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>106</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Programa experimental da primeira etapa. ....	53
Tabela 2 – Programa experimental da segunda etapa.....	54
Tabela 3 – Programa experimental da terceira etapa.....	54
Tabela 4 - Propriedades físicas e químicas do cimento.....	56
Tabela 5 – Características químicas da cinza volante. ....	58
Tabela 6 – Características químicas da sílica ativa. ....	59
Tabela 7 – Características físicas da sílica ativa.....	59
Tabela 8 – Características físicas do pó de quartzo.....	61
Tabela 9 – Características químicas do pó de quartzo.....	62
Tabela 10 – Análise granulométrica das areias. ....	62
Tabela 11 – Traço utilizado na pesquisa. ....	65
Tabela 12 – Traço utilizado na primeira etapa. ....	78
Tabela 13 – Resultados do ensaio de trabalhabilidade do CPR. ....	79
Tabela 14 – Resultados das resistências à compressão das misturas e médias aritméticas ....	79
Tabela 15 – Resultado da análise de variância desenvolvida com os resultados. ....	80
Tabela 16 – Traço utilizado na segunda etapa.....	82
Tabela 17 – Resultado da trabalhabilidade das misturas híbridas. ....	82
Tabela 18 – Resultados do ensaio de tenacidade.....	89
Tabela 19 – Traço utilizado na terceira etapa.....	90
Tabela 20 – Resultados à compressão ao longo do tempo. ....	90
Tabela 21 – Resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade.....	96



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem da seção dos dois tipos de concreto (CAD e CPR).....	21
Figura 2 – Passarela de Sherbrooke no Canadá.....	23
Figura 3 – Passarela de Seonyu na Coreia do Sul. ....	24
Figura 4 – Placas para blindagem.....	24
Figura 5 – Escada confeccionada com CPR.....	24
Figura 6 - Esquemática da zona de transição em concretos.....	28
Figura 7 - Variação da densidade relativa com teor de água.....	30
Figura 8 - Porosidade acumulada de concretos de 30 e 80 MPa e CPR de 200 MPa. ....	31
Figura 9 – Comparação da resistência em função da densidade do material. ....	33
Figura 10 - Atividade pozzolânica em função do tratamento térmico em CPR.....	35
Figura 11 – Resistências à flexão de CPR sem fibras em diferentes tempos de cura térmica e com diferentes pressões confinantes.....	36
Figura 12 - Resistências à flexão de CPR com fibras metálicas em diferentes tempos de cura térmica e com diferentes pressões confinantes.....	36
Figura 13 – Forma desenvolvida para aplicação de pressão confinante em concreto.....	37
Figura 14 - Curvas tensão deformação para vários teores de sílica ativa em ensaio de arrancamento. ....	38
Figura 15 - Efeito do teor de cinza volante e tempo de cura na resistência à compressão.....	39
Figura 16 - Comportamento da propagação das fissuras em concretos reforçados com fibras (CRF) e concretos reforçados com fibras híbrida (CRFH). ....	42
Figura 17 – Métodos de determinação da tenacidade. (a) ACI Committee 544, (b) ASTM C 1018.....	43
Figura 18 – Abatimento em relação ao teor de fibras de diferentes tipos de material. ....	43
Figura 19 – Imagens geradas em uma microtomografia 3D: (a) poros, (b) matriz, (c) fibras..	44
Figura 20 – Fluxograma do programa experimental. ....	52
Figura 21 – Distribuição granulométrica do cimento.....	57
Figura 22 – Difratoograma de raio X da cinza volante .....	58
Figura 23 – Distribuição granulométrica da cinza volante.....	59
Figura 24 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.....	60
Figura 25 – Difratoograma de raio-X da sílica ativa.....	60
Figura 26 – Distribuição granulométrica do pó de quartzo.....	61
Figura 27 – Distribuição granulométrica das areias.....	62
Figura 28 – Fibras utilizadas na pesquisa a) Fibras de aço b) fibras de polipropileno.....	63
Figura 29 – Empacotamento máximo possível com os materiais utilizados.....	64
Figura 30- Curva da distribuição granulométrica do traço utilizado na pesquisa (curva em azul). ....	65
Figura 31 – Ensaio de abatimento nas misturas de CPR.....	67
Figura 32 – Corpo-de-prova em ensaio de compressão axial.....	68
Figura 33 – Fôrma cilíndrica utilizadas na pesquisa. ....	68
Figura 34 – Corpo-de-prova sendo retificado.....	69
Figura 35 – Fôrmas prismáticas utilizadas na pesquisa.....	69
Figura 36 – Instrumentação das amostras ensaiadas a flexão. ....	70
Figura 37 – Equipamentos utilizados para aquisição de dados. ....	71
Figura 40 – Tipo de conector utilizado para a ligação dos <i>strain gages</i> ao analisador.....	73
Figura 41 – Esquema da conexão elétrica dos <i>strain gages</i> .....	73
Figura 42 – Representação esquemática do módulo de deformação secante.....	74
Figura 43 – Detalhamento da instrumentação do transdutor de deslocamento.....	75

Figura 44 – Representação da instrumentação utilizada para a determinação do deslocamento axial em peças submetidas a ensaio de flexão. ....	75
Figura 45 – Esquema da instrumentação do ensaio. ....	76
Figura 46 – Esquema do ciclo de agressão. ....	77
Figura 47 – Trabalhabilidade do CPR em ensaio na mesa de consistência. ....	79
Figura 48 – Resistências médias para cada teor de substituição do cimento por cinza volante. ....	80
Figura 49 – Resistência à compressão das misturas com variação de fibras e o referencia. ...	83
Figura 50 – Resistências à tração na flexão das misturas estudadas. ....	84
Figura 51 – Gráfico tensão deformação da parte mais tracionada dos corpos-de-provas prismáticos em ensaio de flexão em quatro pontos. ....	85
Figura 52 – Fissuras fora do terço médio dos corpos-de-prova. ....	86
Figura 53 – Módulo de elasticidade á flexão das diferentes misturas. ....	86
Figura 54 – Diagramas carga $\times$ deslocamento para cada mistura híbrida de fibras. ....	87
Figura 55 – Resistência média dos corpos-de-prova ao longo do tempo. ....	91
Figura 56 – Resistência à tração na flexão ao longo do tempo. ....	91
Figura 57 – Resultados da perda de massa em função dos ciclos de exposição. ....	92
Figura 58 – Resultados da perda de volume em função dos ciclos de exposições. ....	93
Figura 59 – Resistência à tração dos corpos-de-prova após os cinco ciclos de ataque químico. ....	93
Figura 60 – Imagem dos corpos-de-prova após o último ciclo de ataque químico (a) ácido clorídrico (b) ácido nítrico (c) ácido sulfúrico. ....	94
Figura 61 – Visualização interna dos corpos-de-prova submetidos a ataque químico em ácido sulfúrico. ....	95
Figura 62 – Ensaio de absorção capilar. ....	95
Figura 63 – Resultados da absorção por sucção capilar em função do tempo. ....	96
Figura 64 – Corpo-de-prova utilizado para ensaio da microtomografia 3D. ....	97
Figura 65 – Imagem periférica do corpo-de-prova em microtomografia 3D. ....	98
Figura 66 – Distribuição das fibras de aço dentro da mistura. ....	99
Figura 67 – Distribuição das fibras em um corte parcial da imagem. ....	99
Figura 68 – Imagem de micro tomografia 3D com apenas a matriz cimentícia. ....	100
Figura 70 Imagem de MEV da ligação da fibra de polipropileno com a matriz. ....	101
Figura 71 – Imagem de MEV da distribuição das fibras em um trecho da amostra. ....	102
Figura 72 – Imagem de MEV da massa densa sem visualização dos cristais hidratados. ....	103
Figura 73 – Imagem de MEV sulco deixado pela fibra arrancada na fratura do corpo-de-prova. ....	103

## RESUMO

CHRIST, ROBERTO. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental.** São Leopoldo, 2014. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2014.

O desenvolvimento de novos concretos vem sendo ampliado ao longo dos anos, o que ocorre paralelamente ao aprimoramento dos cálculos estruturais e ao maior conhecimento sobre as propriedades dos materiais, o que conduz os projetistas ao desenvolvimento de estruturas que necessitam ter características específicas. Com isso surge a necessidade de se desenvolver concretos especiais, que apresentam elevada resistência mecânica e durabilidade. O concreto de pós reativos, também chamado de CPR, é um exemplo destes materiais. Trata-se de um concreto de ultra alto desempenho, com elevada resistência mecânica, extremamente dúctil e de baixa porosidade. Este tipo de concreto apresenta propriedades mecânicas superiores em comparação aos concretos de alta resistência, chegando a resistências à compressão de 200 MPa, à tração de 45MPa e módulo de elasticidade superior a 50 GPa. O consumo de cimento neste tipo de concreto pode atingir 800 kg/m<sup>3</sup>, além de incorporar elevado volume de sílica ativa. A otimização granular dos constituintes, realizada através de métodos de empacotamento de partículas, faz com que seja possível obter um material com o mínimo de vazios e elevada densidade. As fibras introduzidas no composto proporcionam elevada ductilidade. Neste trabalho, parte do cimento Portland foi substituído por cinza volante, para desenvolver um CPR com baixo consumo de aglomerantes. Também foi estudada a incorporação de dois tipos de fibras, ou hibridização, para uma matriz de CPR com menor consumo de cimento. A introdução de dois tipos distintos de fibras proporciona ao material maior sinergia, diminuindo a formação e a propagação de fissuras durante o carregamento. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que a substituição parcial do cimento por cinza volante apresentou melhor desempenho mecânico, atingindo resistência à compressão de aproximadamente 190 MPa com 30% de adição. A incorporação de dois tipos distintos de fibras, aço e polipropileno em teores de 80% e 20% respectivamente, proporcionou ao material elevada resistência à tração na flexão e tenacidade. Portanto, é possível dosar CPR com menores consumos de cimento e uso de dois tipos de fibras, melhorando as propriedades da mistura e obtendo um compósito com reduzido impacto ambiental.

Palavras-chave: Concretos de Pós Reativos; Concreto com fibras híbridas; Concreto de altíssimo desempenho.



## ABSTRACT

CHRIST, ROBERTO. **Development of advanced cementitious composites of reactive powder with hybrid fiber mixture and reduced environmental impact.** São Leopoldo, 2014. 109 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The development of new concretes is being expanded over the years, with the improvements in structural design, along the increased knowledge of materials properties, which leads the designers to develop structures with specific requirements. It arises the need of the development of special concretes, with enhanced mechanical strength and durability. Reactive powder concrete, also called RPC, is an example of these materials. This is an ultra-high-performance concrete with high mechanical strength, extremely ductile and low porosity. This type of concrete has superior mechanical properties compared to high strength concrete, reaching compressive strengths of 200 MPa, tensile strengths of 45 MPa and modulus higher than 50 GPa. The cement consumption in this type of concrete may reach 800 kg/m<sup>3</sup>, while incorporating high volumes of silica fume. The optimization of granular constituents accomplished by particle packing methods provides a material with a minimum of voids and also high density. The fiber introduced into the material compound provides high ductility. On this report, fly ash was used to replace some part of the cement, aiming the development of a RPC with low agglomerate consumption. It was also studied the use of two types of fiber, or hybridization, to a RPC matrix array of CPR with less consumption of cement. The introduction of two distinct types of fibers gives the material improved synergy, decreasing the formation and propagation of cracks during the charging. The results obtained in this study show that the partial replacement of cement by fly ash gives better mechanical performance, reaching the compressive strength of approximately 190 MPa with 30% addition. The incorporation of two different types of fibers, steel and polypropylene at levels of 80% and 20% respectively, provided the materials high tensile strength and toughness. Therefore, it is possible to compose an RPC with lower cement consumption and use of two types of fibers, improving the properties of the mixture and obtaining a composite with reduced environmental impact.

Keywords : Reactive Powder Concrete, High performance concrete, Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC).



# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos produtos a base de cimento vem aumentando ao longo dos anos, gerando misturas com maior resistência mecânica e durabilidade frente aos concretos convencionais. Concretos modernos podem ser compostos por minerais selecionados, aditivos químicos que melhoram a trabalhabilidade e introdução de fibras que tornam o concreto um produto com maior ductilidade.

O desenvolvimento destes novos concretos, há mais de uma década, fez surgir uma nova “ciência do concreto”, que utiliza equipamentos cada vez mais sofisticados para estudar a micro e nanoestrutura das misturas (AİTCIN, 2000). O surgimento do concreto chamado de alto desempenho ocorreu por volta do ano de 1990, sendo o concreto desenvolvido por Mehta & Aİtcin. Este tipo de material apresenta, por definição, comportamento durante a sua fase de utilização em patamar superior ao concreto convencional, atendendo as exigências requeridas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Os concretos de alto desempenho não apresentam apenas a característica de elevada resistência mecânica, mas também boa trabalhabilidade, bom acabamento final nas peças, integridade e principalmente durabilidade frente aos agentes agressivos do ambiente onde serão inseridos.

Produtos com maior durabilidade são comumente chamados de produtos de alto desempenho. No concreto não é diferente, uma mistura adequada à base de cimento com uso de superplastificantes, devidamente curada, relação água/cimento menor que 0,4, faz com que o concreto apresente baixa ou até negligível permeabilidade, que é a mais desejada propriedade para obtenção de uma longa durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a definição de concreto de alto desempenho pode englobar diferentes características, desenvolvidas para aplicações e ambientes específicos, tais como:

- facilidade de aplicação;
- adensamento sem segregação;
- resistência nas primeiras idades;
- resistências de longo prazo e propriedades mecânicas adequadas;
- baixa permeabilidade;

- elevada densidade;
- desprendimento moderado de calor de hidratação;
- elevada tenacidade;
- estabilidade volumétrica;
- longa vida útil em ambientes agressivos.

A evolução dos concretos se faz necessária, visto que as estruturas estão sendo exigidas cada vez mais, inclusive pela evolução dos cálculos estruturais, com programas computacionais cada vez mais precisos que permitem a determinação das reais solicitações que a estrutura será submetida.

Frente a isso, os concretos seguem o mesmo caminho. Como exemplo, a evolução do concreto convencional (CC), que utilizando aditivos redutores de água e aumentando suas propriedades mecânicas, passa a ser denominado concreto de alta resistência (CAR); com o aprimoramento do CAR, obtem-se o concreto de alto desempenho (CAD). Os materiais utilizados na produção de CAD são praticamente os mesmos do CC, porém com algumas adições e procedimentos especiais de execução são necessários. Uma das evoluções do concreto de alto desempenho é o concreto de pós reativos (CPR) (UHPC) (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O CPR foi inicialmente desenvolvido na França por Pierre Richards por volta do ano de 1990. Esta mistura foi desenvolvida como alternativa ao concreto de alto desempenho. Com a continuação das pesquisas em conjunto com empresas como Lafarge e Rhodia foram iniciados os estudos do CPR com fibras e aditivos especiais, o que tornou a mistura conhecida como concreto com fibras de ultra-alto desempenho (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O princípio básico do CPR é o aumento da homogeneidade da mistura, para isso os agregados graúdos são eliminados e substituídos por agregado miúdo com tamanho dos grãos menores do que 2mm (VANDERLEI, 2004a). Com a inexistência dos agregados graúdos o CPR, sob o ponto de vista granulométrico, é uma argamassa e não um concreto, ao qual podem ser adicionadas fibras. Porém, as propriedades que o material apresenta são as mesmas do concreto, em grau mais elevado, permanecendo assim o termo concreto na maior parte da literatura sobre o tema.

Uma das principais diferenças entre o CAD e o CPR são as dimensões dos agregados. Com a eliminação do agregado graúdo a zona de transição é reduzida e aumenta a

superfície do esqueleto granular. Resplendino (2006) mostra a diferença entre as proporções dos materiais empregados no CAD e no CPR. Na Figura 1 observa-se a inexistência de agregados graúdos no CPR.



**Figura 1 - Imagem da seção dos dois tipos de concreto (CAD e CPR).**

Fonte: Resplendino (2006)

O CPR é constituído basicamente por cimento, areia, sílica ativa, pó de quartzo, água, superplastificante e fibras. O CPR desenvolvido pelos pesquisadores Richard e Cheyrezy em 1995, apresentava em sua composição um elevado teor de cimento, possivelmente superior a  $800 \text{ kg/m}^3$ , e baixa relação água/aglomerante, próxima de 0,20. A substituição do cimento por adições minerais tais como cinza volante e escórias de alto forno pode proporcionar benefícios à matriz tais como a diminuição da retração e diminuição de microfissuras (YİĞİTER *et al.*, 2012).

O elevado consumo de cimento pode acarretar algumas manifestações patológicas, como a fissuração por retração devido ao elevado calor de hidratação. A utilização de cinzas como substituição parcial do cimento diminui a retração em concretos de alto desempenho (GÜNEYISI; GESOĞLU; ÖZBAY, 2010). Por isso, e devido a questões econômicas e ambientais, deve-se buscar a utilização de CPR com o menor consumo de cimento possível.

Jaturapitakkul *et. al.* (2004) verificaram que a substituição do cimento por cinza volante moída, com diâmetro médio das partículas de  $3,8\mu\text{m}$ , em teores de substituição de 15 a 50% em relação à massa do cimento, proporcionou um aumento na resistência à compressão do CPR, sendo que com 25% de substituição apresentou a maior resistência.

Por outro lado o CPR sem a incorporação de fibras é um material muito frágil e com baixa resistência à tração, apesar de ainda ser superior ao concreto convencional. A

introdução de fibras no composto faz com que o material tenha maior ductilidade e elevada resistência à tração.

A incorporação de fibras no composto faz com que a fragilidade seja eliminada, tornando o CPR um material dúctil, pois a inserção das fibras faz com que as fissuras não sejam prolongadas (BANTHIA; GUPTA, 2004).

A incorporação de mais de um tipo de fibra no composto, e com variadas dimensões, proporciona uma melhor eficácia quanto à prevenção da formação e propagação das fissuras geradas na zona tracionada. As fibras com menores dimensões fazem com que as micro fissuras não sejam iniciadas, enquanto as fibras com dimensões maiores inibem a propagação das fissuras (CHEN; LIU, 2005).

A hibridização pode desempenhar uma importante detenção das fissuras e assim atingir alto desempenho em concretos. As propriedades mecânicas da mistura com incorporação de microfibras distribuídas aleatoriamente controlam a iniciação e a propagação das fissuras (DAWOOD; RAMLI, 2011).

O benefício da introdução de mais de um tipo de fibra não está apenas ligado a resistência à flexão, pois a durabilidade da estrutura também é beneficiada, uma vez que a minimização da formação de fissuras, tanto micro como as macro, ajuda a minimizar o processo de deterioração da estrutura (OSTERTAG; BLUNT, 2007).

A utilização de apenas fibras metálicas pode prejudicar o desempenho do material, as fibras de aço que são introduzidas na mistura do CPR podem oxidar e ainda as fibras de aço utilizadas são fibras importadas, não são produzidas no Brasil. A utilização de fibras sintéticas, como as fibras de polipropileno atuam na formação das fissuras e não oxidam, são facilmente encontradas no mercado nacional.

A baixa porosidade e as excelentes propriedades da microestrutura fazem com que a durabilidade do material seja prolongada. A elevada durabilidade do CPR permite que seja possível a sua utilização na execução de recipientes para armazenamento de rejeitos de materiais radioativos, por exemplo (MATTE; MORANVILLE, 1998).

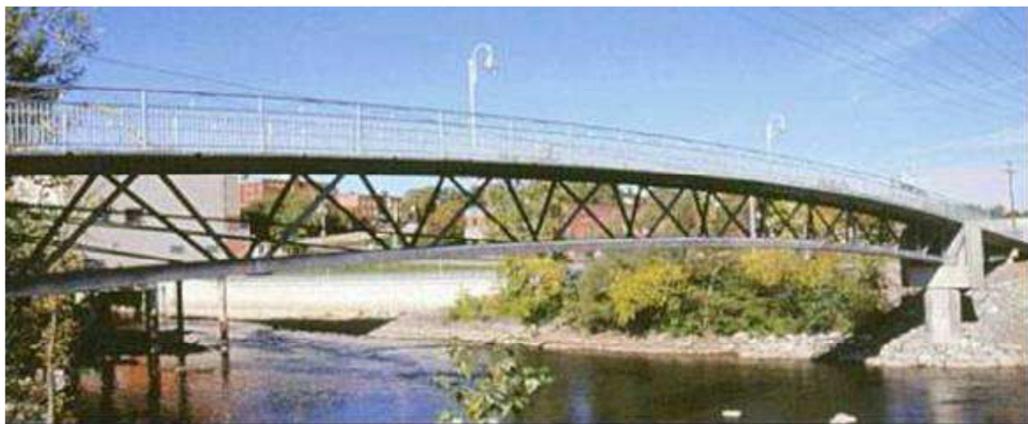
Portanto, com o intuito de desenvolver um CPR com propriedades mecânicas e de durabilidade melhoradas, com consumo de cimento e de microfibras metálicas o mais reduzido possível, o presente trabalho avaliará a substituição parcial do cimento por cinza volante em teores de 0 a 40% e a proporção ideal entre dois tipos de fibras, as de aço e de polipropileno, com a proporção de fibras mantida em 3% do volume do material.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O CPR é um material novo e com grande potencial, sua aplicação em elementos estruturais de diferentes formas pode proporcionar uma maior durabilidade e elevada resistência mecânica, possibilitando uma significativa redução no volume de materiais empregados.

Pesquisas internacionais como as de Larrard e Sedren (1993), Cheyrezy, Maret e Frouin (1995), Yunsheng (2008), Ding et al. (2011), Aydin et al. (2012) mostram que as propriedades do CPR proporcionam diversas alternativas de aplicação em várias áreas da construção civil.

O CPR mostra-se uma boa alternativa, por exemplo, para projetos de estruturas pré-fabricadas de concreto, porém um conhecimento mais aprofundado do material é de fundamental importância. Com o melhor conhecimento das propriedades pode-se executar estruturas e peças cada vez mais leves com menores dimensões e com maior durabilidade. Existem estruturas construídas com esta tecnologia, mostrando a viabilidade técnica e econômica do CPR, como a passarela de Sherbrooke construída no Canadá e a passarela de Seonyu, na Coreia do Sul, conforme apresentam as [Figura 2](#) e 3, respectivamente.



**Figura 2 – Passarela de Sherbrooke no Canadá.**

Fonte: BATOZ; BEHLOUL, 2009



**Figura 3 – Passarela de Seonyu na Coréia do Sul.**

Fonte: BEHLOUL; LEE, 2003

O CPR está sendo utilizado em diversos segmentos na construção civil, como em estruturas de escadas, brises de fachadas, placas decorativas e para uso de blindagem. As figuras 4 e 5 ilustram possíveis utilizações do CPR.

**Figura 4 – Placas para blindagem.**

Fonte: CAVILL; REBENTROST; PERRY, 2006

**Figura 5 – Escada confeccionada com CPR.**Fonte: BEHLOUL *et al.*, 2008

A utilização do CPR em obras de engenharia tende a crescer cada vez mais com o melhor conhecimento das propriedades do material. A fim de obter um maior conhecimento sobre o CPR foi elaborado o objetivo para esta pesquisa, motivada pelo fato de que as análises e resultados adquiridos possam contribuir para o desenvolvimento do CPR no Brasil.

Desenvolver um CPR economicamente viável e com menor impacto ambiental, através da substituição do cimento por cinza volante, aumentar seu desempenho mecânico utilizando microfibras metálicas e de polipropileno em uma mistura híbrida e assim analisar a viabilidade do desenvolvimento do CPR em empresas de pré-moldados.

## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um CPR com uma mistura híbrida de dois tipos de fibras (metálicas e de polipropileno) e com menor impacto ambiental, pela utilização de cinza volante em substituição parcial do cimento, além de avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade do material.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são:

- Determinar o teor viável de substituição parcial do cimento por cinza volante, com base na resistência à compressão e consistência no estado fresco;
- Determinar a melhor proporção entre os dois tipos de fibras, considerando a resistência à compressão, tração na flexão e consistência;
- Analisar as propriedades mecânicas e físicas da mistura resultante, incluindo resistência à compressão e resistência à tração na flexão, ambas ao longo do tempo;
- Avaliar a durabilidade frente ao ataque químico por ácidos;
- Avaliar a absorção de água por sucção capilar;

## **1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA**

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos:

- O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o CPR, o objetivo da pesquisa e as delimitações do trabalho;
- O objetivo do segundo capítulo denominado revisão bibliográfica é a abordagem dos conceitos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa, assim como uma contextualização do CPR e suas potencialidades;
- O terceiro capítulo intitulado programa experimental, apresenta todos os ensaios realizados, assim como as normativas norteadoras;

- No quarto capítulo a apresentação, análise e discussão dos resultados são expostos, além dos resultados obtidos nos ensaios e a análise destes;
- Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões alcançadas com o desenvolvimento deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

#### **1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Com os objetivos do estudo definidos, e para que possam ser definidos parâmetros de comparação com outras pesquisas, foram traçados os contornos que limitam esta pesquisa.

- a) Tipo de cimento – como um dos objetivos deste trabalho é avaliar a substituição parcial do cimento por cinza volante decidiu-se trabalhar com um cimento do tipo CP V – alta resistência inicial, por se tratar de um cimento mais puro e facilmente encontrado no mercado;
- b) Aditivo – devido à alta concentração de materiais finos como cimento, sílica ativa, pó de quartzo e cinza volante a utilização de um aditivo superplastificante de terceira geração é de suma importância, por isso foi utilizado um aditivo a base de policarboxilato;
- c) Adensamento – os corpos-de-prova utilizados para esta pesquisa receberam um adensamento de 25 golpes divididos em duas camadas, além da aplicação de pressão confinante de 5MPa no material ainda no estado fresco durante 24 horas;
- d) Cura térmica – os corpos-de-prova após 24 horas da moldagem foram submetidos a uma cura térmica úmida de 100°C por durante 24 horas;
- e) Cura – após a realização da cura térmica os corpos-de-prova foram mantidos na sala de cura úmida do Laboratório de Materiais de Construção – LMC até a idade de cada ensaio.

Sendo assim esta pesquisa fica limitada a estes aspectos, podendo servir como sugestões para trabalhos posteriores aspectos não abordados neste estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento de novos materiais a base de produtos cimentícios com propriedades mecânicas cada vez mais elevadas vem sendo intensificado ao longo dos anos. Concretos de alto desempenho podem ser obtidos com baixas relações a/c, uso de aditivos e adições, elevados teores de cimento, incorporação híbrida de fibras, gerando um material de elevada densidade com baixíssima porosidade, similar a uma rocha, dando origem a material praticamente sem defeitos internos e com elevada resistência mecânica.

Aïtcin (2000) relata que os cimentos modernos são superiores aos cimentos de 40 a 50 anos atrás no que diz respeito à alta resistência inicial, não sendo mais necessário utilizar um cimento com elevada finura Blaine. Um percentual da resistência à compressão do concreto é uma função da proximidade dos grãos de cimento na mistura (AÏTCIN, 2000).

O concreto armado é o material de construção mais utilizado pelo homem. Este material é bastante popular entre profissionais da construção civil, desde seu processo de fabricação até seu lançamento. As estruturas de concreto armado são cada vez mais exigidas devido à elevada esbelteza dos edifícios e grande poluição dos ambientes. As evoluções dos cálculos estruturais, principalmente com a disponibilidade de programas computacionais, estão aliadas ao maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto armado. Por muitas vezes, o concreto convencional (CC) não atende aos requisitos para estes tipos de construções, sendo necessária a utilização dos concretos de alto desempenho (CAD) (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Uma evolução do CAD é o concreto de pós reativos (CPR) – *Reactive Powder Concrete*. Este é denominado também como sendo concreto de ultra alto desempenho (CUAD), assim como o *densified with small particles* (DSP), ou *macro defect free* (MDF). A similaridade na produção destes concretos é a utilização de materiais ultra finos, baixa relação água/cimento e aditivos dispersantes utilizados em ambas técnicas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O CPR é um concreto de ultra alta resistência, comumente com alto teor de cimento, com materiais ultrafinos como sílica ativa, pó de quartzo e areia com dimensões de grãos geralmente menores que 300 µm e micro fibras com dimensões aproximadas de 1,2 mm de comprimento e 0,2 mm de diâmetro, o que proporciona uma elevada ductilidade (RICHARD; CHEYREZY, 1995). O material apresenta propriedades mecânicas elevadas com

resistência à compressão próximo a 200 MPa, podendo chegar a 800 MPa, e módulo de elasticidade de 45 GPa (VANDERLEI, 2004a).

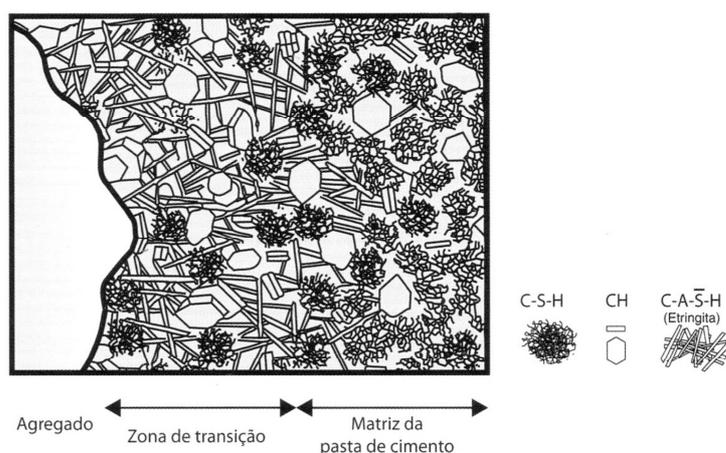
## 2.1 HOMOGENEIDADE DA MISTURA

Concretos convencionais e de alto desempenho são materiais heterogêneos, no qual os constituintes formam um esqueleto granular envolvido pelo aglomerante. A dureza dos agregados é maior do que a pasta de cimento e a ruptura acontece preferencialmente na interface pasta/agregado (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Em um olhar macroscópico o concreto convencional é composto por dois constituintes, argamassa e brita. Estes dois materiais, quando consolidados, apresentam módulos de elasticidade diferentes, e assim não trabalham da mesma forma, prejudicando seu desempenho (WARNOCK, 2005). No CPR a ausência do agregado graúdo faz com que a mistura tenha mais homogeneidade. Esta homogeneidade proporciona ao CPR ganhos na micro estrutura interna.

A fase zona de transição é a mais frágil nos CAD, necessitando, portanto, um cuidado extra para diminuir sua influência negativa. Esta zona depende do tamanho e da forma do agregado. Concretos com agregados de maior dimensão e forma angular são os que mais se pronunciam negativamente (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A Figura 6 mostra a representação da zona de transição na interfase agregado/pasta de um concreto convencional.



**Figura 6 - Esquemática da zona de transição em concretos.**

Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2008).

A região mais frágil dos concretos convencionais é a interface pasta/agregado. O concreto, ao ser submetido a forças de compressão, gera tensões de tração internas, que fazem

nascer microfissuras na interface pasta/agregado. RICHARD e CHEYREZY (1995) descrevem que o tamanho destas fissuras está relacionado com a extensão da zona sob tração e o diâmetro do agregado, inclusive no caso de uma inserção esférica o tamanho da fissura é diretamente proporcional ao diâmetro do agregado.

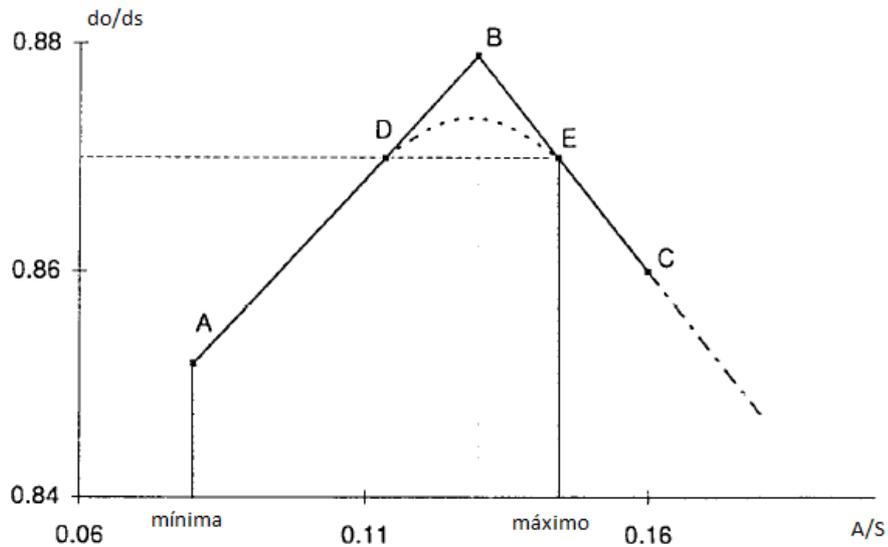
Nos concretos convencionais os agregados graúdos e miúdos são os componentes majoritários de todo o volume, formando um arranjo granular rígido onde boa parte da retração existente no concreto é absorvida por este arranjo granular. No CPR a massa total de agregados, areia e pó de quartzo é de em torno de 30%, assim os agregados não apresentam este arranjo rígido e sim um conjunto de agregados aglomerados a uma matriz contínua (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Ainda segundo RICHARD e CHEYREZY (1995), os problemas de heterogeneidade no CPR podem ser substancialmente reduzidos pelas seguintes razões:

- eliminação dos agregados graúdos, utilizando apenas agregados finos;
- aumento da compactidade através da otimização granular;
- melhoria nas propriedades micro estruturais, devido a aplicação de pressão e temperatura de cura; incorporação de fibras metálicas para melhora da ductilidade.

A otimização granular procura o melhor empacotamento das partículas torna o CPR um material praticamente sem defeitos, possibilitando a produção de uma mistura alternativa para produção de edificações blindadas e estocagem de resíduos nucleares (YUNSHENG *et al.*, 2008).

O aumento da densidade relativa do CPR está ligado a otimização granular e baixa teor de água. RICHARD e CHEYREZY (1995) afirmam que o principal parâmetro da qualidade da mistura granular é a quantidade mínima de água adicionada aos pós para se obter a melhor fluidificação. O índice de vazios da mistura granular corresponde à soma da demanda de água e ar aprisionado. Os pesquisadores desenvolveram um método para definir a melhor relação água/aglomerante para uma mistura com maior densidade. Depois da seleção de uma mistura granular, desenvolveram misturas com quantidades de água diferentes utilizando parâmetros globais de densidade. Os parâmetros utilizados são  $d_0/d_s$ , sendo que  $d_0$  é a densidade do concreto após a moldagem e  $d_s$  é a densidade da mistura granular sem água. A Figura 7 apresenta o resultado obtido.



**Figura 7 - Variação da densidade relativa com teor de água.**

Fonte: RICHARD & CHEYREZY (1995).

O ponto A corresponde a densidade relativa para relação mínima de água/aglomerante e no ponto B o ar aprisionado não é mantido devido à elevada presença de água. O ponto C corresponde à máxima relação água/aglomerante para a menor relação  $d_o/d_s$ . Pode-se observar na Figura 7 que uma mesma relação de densidade pode ser obtida com diferentes relações água/aglomerante, porém os autores explicam que a amostra correspondente ao ponto E apresenta um melhor desempenho mecânico do que o ponto D, uma vez que o primeiro contém mais água que será parcialmente integrada na fase sólida após a hidratação.

Analisando os resultados da pesquisa é possível observar que a quantidade de água ótima na prática é maior do que a teórica. A amostra E em relação a D tem a vantagem adicional de possuir uma melhor reologia. Com isso, observa-se que para a produção de um CPR, assim como na maioria das misturas cimentícias, a relação água/aglomerante é de fundamental importância, juntamente com a densidade do material.

O primeiro parâmetro para o desenvolvimento de um CPR é a densidade absoluta do conjunto de materiais sem a adição de água. Densidade relativa, teor de água ótimo e uma mistura eficiente são os processos que proporcionam qualidade ao produto (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Com o empacotamento das partículas é possível criar um concreto com poucos poros, o que é fundamental no aumento da resistência e um excelente parâmetro de durabilidade.

Os autores Roux, Andrade e Sanjuan (1996) desenvolveram um experimento e compararam quatro tipos de concreto, um de resistência à compressão convencional de 30 MPa, um de alta resistência de 80 MPa e dois CPR, ambos com resistência de 200 MPa, porém, o CPR denominado 200c foi submetido a uma pressão confinante ainda no estado fresco.

Estudos mostram que a porosidade em CPR é bem menor em comparação com concretos convencionais e de alta resistência, como mostra a Figura 8.

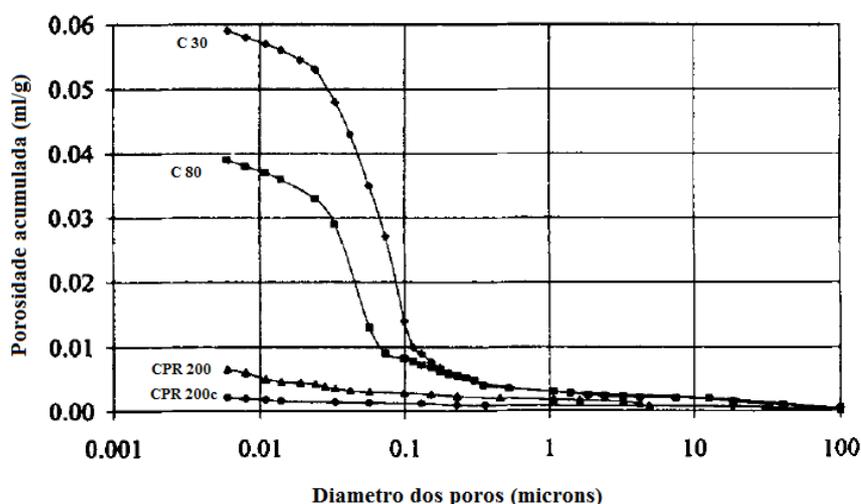


Figura 8 - Porosidade acumulada de concretos de 30 e 80 MPa e CPR de 200 MPa.

Fonte: ROUX, ANDRADE e SANJUAN, (1996)

Os resultados mostrados na Figura 8, despontam que o concreto de 80 MPa apresenta cerca de 65% menos porosidade que o concreto de 30 MPa, o CPR que foi submetido a um confinamento apresenta cerca de 31% menos porosidade do que o CPR sem aplicação de pressão confinante. Ainda, comparando o CPR 200c com o concreto C80 observa-se uma porosidade cerca de 95% menor no CPR mostrando o grande potencial do material quanto a durabilidade (ROUX; ANDRADE; SANJUAN, 1996).

## 2.2 PRINCÍPIOS DE DOSAGEM POR EMPACOTAMENTO DE MATERIAIS

O estudo de dosagem de CPR ainda não está bem consolidado. Métodos utilizados para determinação de traços de concretos, tanto convencionais como de alto desempenho, não apresentam um bom resultado quando utilizados para determinar um traço de CPR.

A dosagem do CPR procura criar um material com o mínimo de defeitos, utilizando materiais com diâmetros de partículas bastante pequenas, o que proporciona ao material uma alta densidade.

Traços de CPR são obtidos através de análise da distribuição granulométrica dos materiais constituintes. Estudos têm mostrado que métodos matemáticos de empacotamento de partículas, como o de *FURNAS (1931)*, *ANDREASSEN MODIFICADO (1992)* e *ANDEREGG (1931)* são bastante eficientes (VANDERLEI, 2004a).

Estes métodos foram desenvolvidos para reduzir a porosidade e maximizar a densidade do processo cerâmico no final dos anos 20 e início de 30 (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

O método de empacotamento de Furnas foi baseado em partículas esféricas, supondo que todas as partículas pequenas preenchem os vazios entre as partículas maiores, sem que haja a perturbação das partículas grandes (MANGULKAR; JAMAKAR, 2013). O método de empacotamento proposto por Furnas consiste em determinar a porcentagem acumulada de cada partícula de diâmetro inferior em relação a maior partícula existente na mistura, conforme aponta a Equação 1.

$$CPFT = \left( \frac{D_p^{\log.r} - D_S^{\log.r}}{D_L^{\log.r} - D_S^{\log.r}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- CPFT – porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D (*Cumulative Percent Finer Than*)
- D – tamanho da partícula
- $D_L$  – tamanho da maior partícula na distribuição
- $D_S$  – tamanho da menor partícula da distribuição
- r – razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes

As teorias relacionadas ao empacotamento de partículas originaram de duas abordagens básicas: a abordagem discreta, considerando a análise da distribuição de cada partícula individualmente, como exemplificado pelo método de Furnas; e o método contínuo, onde se pressupõe que existe uma distribuição contínua até partículas infinitamente pequenas, como o método de Andreassen Modificado (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

A formulação do método de Andreassen Modificado é mostrada na Equação 2.

$$CPFT = \left( \frac{D_p}{D_L} \right)^q \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- CPFT – porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D (*Cumulative Percent Finer Than*)
- $D_p$  – tamanho da partícula em análise
- $D_L$  – tamanho da maior partícula na distribuição
- $q$  – coeficiente de distribuição

LARRARD e SEDRAN (1993) desenvolveram uma pesquisa com objetivo de criar um CPR com materiais normais facilmente encontrados. Para o desenvolvimento do traço utilizado, os pesquisadores usaram o método para prever a viscosidade de suspensão de partículas multimodais, desenvolvido por MOONEY em 1951, quando foi mostrado que este método pode ser utilizado como um modelo de empacotamento de partículas para a produção de CPR.

O empacotamento das partículas conduz a um material com menor índice de vazios, sendo assim uma elevada densidade e conseqüentemente um aumento na resistência mecânica e na durabilidade dos concretos (ABDEL-JAWAD; ABDULLAH, 2002). A Figura 9 mostra que, com o aumento da densidade do material através do melhor empacotamento das partículas, pode-se alcançar um aumento na resistência à compressão da mistura.

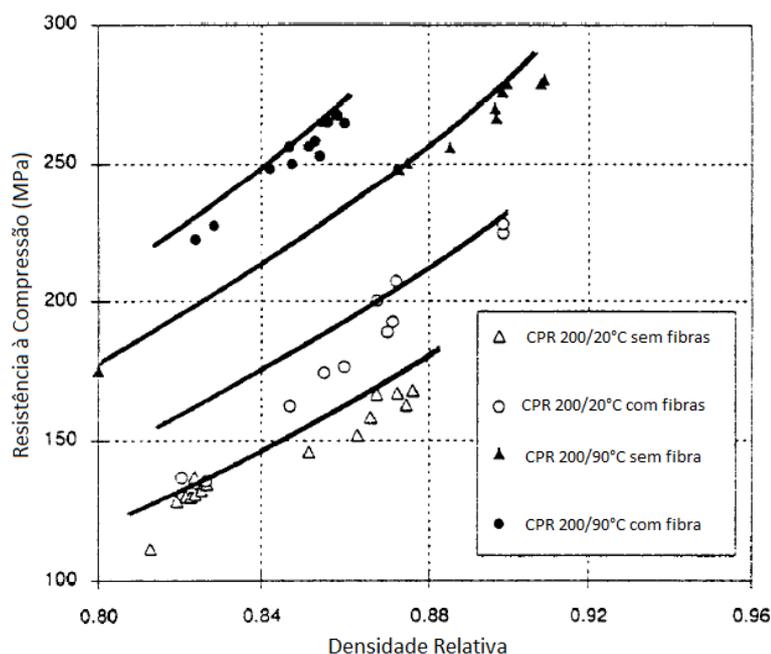


Figura 9 – Comparação da resistência em função da densidade do material.

Fonte: RICHARD & CHEYREZY (1995).

Como já mencionado anteriormente não há ainda uma definição de um método para determinação de um traço de CPR. Os métodos de empacotamento são na verdade ferramentas que auxiliam na determinação do melhor arranjo das partículas, sendo necessário que as quantidades sejam previamente conhecidas ou determinadas iterativamente por tentativa e erro.

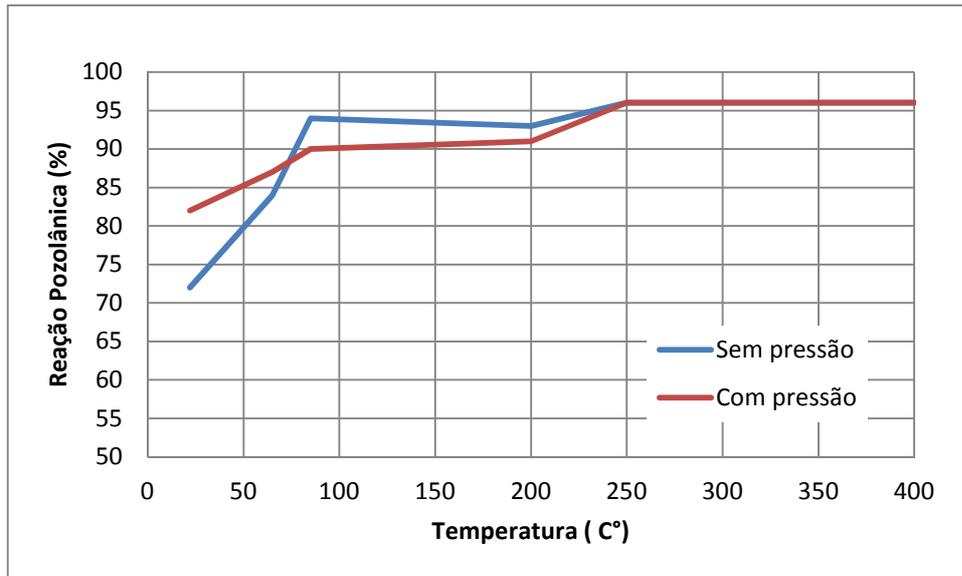
### **2.3 CURA TÉRMICA**

Os CAD apresentam em sua composição um elevado consumo de cimento, o que resulta em elevado desprendimento de calor de hidratação, o que pode gerar defeitos. Quanto maior for a quantidade de grãos de cimento hidratados e menores forem suas dimensões, maior será o calor de hidratação, e a liberação deste calor será mais rápida.

A elevada temperatura que ocorre durante a hidratação do cimento acelera as reações químicas, beneficiando assim as propriedades mecânicas nas idades iniciais. Em concretos a porosidade não é a única característica relacionada à resistência, a estrutura dos produtos hidratados formados também é importante.

A cura térmica em CPR faz com que os produtos hidratados sejam formados mais rapidamente e, segundo Richard e Cheyrezy (1995), também pode ativar reações pozolânicas no pó de quartzo em temperaturas extremamente elevadas. O aquecimento do CPR em condições hidrotérmicas faz com que haja a transformação dos hidratados amorfos em hidratados cristalinos (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Cheyrezy, Maret e Frouin (1995) estudaram as propriedades micro estruturais em função da temperatura do tratamento térmico e da aplicação da pressão confinante no material, com ensaios de termogravimetria e difração de raio X. Os resultados encontrados mostram que o tratamento térmico proporciona uma elevação na atividade pozolânica no composto, mas a pressão confinante não apresenta significativa relevância em temperaturas superiores a 50°C, como pode ser observada na Figura 10 (CHEYREZY; MARET; FROUIN, 1995).



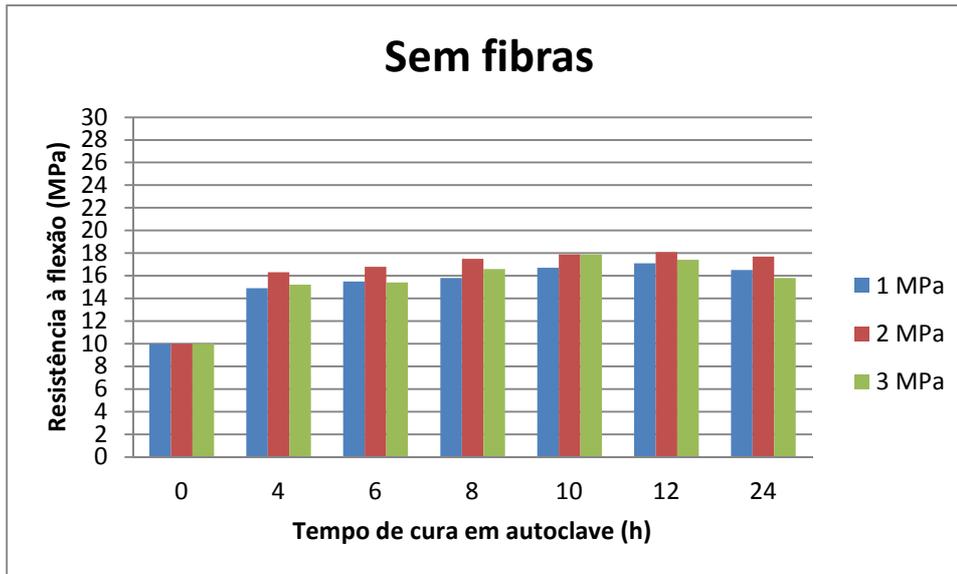
**Figura 10 - Atividade pozolânica em função do tratamento térmico em CPR.**

Fonte: CHEYREZY, MARET e FROUIN (1995).

Segundo Richard e Cheyrezy (1995), o tratamento térmico realizado após a desforma do CPR com uma temperatura de 90°C em pressão atmosférica acelera a reação pozolânica ao modificar a microestrutura dos cristais hidratados. A alta temperatura, de 200 a 400°C, leva a formação de hidratos do tipo *xonotlite*, acompanhada por grande desidratação da pasta endurecida.

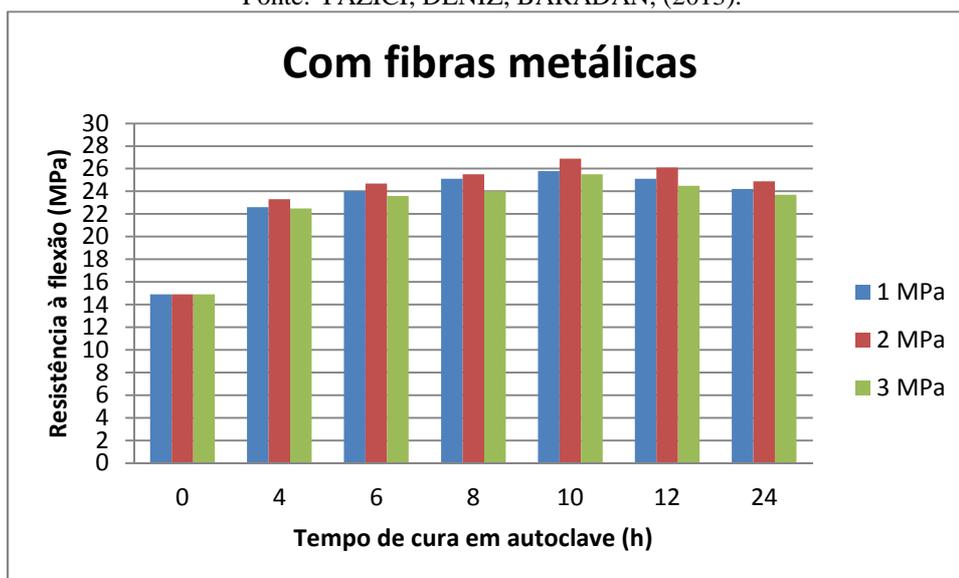
A cura do CPR em autoclave durante 24 horas pode corresponder a uma cura em temperatura normal de 28 dias, com a presença de elevados teores de sílica ativa na mistura. A alta temperatura faz com que as reações de hidratação sejam aceleradas e assim o hidróxido de cálcio gerado é consumido pela sílica, gerando assim novos cristais hidratados (YAZICI, 2007).

Yazici, Deniz e Baradan (2013) avaliaram a resistência à flexão de peças em CPR com e sem fibras metálicas, variando a pressão confinante e submetendo o material a diferentes tempos de cura térmica em autoclave. Os resultados estão apresentados nas figuras 11 e 12.



**Figura 11 – Resistências à flexão de CPR sem fibras em diferentes tempos de cura térmica e com diferentes pressões confinantes.**

Fonte: YAZICI; DENIZ; BARADAN, (2013).



**Figura 12 - Resistências à flexão de CPR com fibras metálicas em diferentes tempos de cura térmica e com diferentes pressões confinantes.**

Fonte: YAZICI; DENIZ; BARADAN, (2013).

Os autores concluem que mesmo sem as fibras metálicas a resistência à flexão do CPR é bastante elevada. O tempo de cura térmica em autoclave que se mostrou mais eficiente para o CPR foi de 10 a 12 horas (YAZICI; DENIZ; BARADAN, 2013). Observa-se ainda que, sem cura térmica, a pressão confinante não influenciou no resultado final.

## 2.4 PRESSÃO CONFINANTE

A aplicação de pressão no CPR ainda no estado fresco proporciona uma redução do ar aprisionado em poucos segundos e, se mantido por alguns minutos, tende a remover o

excesso de água presente na mistura. TOPÇU e KARAKURT (2005) aplicaram pressão ao CPR de 2,5 MPa no estado fresco, realizaram uma cura térmica de 7 dias em uma temperatura de 250°C a vapor e, em seguida, mantiveram por 7 dias a uma cura de 90°C, atingindo resultados de resistência à compressão de 253,2 MPa.

Este tratamento pode proporcionar impermeabilidade ao material, sabendo-se que a permeabilidade é um dos mais importantes parâmetros para quantificar a durabilidade dos materiais cimentícios (NOUMOWE; SIDDIQUE; DEBICKI, 2009).

Ipek et al. (2011) desenvolveram pesquisa similar, ao confeccionar uma fôrma para a aplicação de pressão confinante ao CPR ainda no estado fresco. O molde possui diâmetro interno de 50 mm e 140 mm de altura e ranhuras internas que possibilitam a saída de ar e o excesso de água. A Figura 13 apresenta a fôrma desenvolvida pelos pesquisadores (IPEK *et al.*, 2011).



**Figura 13 – Forma desenvolvida para aplicação de pressão confinante em concreto**

Fonte: [IPEK et al. (2011)]

A aplicação de pressão confinante no CPR ainda no estado fresco diminui consideravelmente os malefícios causados pelo alto consumo de cimento e a baixa quantidade de água utilizada na mistura, como a retração autógena; além de trazer benefícios na eliminação de ar aprisionado decorrente da elevada energia necessária na mistura dos constituintes (IPEK *et al.*, 2011).

Apesar das vantagens de se aplicar pressão confinante no CPR, a aplicação deste procedimento em elementos estruturais na indústria é complexa. Uma forma de se aplicar esta pressão confinante é desenvolver uma fôrma hermeticamente fechada e aplicar pressão com auxílio de protensão nas extremidades da forma.

## 2.5 ADIÇÕES MINERAIS

Chan e Chu (2004) estudaram o comportamento do CPR com fibras metálicas, em matrizes com teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de adição de sílica ativa. O grande efeito da sílica ativa na densidade da matriz vem do melhoramento no empacotamento das partículas, bem como devido à intensa reação pozolânica das sílicas.

A Figura 14 apresenta os resultados obtidos pelos pesquisadores. É possível perceber que os melhores resultados foram com teores de sílica ativa de 20 e 30% (CHAN; CHU, 2004).

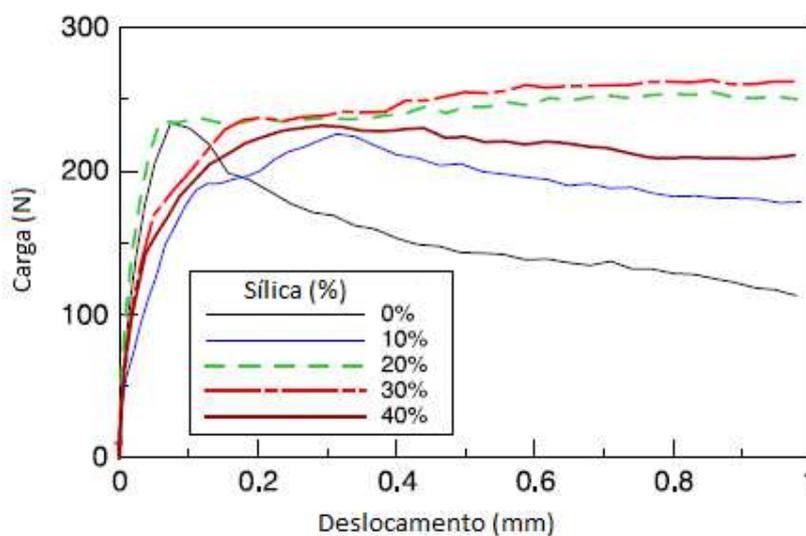


Figura 14 - Curvas tensão deformação para vários teores de sílica ativa em ensaio de arrancamento.

Fonte: [CHAN e CHU (2004)].

Nas últimas décadas pesquisadores buscaram desenvolver um CPR com menor consumo de cimento, utilizando materiais com propriedades pozolânicas em substituição parcial do cimento.

Yigiter et al. (2012) estudaram o CPR com substituição de até 60% do cimento por cinza volante em três diferentes tipos de cura: úmida normal, em autoclave e a vapor. Os pesquisadores conseguiram desenvolver um CPR com agregado de bauxita curado em autoclave com resistência à compressão superior a 200 MPa com um consumo de cimento de apenas  $376 \text{ kg/m}^3$  (YIĞITER *et al.*, 2012).

Yunsheng et al., (2008) também desenvolveram um CPR com baixo consumo de cimento e resistência à compressão de 200 MPa. A mistura apresentava cerca de 40% de cimento, 25% de escoria ultra fina, 25% de cinza volante e 10% de sílica ativa, com um teor de micro fibras metálicas de 4% (YUNSHENG *et al.*, 2008).

A substituição de parte do cimento por pozolana diminui consideravelmente o calor liberado na hidratação do cimento, diminuindo a ocorrência de micro fissuras internas, além de propiciar uma melhora da microestrutura a partir da formação de C-S-H adicional através da reação pozolânica, o que explica o aumento de resistência observado com a adição de cinza volante. Além disso, cabe ressaltar que o uso de cimento ARI e a cura térmica aceleram a liberação do hidróxido de cálcio para a reação com a sílica da adição, acelerando assim também o ganho de resistência a partir da reação pozolânica.

Estes e outros estudos demonstram que pode ser confeccionado CPR com resistência à compressão de 200 MPa com menor consumo de cimento, portanto mais econômicos, com menor consumo de energia e mais sustentáveis. Estes estudos mostram ainda o grande potencial do CPR em empresas de pré-fabricados, e em estruturas com baixa manutenibilidade como pavimentos e obras militares.

Yazici (2007) desenvolveu um estudo sobre a adição de cinza volante e tempo de cura em CPR. O autor concluiu que as amostras com utilização de cinza volante em substituição de até 40% do cimento e com tempo de cura de 8 horas apresenta o melhor desempenho (YAZICI, 2007). A Figura 15 apresenta os resultados obtidos pelo autor.

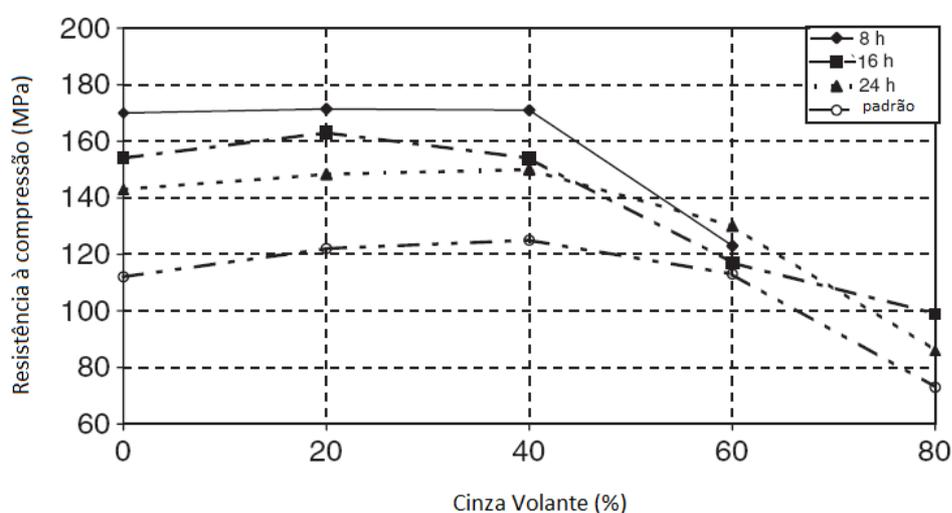


Figura 15 - Efeito do teor de cinza volante e tempo de cura na resistência à compressão.

Fonte: YAZICI, (2007).

A utilização da cinza volante em concretos de altíssimo desempenho proporciona um melhor controle no calor de hidratação, além de proporcionar ao material um acréscimo de resistência após a hidratação do cimento (NILI; SALEHI, 2010).

O módulo de elasticidade de concretos de ultra alto desempenho com incorporação de cinza volante e um baixo consumo de sílica ativa cresce com a idade, porém com grandes concentrações de sílica ativa o módulo de elasticidade diminui nas idades mais avançadas (NASSIF; NAJM; SUKSAWANG, 2005).

## **2.6 ADIÇÃO DE FIBRAS**

O CPR sem a adição de fibras ainda é um material com elevadas propriedades mecânicas, porém frágil. A introdução de microfibras na composição do CPR torna-o mais dúctil com maior capacidade de resistir a grandes deformações. O emprego de fibras aumenta a resistência mecânica do concreto, reduz a retração, aumenta a resistência ao impacto e sua resistência ao fogo (DAWOOD; RAMLI, 2011).

Concretos de alto desempenho com fibras são muito eficazes na diminuição da propagação das fissuras, ou seja, as fibras são solicitadas apenas após o surgimento das primeiras fissuras. Porém estas fibras não impedem que as microfissuras sejam geradas. Isso devido ao elevado espaçamento das fibras dentro da mistura e de sua distribuição desuniforme. Introduzindo dois tipos de fibras com dimensões distintas a formação destas fissuras pode ser prorrogada e até impedida (OSTERTAG; BLUNT, 2007).

Diversos estudos comprovam a vantagem de se utilizar fibras para diminuir as fissuras em concretos. A proporção de fibras em concretos de ultra alto desempenho geralmente utilizada é de até 5%, em massa, e esta proporção pode variar de acordo com o tipo de fibra utilizado (EL DEBS; NAAMAN, 1995).

A composição de diferentes dimensões de fibras faz com que as fissuras geradas pelas solicitações não sejam prolongadas, tanto as microfissuras quanto as macro fissuras. As fibras menores inibem a iniciação e crescimento das fissuras e as maiores proporcionam mecanismos que abrandam a propagação destas, dando assim ao CPR maior tenacidade e ductilidade (BANTHIA; GUPTA, 2004).

Concretos com adições de fibras de dois ou mais tipos com características distintas, obtendo uma combinação adequada, podem potencializar as propriedades do material, como a resistência à flexão (BANTHIA; GUPTA, 2004).

A dimensão das fibras utilizadas em CPR, geralmente de 12mm de comprimento e 0,8mm de espessura, é uma característica fundamental para alcançar o desempenho desejado. A capacidade de deformação do CPR é fundamentalmente dependente do comprimento das

fibras e a transferência das tensões pelas fissuras é dada por elas (HABEL; GAUVREAU, 2008).

A geometria das fibras contribui no ancoramento dentro da mistura, o que proporciona um avanço na resistência à flexão. A dispersão aleatória das fibras dentro da mistura proporciona ao composto a minimização da possível ligação de uma fissura com a outra.

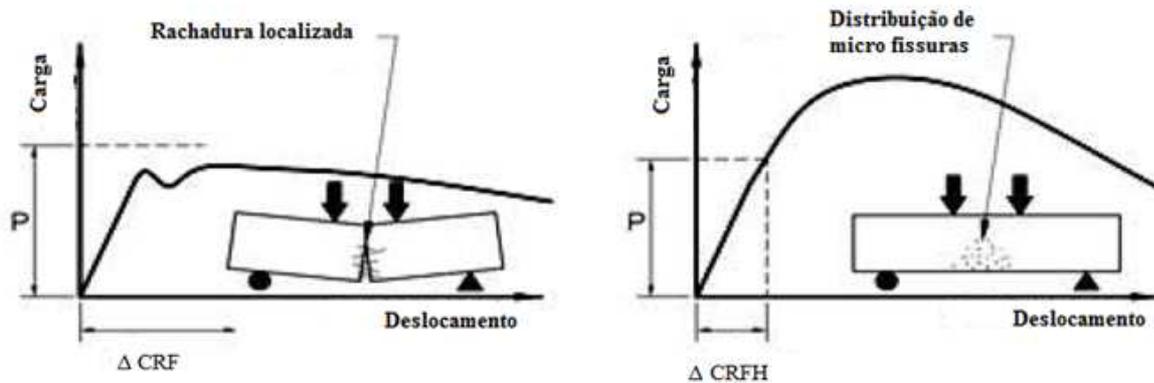
As fibras menores são mais solicitadas quando há o aparecimento das micro fissuras. As fibras podem melhorar a distribuição dos esforços e a tenacidade do concreto, substituindo parcialmente o aço, reduzindo o prolongamento das fissuras (DING *et al.*, 2011).

As fibras atuam principalmente após a fissuração e da energia absorvida pelo composto durante o processo de fratura é distribuído pelas fibras, que atuam como ponte de transferência de tensão entre as partes da matriz fissurada (VILLARES, 2001).

Johnston (1992) desenvolveu um estudo em concreto armado reforçado com fibras em diferentes teores e tipos, o qual permitiu a percepção da significativa diferença no desempenho associado a alterações nos parâmetros das matrizes de fibras. A abertura da primeira fissura depende principalmente das características da matriz e minimamente do parâmetro das fibras, tais como tamanho, quantidade e tipo (JOHNSTON, 1992).

A combinação de fibras de aço (0,5%) e de fibras de polipropileno (<0,2%) produzem uma máxima sinergia no composto. A hibridização destes materiais faz com que o concreto apresente uma maior resistência mecânica. A fibra de aço é menos flexível, o que contribui na melhora da resistência à tração. Já as fibras de polipropileno, que são mais flexíveis, contribuem nas tensões geradas logo após as primeiras aberturas (BANTHIA; GUPTA, 2004).

Ostertag e Blunt (2007) desenvolveram pesquisa em concretos com fibras híbridas, de aço e de PVA para serem utilizados em cabeceira de pontes. Eles demonstram as vantagens de se incorporar dois tipos distintos de fibras em uma matriz, como pode ser observado na Figura 16 (OSTERTAG; BLUNT, 2007).



**Figura 16 - Comportamento da propagação das fissuras em concretos reforçados com fibras (CRF) e concretos reforçados com fibras híbrida (CRFH).**

Fonte: OSTERTAG e BLUNT (2007).

A forma de ruptura dos dois materiais é praticamente a mesma, porém a deformação do concreto reforçado com fibras híbrida é maior. A capacidade de o material absorver energia, devido à deformação, é chamada de tenacidade. A tenacidade é a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar.

Em termos gerais, a tenacidade pode ser considerada como a capacidade do material de absorver a energia, convencionalmente caracterizada através da área sob a curva obtida experimentalmente da carga x deslocamento (BARR *et al.*, 1996).

Por definição, tenacidade é a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. Na medida em que o composto recebe um carregamento, a tendência é de se deformar, esta propriedade está ligada diretamente à tenacidade do composto, quanto maior a capacidade do material de absorver as deformações, maior será sua tenacidade.

Para a determinação da tenacidade de um material, o ensaio mais utilizado é o ensaio de tração na flexão em quatro pontos, prescrito pelas normas ASTM C1018, ACI 544 e JSCE-SF4. Os métodos de ensaio são semelhantes, porém a maneira de como a tenacidade é definida e calculada são diferentes (VILLARES, 2001).

A ASTM C1018 define o índice de tenacidade ( $I_i$ ) como sendo a relação entre a área ( $A_{\delta f}$ ) sob a curva por deslocamento vertical até um nível pré-determinado de deslocamento vertical, pela área ( $A_{\delta f}$ ) sob o trecho elástico da curva até o ponto que corresponde ao deslocamento vertical da primeira fissura. A Figura 17 resume os métodos ACI 544 e ASTM C 1018.

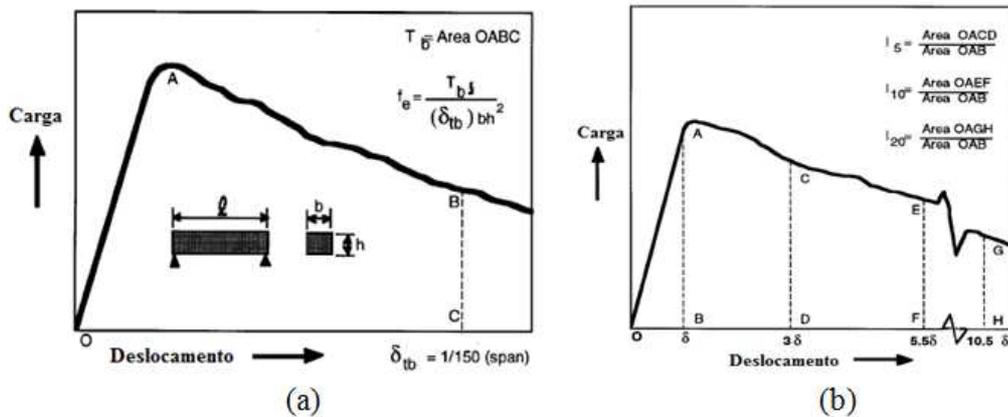


Figura 17 – Métodos de determinação da tenacidade. (a) ACI Committee 544, (b) ASTM C 1018.

Fonte: ACI COMMITTEE 544 (2007).

O espalhamento do CPR no estado fresco é prejudicado com a incorporação de fibras. A resistência à compressão do CPR aumenta com até 3% de fibras, porém, após este teor, a resistência diminui, à perda do abatimento ocasionado pela alta concentração de fibras, comprometendo o empacotamento da mistura (VANDERLEI, 2004b).

Não só a concentração de fibras tem influência no abatimento do CPR, o tipo de fibra utilizado também exerce grande efeito no abatimento. Zheng (1995) apresenta o abatimento do CPR com diferentes tipos de fibras, como mostra a Figura 18 (ZHENG, 1995).

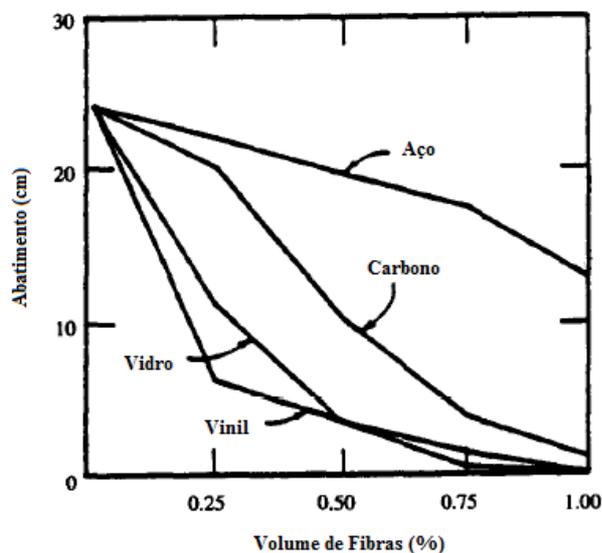


Figura 18 – Abatimento em relação ao teor de fibras de diferentes tipos de material.

Fonte: ZHENG (1995).

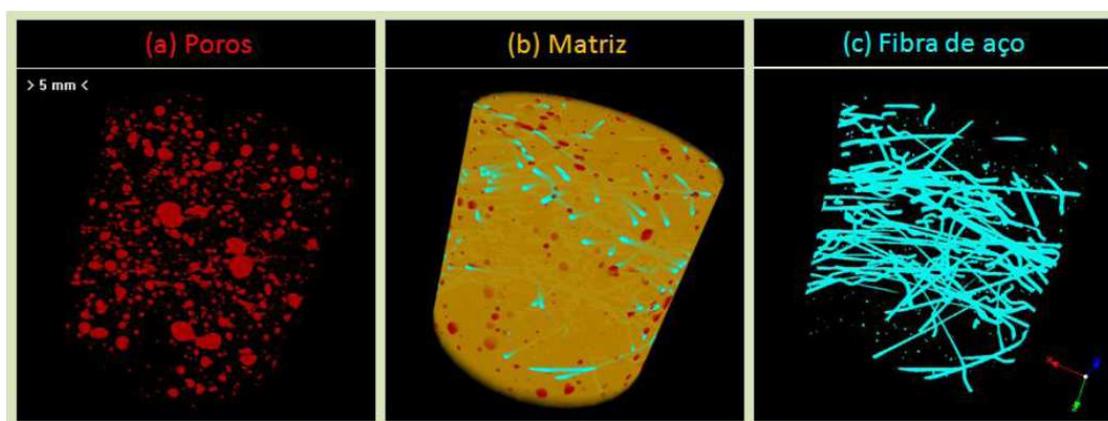
A quantificação do teor das fibras inseridas em um concreto e a análise da distribuição espacial destas dentro da mistura é de grande importância no controle de

qualidade do material. Uma ferramenta bastante valiosa para determinar estes parâmetros é a microtomografia 3D de alta resolução (MACHADO *et al.*, 2013).

Esta técnica de caracterização é uma poderosa ferramenta que possibilita a visualização e caracterização da estrutura interna de diferentes materiais ou objetos. A técnica é baseada no princípio físico da atenuação dos raios-x quando interagem com o corpo-de-prova analisado. Uma das vantagens da utilização deste método é a obtenção de imagens das diferentes estruturas internas do material sem que seja necessária uma preparação prévia da amostra, como polimento, metalização ou desbastes (MACHADO; LIMA; LOPES, 2013).

A microtomografia 3D é uma técnica não destrutiva para se obter informações sobre o posicionamento e a forma tridimensional de quaisquer objetos presentes no material, incluindo a estrutura interna do mesmo. A obtenção das imagens é dada através do rotacionamento do corpo-de-prova ou em torno do mesmo. O equipamento incide uma radiação que passa pela amostra antes de ser captada por um detector que gera imagens em valores de cinza. Regiões mais densas aparecem mais escuras e assim pode-se distinguir cada material presente. Com a forma da imagem gerada e o prévio conhecimento do material, pode-se distinguir o que está sendo reproduzido (APPOLONI *et al.*, 2007).

A utilização deste método para a avaliação da estrutura interna de concretos permite a verificação de vários parâmetros importantes e de grande relevância no desempenho do material, como a estrutura da matriz, a porosidade e, se existirem fibras na mistura, a distribuição espacial das mesmas. Machado *et al.* (2013) desenvolveram uma investigação em concretos com adição de fibras e utilizaram esta técnica para quantificar e avaliar a distribuição das fibras e dos poros dentro da matriz. A Figura 19 mostra uma das imagens geradas pela investigação realizada em uma amostra do concreto.



**Figura 19 – Imagens geradas em uma microtomografia 3D: (a) poros, (b) matriz, (c) fibras.**

Fonte: MACHADO *et. Al.* (2013).

Nesta técnica as imagens geradas sequencialmente são reunidas para criar uma representação em 3D da amostra, a qual pode ser processada digitalmente para obter parâmetros quantitativos, geométricos ou morfológicos, dependendo do foco da investigação (MACHADO; LIMA; LOPES, 2013).

A utilização de fibras em CPR é imprescindível para que o total desempenho que este material pode apresentar seja alcançado. Utilizar fibras híbridas potencializa este desempenho, porém os teores de fibras a serem introduzidos no material dependem das propriedades almejadas como trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à flexão, entre outros.

## **2.7 DURABILIDADE**

Durabilidade pode ser definida como uma medida temporal da vida útil, onde neste período todas as propriedades do material se mantem acima do especificado. A durabilidade do concreto armado no Brasil é especificada pelas normas ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 15575:2013 que é a capacidade da estrutura de concreto armado de resistir às influências ambientais previstas e definidas.

Os mecanismos de deterioração preponderantes relativos ao concreto, segundo Mehta e Monteiro (2008) são:

- lixiviação – Processo pelo qual há uma solubilização dos produtos hidratados do cimento, a água pura ou ácida entra em contato com a pasta de cimento e tende a hidrolisar ou dissolver seus compostos contendo cálcio;
- ataque por sulfatos – O monossulfato formado durante a hidratação de cimentos com elevado teor de aluminato tricálcio ( $C_3A$ ) reage com sulfatos em solução, convertendo-se em etringita (uma reação altamente expansiva) após o endurecimento do concreto. Em elevadas concentrações os sulfatos podem ainda reagir com os principais produtos de hidratação do cimento (C-S-H e CH), convertendo-os em gesso e levando à perda de resistência do concreto;
- reação álcali-agregado – Processo químico desencadeado pelos minerais presentes nos agregados que reagem com os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento;

- congelamento e degelo - Este fenômeno faz com que haja forças de tração internas devido à troca de estado físico da água proporcionando ao concreto uma reação deletéria;

Para o cálculo de uma estrutura de concreto armado, normalmente a resistência do concreto é o parâmetro de maior relevância. Porém para que esta estrutura tenha a vida útil conforme definida em projeto, deve-se garantir que a resistência do concreto seja mantida ao longo do tempo, ou seja, a resistência inicial do concreto não é tão importante quanto a sua durabilidade (AÏTCIN, 2000).

Concretos de alto desempenho que possuem uma baixa relação água/aglomerante apresentam menor permeabilidade em relação aos concretos convencionais, o que proporciona uma maior durabilidade ao CAD frente à penetração de agentes agressivos.

Atualmente existem diversos métodos para estimar a vida útil de estruturas de concreto. Estas podem ter uma estimativa de vida útil baseada nas experiências anteriores, com base em ensaios acelerados, em enfoque determinista ou em enfoque estocástico ou probabilista (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

A movimentação de gases, líquidos e íons pelo concreto é um dos importantes meios de deterioração do concreto. Esta movimentação gera interações com os compostos do concreto, fazendo com que estes sejam lixiviados e até degradando os compostos hidratados, fazendo com que o material perca sua função dentro da estrutura. Estas movimentações são geralmente chamadas de penetração, absorção e difusão (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

A absorção de água por capilaridade não está apenas relacionada com a estrutura dos poros, mas também com a umidade do concreto, sendo a penetração determinada através da facilidade de um líquido penetrar no material (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

Os produtos hidratados gerados na hidratação do cimento Portland são alcalinos e reagem com ambientes ácidos, o que irá mostrar sinais de desgastes com o passar do tempo (GORNINSKI; DAL MOLIN; KAZMIERCZAK, 2007).

A baixa impermeabilidade de um concreto é uma característica muito importante com respeito à durabilidade. A não penetração de agentes agressivos no interior do material faz com que o mesmo não seja degradado. Sendo assim, a permeabilidade pode ser um excelente parâmetro para qualificar a durabilidade da mistura (MEHTA, 2004).

Os ataques químicos, seja por sulfatos, ácidos ou cloretos, ocorrem no interior do concreto e, portanto, os agentes agressivos devem ser capazes de penetrar dentro da mistura, o que ocorre mais rapidamente em concretos com maior porosidade. Portanto, a permeabilidade do material possui grande importância na durabilidade das estruturas (NEVILLE; BROOKS, 2010).

As propriedades do concreto como resistência mecânica, durabilidade, retração e permeabilidade são diretamente influenciadas pelos números, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes na mistura. Os vazios capilares maiores do que 50 nm, designados como macroporos, prejudicam a resistência e a estanqueidade do material, enquanto os vazios menores do que 50nm, referidos como microporos, estão mais relacionados com a fluência (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

O desenvolvimento dos concretos de altíssimo desempenho, como o CPR, proporciona maior durabilidade à estrutura, e podem inclusive ser denominados como concretos ecológicos devido ao maior tempo de utilização dos constituintes sendo o seu descarte para a natureza retardado (AÏTCIN, 2003).

A deterioração do concreto frente a ataque químico está ligada diretamente a concentração da solução, que por si só não é um fator determinante da agressividade. Se forem utilizadas concentrações diferentes em uma mesma solução, respostas diferentes serão obtidas (DAL MOLIN; OLIVEIRA; KULAKOWSKI, 2009).

A durabilidade de um material é conhecida depois que a estrutura estiver exposta em um ambiente agressivo por anos. Aïtcin (2003) comenta que a durabilidade do CPR ainda não está comprovada por ser um material relativamente novo, porém com base na experiência em concretos convencionais pode-se assegurar que o CPR é mais durável.

## **2.8 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CPR**

Para a dosagem do CPR a seleção dos materiais constituintes tem uma grande importância no desempenho final do material. A produção do CPR deve ser feita preferencialmente com materiais convencionais utilizados na construção civil, encontrados facilmente em toda a região, exceto as fibras metálicas. Tipicamente são utilizados cimento, areia, pó de quartzo, sílica ativa, aditivos e fibras.

### 2.8.1 Cimento

A escolha do cimento não pode ser dissociada da escolha do aditivo superplastificante. Do ponto de vista da sua atuação, o superplastificante adsorve na superfície dos grãos de cimentos produzindo uma repulsão entre os grãos adjacentes em hidratação, e a potencialidade deste efeito está ligada diretamente à composição química do cimento (HARTMANN *et al.*, 2011).

Cimentos com baixo teor de  $C_3A$  apresentam melhores resultados de resistência mecânica devido à reologia, o que interfere diretamente no efeito do aditivo superplastificante. Cimentos com finura elevada são menos satisfatórios por conta da maior demanda de água (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

O aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) é um constituinte do cimento Portland, compondo a fase intersticial entre os cristais de alita e belita. Sua fórmula química é  $Ca_3Al_2O_6$ , podendo sua composição e estrutura mudar com a presença de alguns íons como  $Si^+$  e  $Na^+$ . Este composto reage rapidamente com a água e libera elevada quantidade de calor de hidratação (MAGALHÃES, 2007).

Aïtcin (1998) recomenda para CAD que o cimento tenha um baixo teor de  $C_3A$  possível, o que ocasiona um melhor controle da reologia. A quantidade de sulfatos solúveis também é de relevante importância, a fim de obter um melhor controle da formação da etringita.

A quantidade de  $C_3A$  presente no cimento apresenta outro fator importante no que se refere ao tratamento térmico. Estudo desenvolvido por Coppola *et al.* (1996) mostra que cimentos sem a presença de  $C_3A$  apresentam melhor resistência à compressão, quando submetidos a uma cura térmica de 90 a 160 °C. Cimentos com teores de 4% a 11% de  $C_3A$  apresentaram desempenhos menores (COPPOLA *et al.*, 1996).

### 2.8.2 Areia

Os principais parâmetros que norteiam a escolha da areia para a produção de CPR são a composição mineral, forma do grão e distribuição granulométrica (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

A composição mineral da areia mais utilizada é o quartzo, por se tratar de um material muito duro e ter uma forma bem arredondada, o que garante uma boa distribuição dentro da mistura e uma excelente interface pasta/agregado (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Alguns cuidados devem ser tomados quanto à seleção da areia. A composição granulométrica deve preferencialmente estar na faixa inferior de 600  $\mu\text{m}$  e não conter material orgânico aderido aos grãos (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

As areias comercialmente utilizadas são extraídas dos leitos dos rios, a quantidade de material orgânico depende muito do local onde foi extraída. Para a utilização desta areia em CPR é necessário que seja removido o material orgânico.

Existem areias que são comercializadas para realizar o processo de fundição de peças metálicas, estas são isentas de qualquer material orgânico e são excelentes para a produção do CPR.

### **2.8.3 Pó de quartzo**

Este constituinte ingressa como uma adição que preenche melhor os vazios da mistura, e tem uma grande importância durante o tratamento térmico. O pó de quartzo com tamanhos de grãos entre 5  $\mu\text{m}$  e 25  $\mu\text{m}$  apresenta máxima reatividade quando submetido a elevadas temperaturas de cura, potencializando o desempenho mecânico do composto (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

### **2.8.4 Sílica ativa**

A introdução da sílica ativa no composto tem por finalidade preencher os vazios entre as partículas, contribuir com a melhora das propriedades reológicas e reagir com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento para a formação de C-S-H secundário pela reação pozolânica (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

A utilização de sílica ativa em elevados teores faz com que a demanda de água aumente consideravelmente, a não ser que um alto teor de aditivo superplastificante seja usado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A sílica ativa produz tanto efeitos químicos como físicos na microestrutura do concreto. A reação com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento é mais rápida e pouco variável do que outras adições como pozolanas naturais ou escórias (DAL MOLIN, 2011).

Concretos que contenham percentuais de sílica ativa em sua composição ajudam significativamente na durabilidade do concreto, atuando tanto na inibição da penetração de íons cloreto, quanto na permeabilidade e no aumento da resistência mecânica (MEDEIROS *et al.*, 2013). Estudo desenvolvido por Medeiros *et al.* (2013) mostra que a adição de sílica ativa

em concretos de alta resistência é capaz de reduzir a carga de passagem no ensaio de migração de íons cloretos em 85% a 88%, o que mostra a grande eficiência do material na durabilidade de concretos expostos em zonas marítimas ou de elevada agressão.

### **2.8.5 Aditivos superplastificantes**

Aditivos superplastificantes são compostos que permitem a redução de água da mistura, são feitos a base de policarboxilatos poliéteres, e são mais utilizados em concretos de alto desempenho (HARTMANN *et al.*, 2011). Estes aditivos conseguem reduzir de três a quatro vezes a água de amassamento em um determinado concreto, se comparando aos aditivos redutores de água normais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A utilização de aditivo superplastificante é de fundamental importância na produção de CPR para garantir a plasticidade da mistura, isso devido à baixa relação água/aglomerante.

A função dos aditivos superplastificantes é dispersar as partículas de cimento que estão em hidratação, liberando a água presa entre os grãos, diminuindo assim a força de atração de *van der Waals* entre as partículas e aumentando a fluidez da mistura (HARTMANN *et al.*, 2011).

A quantidade relativa de superplastificantes utilizada em concretos convencionais é da ordem de 1% em relação à massa do cimento, quantidade esta que pode ser incorporada nas misturas sem causar exsudação excessiva e retardamento da pega (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Já a quantidade de aditivo superplastificante utilizado em CPR é em torno de 3% a 5% (YIĞİTER *et al.*, 2012).

Nem todos os tipos e marcas de aditivos reagem da mesma forma com o mesmo tipo de cimento. Por este motivo, a escolha do aditivo está relacionada diretamente com o cimento escolhido. Nem todos os superplastificantes possuem a mesma eficiência na dispersão de partículas de cimento dentro da mistura (AİTCİN, 1998).

### **2.8.6 Fibras**

A utilização de fibras em CPR é de fundamental importância, sem ela o material se mantém frágil. A introdução de fibras na mistura proporciona ao CPR elevada ductilidade.

As fibras utilizadas em CPR tipicamente apresentam dimensões entre 0,8mm a 1,2mm de espessura e 10mm a 12mm de comprimento. As fibras podem ser de diversos tipos, como aço, polipropileno, polivinil acrílica, fibras de vidro, entre outras.

A escolha da fibra é uma função da característica do material. Como o comportamento da matriz do CPR é mais linear e elástico, fibras de aço devem ser empregadas para aumentar a ductilidade da mistura (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Com a incorporação das fibras, pode-se perder parte da trabalhabilidade, possivelmente comprometendo a moldagem do composto e prejudicando a resistência à compressão. O formato, concentração, características dimensionais e a distribuição destas são as principais causas destes fenômenos. A otimização das propriedades mecânicas e da permeabilidade podem ser potencializadas com a combinação de diferentes tipos e tamanhos de fibras (DAWOOD; RAMLI, 2011).

A hibridização de fibras consiste em obter uma proporção ideal de cada tipo de fibra, formando um material com boa trabalhabilidade, elevada resistência e alta durabilidade. A combinação de diferentes tipos de fibras com diferentes tamanhos proporcionam uma diminuição da formação e propagação das fissuras (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2003).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tendo em vista os objetivos propostos, foi elaborado e desenvolvido o programa experimental descrito a seguir, tendo-se como premissa o emprego racionalizado dos recursos e manutenção do cronograma de execução. Neste capítulo, inicialmente é apresentado o planejamento dos ensaios, seguido da caracterização dos materiais utilizados, descrição do procedimento de proporcionamento dos materiais, e detalhamento dos métodos utilizados para a execução do programa experimental.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

A Figura 20 apresenta o fluxograma do programa experimental, com as variáveis analisadas e os ensaios executados em cada etapa.

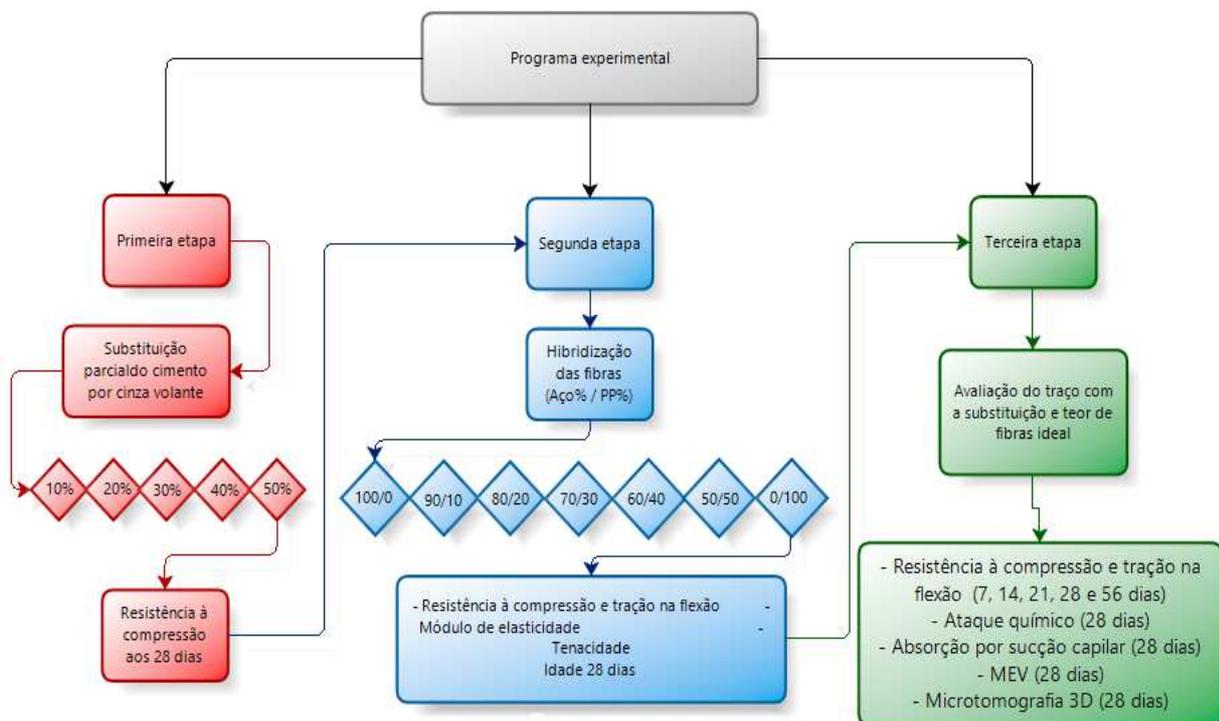


Figura 20 – Fluxograma do programa experimental.

Como ilustra a figura, para que o objetivo fosse alcançado o programa experimental foi dividido em três etapas distintas:

#### 1ª Etapa

Avaliação da substituição parcial do cimento por cinza volante em teores de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, avaliando a sua resistência à compressão. A Tabela 1 apresenta o programa experimental desta etapa.

**Tabela 1 – Programa experimental da primeira etapa.**

Mistura	Teor de substituição de cinza volante por cimento	Corpos de prova	Ensaio	Idade
MC 0	0%	4	Resistência à compressão	28 dias
MC 1	10 %	4		
MC 2	20 %	4		
MC 3	30 %	4		
MC 4	40 %	4		
MC 5	50%	4		

## **2ª Etapa**

Avaliação da hibridização das fibras de aço e polipropileno nas proporções apresentadas, com o traço que apresentou melhor desempenho na etapa 1. As proporções de fibras foram definidas pela massa específica de cada material e a incorporação de fibra foi realizada em massa.

- Aço 100% - Polipropileno 0%
- Aço 90% - Polipropileno 10%
- Aço 80% - Polipropileno 20%
- Aço 70% - Polipropileno 30%
- Aço 60% - Polipropileno 40%
- Aço 50% - Polipropileno 50%
- Aço 0% - Polipropileno 100%

Para estes traços foram avaliados os valores de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade na tração e tenacidade, a partir dos diagramas de tensão vs deformação e carga vs deslocamento. A Tabela 2 apresenta o programa experimental desta etapa.

**Tabela 2 – Programa experimental da segunda etapa.**

Mistura	Teores de fibras (%)		Corpos de prova		Ensaio realizado (idade 28 dias)		
	Aço	PP	Cilíndrico	Prismático			
M1	100	0	4	4	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Tensão x deformação
M2	90	10	4	4			
M3	80	20	4	4			
M4	70	30	4	4			
M5	60	40	4	4			
M6	50	50	4	4			
M7	0	100	4	4			

### 3ª Etapa

Após a definição do teor ideal de substituição do cimento por cinza volante e a melhor proporção das fibras, na terceira etapa foram avaliadas as propriedades mecânicas e durabilidade do CPR. Para o ensaio de ataque químico foram utilizados os ácidos nítrico, sulfúrico e clorídrico. A Tabela 3 apresenta o programa experimental desta etapa.

**Tabela 3 – Programa experimental da terceira etapa.**

Estudo	Nº CP's	Idade	Ensaio
Resistência à compressão	4	7	Resistência à compressão axial
	4	14	
	4	21	
	4	28	
	4	56	
Resistência à tração na flexão	4	7	Resistência à tração na flexão em 4 pontos
	4	14	
	4	21	
	4	28	
	4	56	
Deterioração ao ataque químico	4	28	Ataque químico
Absorção	6	28	Absorção por sucção capilar

#### 3.1.1 Variáveis de resposta

O programa experimental tem como finalidade alcançar os objetivos da pesquisa, que é desenvolver um CPR com menor impacto ambiental, utilizando cinza volante em substituição parcial do cimento, e utilizar uma mistura híbrida de dois tipos de fibras (metálicas e de polipropileno) para avaliar as propriedades mecânicas e durabilidade do material, resultando nas variáveis de respostas conforme segue:

#### Primeira etapa

- Resistência à compressão aos 28 dias da mistura sem fibras e com substituição parcial do cimento por cinza volante.

#### Segunda etapa

- Resistência à tração na flexão e leitura da deformação na borda mais tracionada aos 28 dias das misturas híbridas de fibras.

#### Terceira etapa

- Resistência à compressão aos 7, 14, 28 e 91 dias;
- Resistência à tração na flexão aos 7, 14, 28 e 91 dias;
- Absorção de água por sucção capilar aos 28 dias;
- Deterioração ao ataque químico após 28 dias durante 5 ciclos
- Análise microscópica do CPR.

### **3.1.2 Variáveis de controle**

A partir das variáveis respostas que se pretende mensurar, foram parametrizadas as variáveis de controle. Desta forma os fatores controlados e os níveis estudados nesta pesquisa são:

- A desforma dos corpos de prova foi realizada após 24 horas da moldagem. Em seguida as amostras foram submetidas a uma cura térmica em temperatura de 100°C durante 24 horas e após, cura submersa a temperatura de 21°C ± 2°C até a idade do ensaio.
- Aplicação de pressão confinante durante 24 horas de 5 MPa ainda no estado fresco;
- Teor total de fibra de 3% em massa;
- Teores de substituição do cimento por cinza volante em massa de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%;
- Teores de hibridização das fibras em massa de:
  - Aço 100% - Polipropileno 0%
  - Aço 90% - Polipropileno 10%

- Aço 80% - Polipropileno 20%
- Aço 70% - Polipropileno 30%
- Aço 60% - Polipropileno 40%
- Aço 50% - Polipropileno 50%
- Aço 0% - Polipropileno 100%

## 3.2 MATERIAIS

Os materiais a serem utilizados na pesquisa são encontrados na região da grande Porto Alegre, exceto as microfibras metálicas, que ainda não são produzidas no Brasil, e por isso foram importadas para esta pesquisa. Neste item são apresentados os materiais utilizados para a produção do CPR para a realização deste estudo.

### 3.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CP-V-ARI. A escolha deste cimento deu-se pelo fato de ser um cimento com maior teor de clínquer e facilmente encontrado na região. Devido à sua elevada resistência inicial, proporcionando uma rápida geração de hidróxido de cálcio, antecipa a reação da sílica ativa e cinza volante presentes na mistura. As propriedades do cimento estão descritas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Propriedades físicas e químicas do cimento.**

Composição química	Teores (%)
Óxido de cálcio (CaO)	63,19
Dióxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	19,53
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,91
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,07
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,89
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	2,45
Óxido de magnésio (MgO)	1,94
Óxido de cálcio livre (CaOl)	1,27
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,61
Resíduo Insolúvel (RI)	0,54
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,04
Perda ao fogo (PF)	3,76
C <sub>3</sub> S	78,37
C <sub>2</sub> S	-
C <sub>3</sub> A	5,47
C <sub>4</sub> AF	8,79
Finura – Resíduo peneira 75 µm	0,5

Massa Específica (Gm/cm <sup>3</sup> )	3,09	
Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	4190	
Início de pega (h:min)	3:05	
Fim de pega (h:min)	4:25	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	14,6
	3 dias	34,6
	7 dias	40,7
	28 dias	46,6

Fonte: Cimento nacional (2013)

Para a determinação do traço foi necessária a obtenção da distribuição granulométrica das partículas do cimento, e para isso foi realizado uma análise de granulometria a laser no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMat - da UNISINOS. Para a dispersão do cimento foi necessário realizar o ensaio em via úmida, com o xilol como líquido utilizado. A Figura 21 apresenta a distribuição granulométrica do cimento.

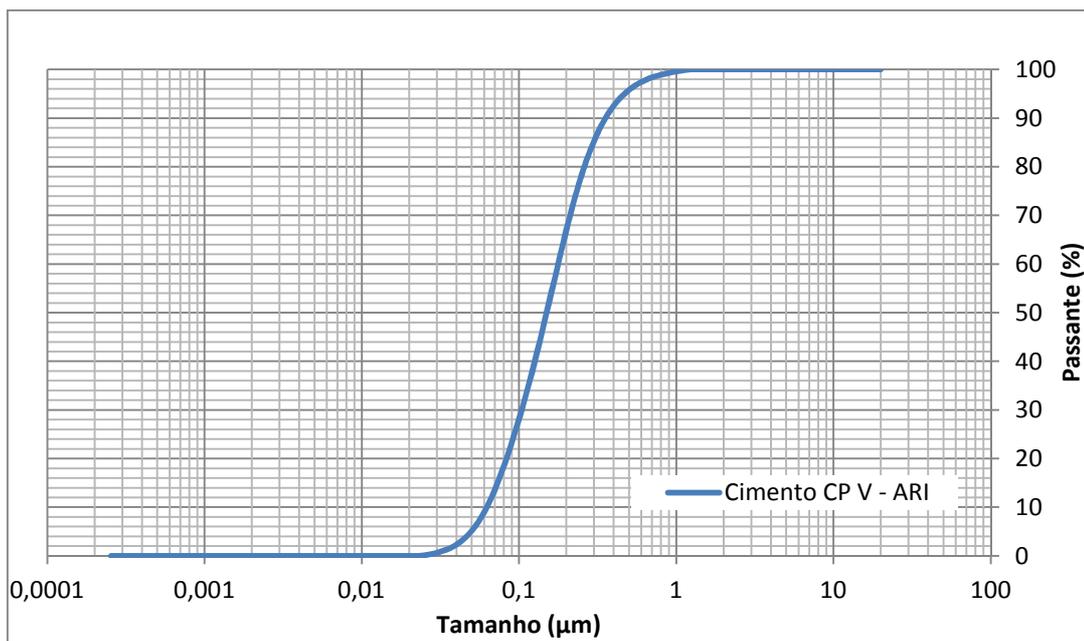


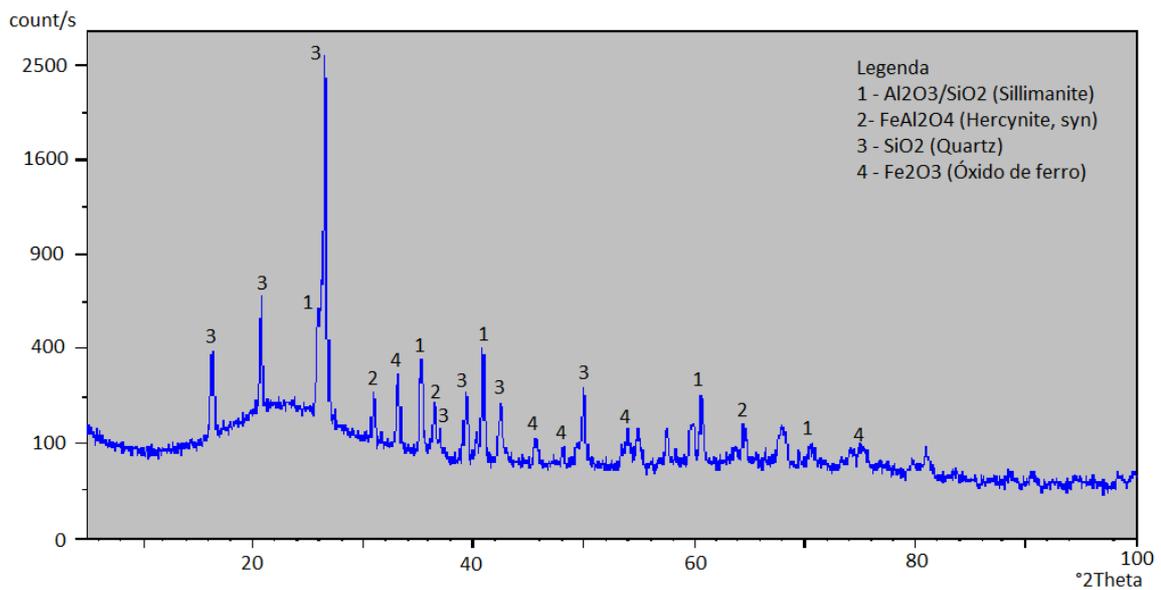
Figura 21 – Distribuição granulométrica do cimento.

### 3.2.2 Cinza volante

A cinza volante utilizada nesta pesquisa tem origem na unidade geradora de vapor de uma empresa fabricante de papel. A composição química da cinza, obtida em ensaio de fluorescência de raios-X, está apresentada na Tabela 5, enquanto que a Figura 22 apresenta o difratograma de raios-X.

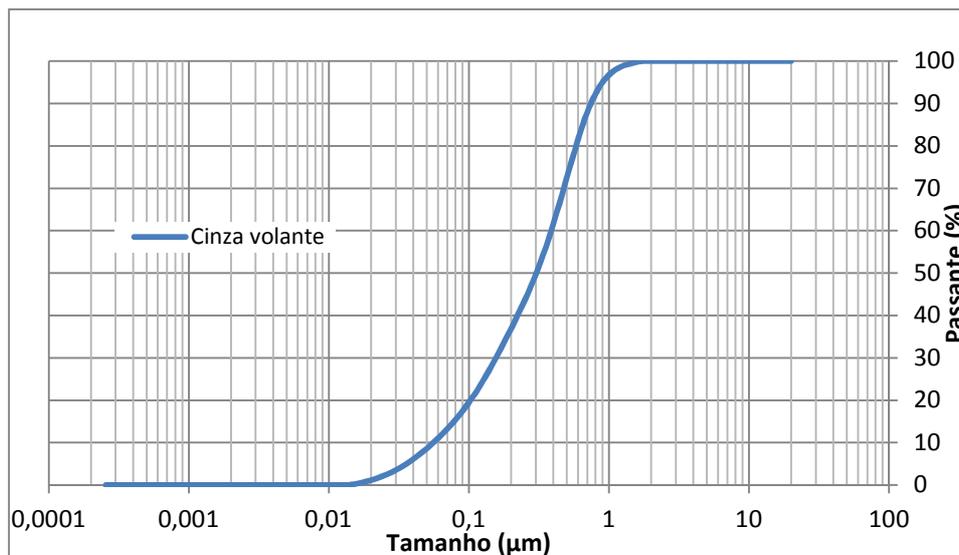
**Tabela 5 – Características químicas da cinza volante.**

Composição química	Teores (%)
Silício (Si)	69,3
Alumínio (Al)	26,1
Ferro (Fe)	1,8
Potássio (K)	1,4
Cálcio (Ca)	0,9
Sódio (Na)	0,3
Magnésio (Mg)	0,05

**Figura 22 – Difratograma de raio X da cinza volante**

O resultado da análise apresentada no difratograma mostra que a cinza volante apresenta fases amorfas, e alguns picos cristalinos.

Concreteiras da região metropolitana de Porto Alegre e da serra do Rio Grande do Sul utilizam esta cinza em alguns de seus traços. O material é de fácil aquisição, porém a retirada da cinza da fábrica que a produz é feita por uma empresa terceirizada. A Figura 23 apresenta a distribuição granulométrica da cinza volante realizada com granulometria a laser no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMat - da UNISINOS com a técnica de difração a laser em via seca.



**Figura 23 – Distribuição granulométrica da cinza volante**

### 3.2.3 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa é proveniente da produção de silício metálico, do tipo não densificada. A sílica apresenta uma coloração cinza clara.

As características químicas são apresentadas na Tabela 6 e as características físicas na Tabela 7.

**Tabela 6 – Características químicas da sílica ativa.**

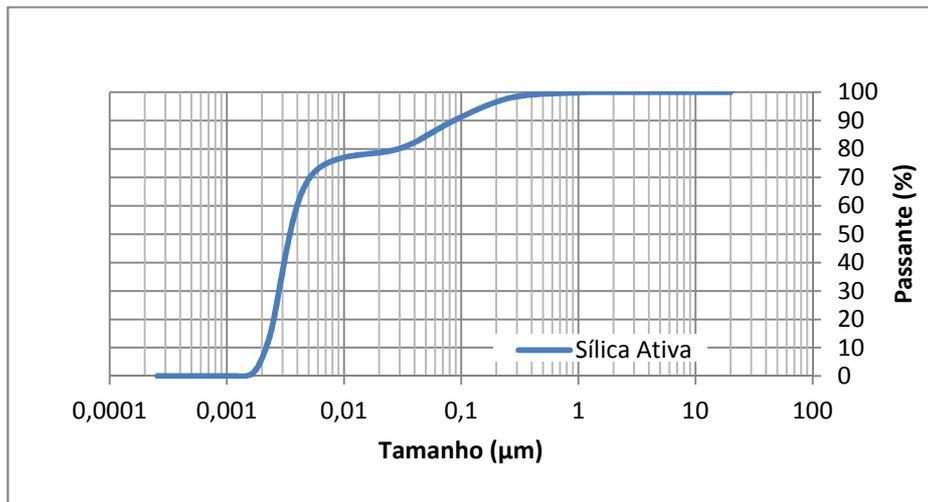
Composição química	Teores (%)
Silício (Si)	88,43
Sódio (Na)	2,786
Potássio (K)	0,658
Alumínio (Al)	0,316
Cálcio (Ca)	0,286
Magnésio (Mg)	0,122
Titânio (Ti)	0,091
Ferro (Fe)	0,015

**Tabela 7 – Características físicas da sílica ativa.**

Características físicas	Teores (%)
Umidade (%)	2
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,35
Densidade aparente	0,375
pH	10
Área específica B.E.T (m <sup>2</sup> /kg)	20.000
Estado Físico	Sólido
Diâmetro médio (μm)	0,004
Perda ao fogo (%)	6

Fonte: Dow Corning (2012)

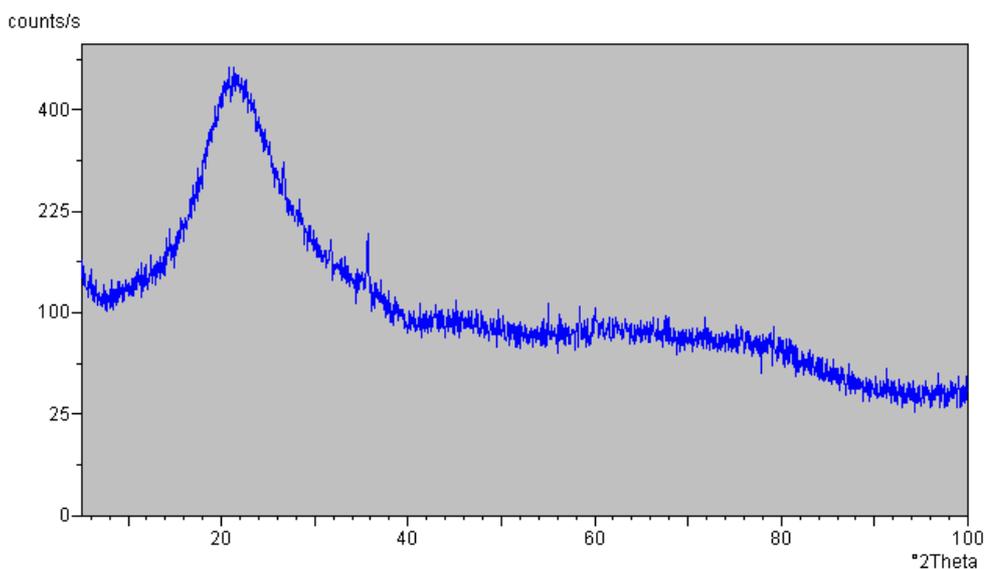
A distribuição granulométrica da sílica ativa foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMat - da UNISINOS, utilizando a técnica de difração a laser em via úmida, utilizando água como meio líquido, sendo o resultado apresentado na Figura 24.



**Figura 24 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.**

A caracterização cristalográfica da sílica ativa foi realizada pelo método de difração de raios-x no Laboratório de difração de raios-x do centro de estudos em petrologia e geoquímica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

O equipamento utilizado neste ensaio emprega radiação  $\text{CuK}\alpha$ , corrente de 30 mA e voltagem de 40 kV. O difratograma de raio-x da sílica ativa está apresentado na Figura 25.



**Figura 25 – Difratograma de raio-X da sílica ativa.**

Com o auxílio da Figura 25, é possível notar que a sílica ativa utilizada não apresenta pico cristalino, sendo completamente amorfa.

### 3.2.4 Pó de quartzo

O pó de quartzo utilizado para o estudo é comercializado como pó de quartzo malha #200, composto basicamente por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Foi realizada a análise granulométrica do pó de quartzo utilizando o método de difração a laser no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMat - da UNISINOS, o resultado está apresentado na Figura 26.

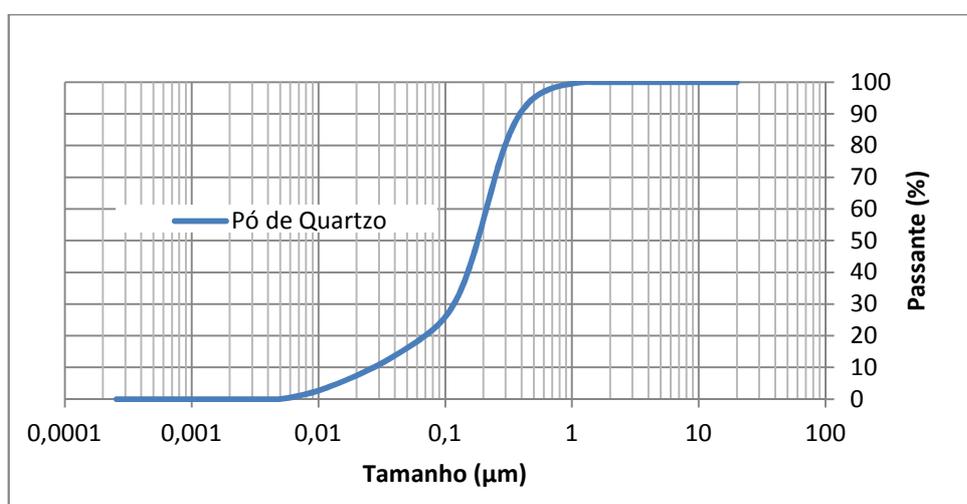


Figura 26 – Distribuição granulométrica do pó de quartzo.

As propriedades físicas e químicas do pó de quartzo estão apresentadas na Tabela 8 e na Tabela 9, cujos dados foram fornecidos pelo distribuidor do produto no Rio Grande do Sul.

Tabela 8 – Características físicas do pó de quartzo.

Características físicas	Teores (%)
Umidade (%)	1
Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	2,8
Densidade aparente	1,35
pH	11
Estado Físico	Sólido
Perda ao fogo (%)	0,6

Fonte: ARAUSUL (2012)

**Tabela 9 – Características químicas do pó de quartzo.**

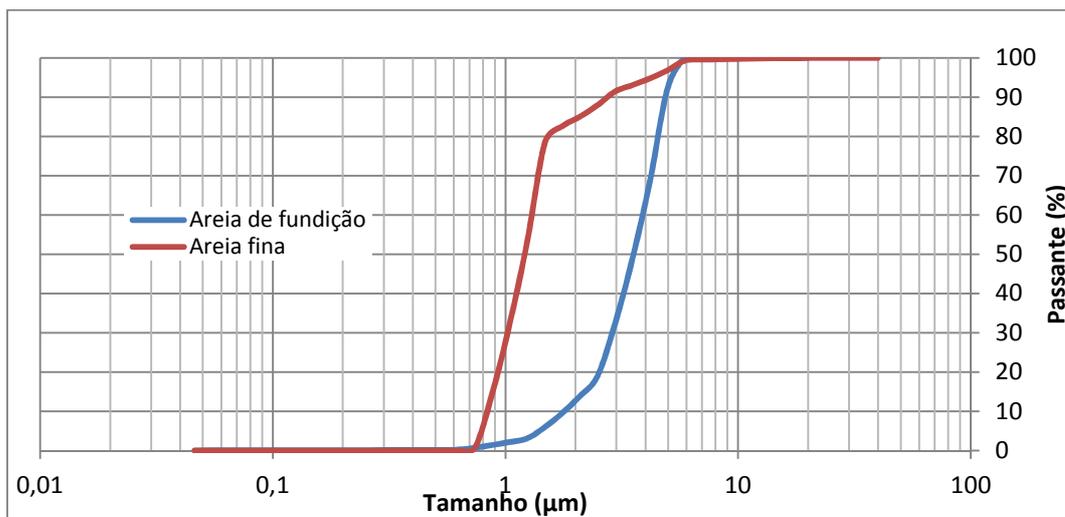
Composição química	Teores (%)
Dióxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	99
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,25
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,05
Dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,03

Fonte: ARAUSUL (2012)

### 3.2.5 Areia

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois tipos de areia, uma fina, normalmente utilizada no mercado para acabamento final em rebocos; e outra utilizada para fundição de peças metálicas, ambas encontradas na região da grande Porto Alegre.

Foi realizado o ensaio de granulometria nas duas areias, utilizando o método prescrito pela norma NBR NM 248:2001, no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. O resultado é mostrado na Figura 27 e os dados que originaram este gráfico estão expostos na Tabela 10.

**Figura 27 – Distribuição granulométrica das areias.****Tabela 10 – Análise granulométrica das areias.**

Peneira # mm	Areia fina		Areia de fundição	
	Retida (%)	Acumulada (%)	Retida (%)	Acumulada (%)
1,2	0	0	5,7	5,7
0,6	4,3	4,3	74,9	80,6
0,3	56,2	60,5	16	96,6
0,15	38,6	99,1	3,4	100
0,075	0,9	100	0	100
Módulo de finura	1,64		2,83	
Diâmetro máximo	0,6 mm		1,2	

### 3.2.6 Aditivos

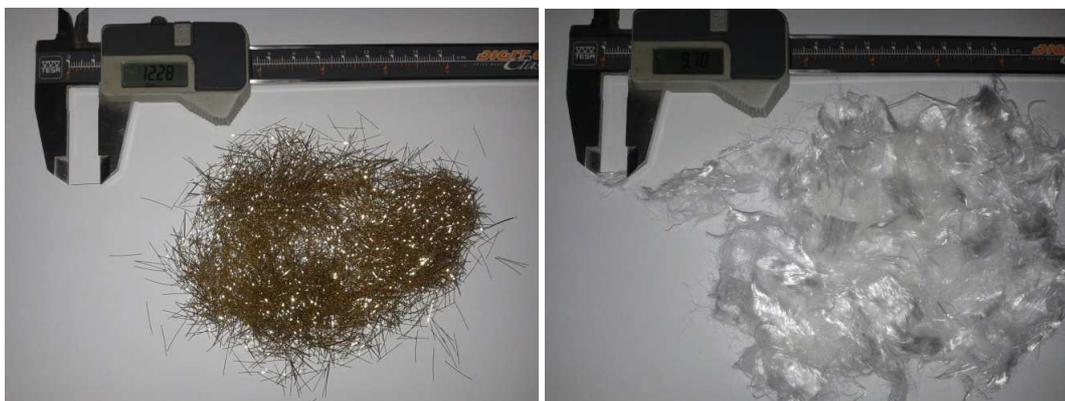
Para a realização do estudo foram utilizados dois tipos de aditivos, um modificador de viscosidade e um superplastificante, a base de policarboxilatos. O aditivo superplastificante é constituído por polímeros de éter carboxílico modificado, apresenta um teor de sólidos de 52%, uma coloração amarelo turvo com odor característico, peso específico de  $1,1 \text{ g/cm}^3$ , pH de 5,5 e é totalmente solúvel em água.

Segundo recomendação do fabricante, o aditivo modificador de viscosidade é utilizado associado ao aditivo superplastificante, sendo que a introdução do produto deve ser realizada ao final da mistura do concreto. O aditivo possui uma coloração transparente, um aspecto viscoso, pH de  $6 \pm 1$  e massa específica de  $1000 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.2.7 Fibras

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois tipos de fibras, uma fibra de aço e uma de polipropileno, conforme se observa na Figura 28.

As fibras de aço são importadas e fabricadas na China. As fibras são comercialmente denominadas como dramix® OL 13/20, possuem 13mm de comprimento, 0,21mm de diâmetro com formato reto e uma resistência à tração de  $2750 \text{ N/mm}^2$ , de acordo com o fabricante.



(a) Fibras de aço

(b) Fibras de polipropileno

Figura 28 – Fibras utilizadas na pesquisa a) Fibras de aço b) fibras de polipropileno.

As fibras de polipropileno utilizadas no trabalho são filamentos de polipropileno extremamente finos obtidos através de extrusão, após receberem tratamento superficial que facilita a dispersão no concreto. As fibras apresentam comprimento de 6mm e diâmetro de  $12 \mu\text{m}$ , apresentam uma frequência de 1,62 milhões de fibras por quilograma e uma área

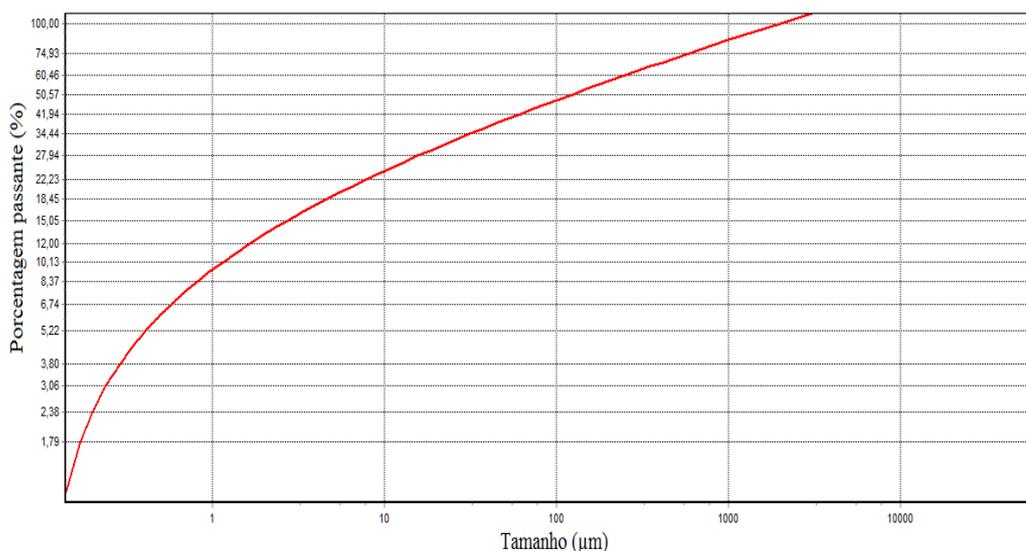
superficial específica de 366 m<sup>2</sup>/kg. Apresentam ponto de fusão a 160°C e ponto de ignição de 365°C, de acordo com o fabricante.

### 3.3 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

Para a obtenção da proporção adequada dos constituintes foi utilizado o método teórico de empacotamento de Andreassen modificado. Com a distribuição granulométrica de cada material, foi determinado o traço com auxílio de um programa computacional EMMA Miz Analyzer que utiliza o método de empacotamento referido.

Para a determinação da melhor proporção dos materiais com exceção da cinza volante pelo método, é necessário conhecer dentro de uma faixa de tamanho a quantidade de cada granulometria, e o coeficiente de distribuição “q”, que neste estudo adotou-se um coeficiente de 0,20 para que a mistura obtivesse uma melhor trabalhabilidade.

O software permite a análise da distribuição granulométrica de uma composição de materiais, utilizando dois diferentes métodos de empacotamento de partículas, o de Andreassen e Andreassen modificado. O software é alimentado com duas características fundamentais, a distribuição granulométrica e a densidade de cada material, e a partir desta informação gera uma curva com o empacotamento máximo que pode haver com esta faixa granulométrica. A Figura 29 apresenta o gráfico gerado com a faixa de dimensões das partículas existentes de todos os materiais.



**Figura 29 – Empacotamento máximo possível com os materiais utilizados.**

A proporção de cada material foi definida a partir da curva que mais se aproximou do empacotamento máximo gerado pelo programa. A proporção com o menor

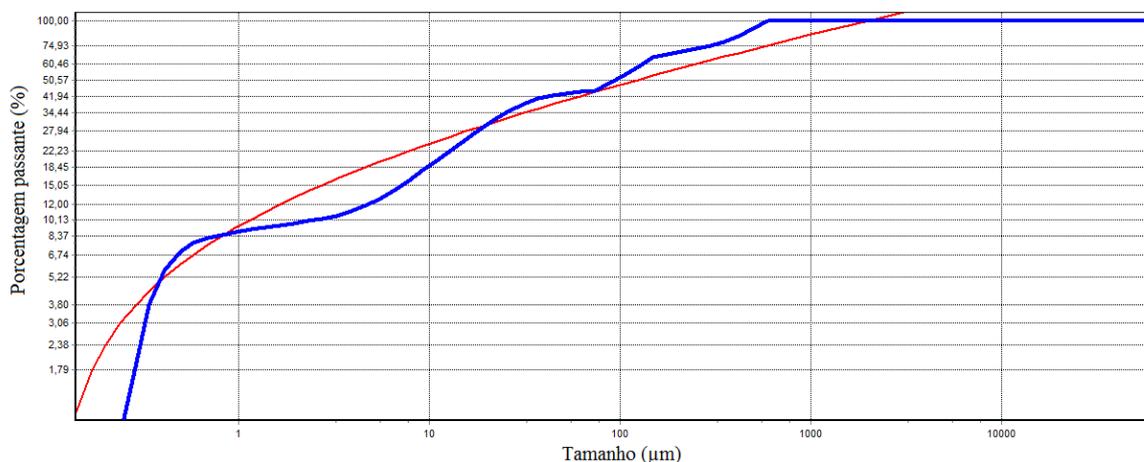
índice de vazios foi a apresentada na Tabela 11, e conseqüentemente este foi o traço utilizado nesta pesquisa.

**Tabela 11 – Traço utilizado na pesquisa.**

Materiais	Teores em massa	Kg/m <sup>3</sup>
Cimento	1	696,4
Areia fina	1,38	959,9
Areia de fundição	1,62	1129,3
Pó de quartzo	0,81	564,6
Sílica ativa	0,59	414,4
Água/aglomerante	0,20	222,1
Aditivo superplastificante <sup>a</sup>	0,03	33,3
Aditivo modificador de viscosidade <sup>a</sup>	0,01	11,1

<sup>a</sup> Teor em relação à massa de aglomerante

A Figura 30 apresenta as curvas geradas pelo programa com as proporções utilizadas no trabalho. A curva na cor vermelha expõe o empacotamento máximo possível de se obter com os diâmetros existentes nos constituintes e a curva em azul é a do empacotamento gerado pela proporção de cada material informado pelo operador do programa.



**Figura 30- Curva da distribuição granulométrica do traço utilizado na pesquisa (curva em azul).**

A partir do traço definido foram iniciadas as três etapas do programa experimental; para cada etapa o traço base foi adaptado para incluir as variáveis a serem verificadas, conforme descrito no item 3.1.

### 3.4 MÉTODOS

#### 3.4.1 Procedimento de mistura dos materiais

Para a realização desta pesquisa foram realizados vários experimentos de mistura dos materiais. Devido à presença significativa de materiais muito finos, a mistura dos

constituintes é de fundamental importância, para não haver perdas dos finos e para obter-se uma boa homogeneidade no produto final.

A mistura dos constituintes foi realizada utilizando uma argamassadeira de eixo vertical com a seguinte sequência:

- A mescla inicia com toda a sílica ativa, aditivo superplastificante e 80% da água, com baixa velocidade de rotação durante 8 minutos;
- Após se acrescenta a areia, aumentado à velocidade do equipamento por aproximadamente 1 minuto;
- Neste momento, se incorpora o cimento aumentando ainda mais a velocidade do equipamento por aproximadamente 1 minuto;
- Por fim, coloca-se o pó de quartzo, a cinza volante, o restante da água e o aditivo modificador de viscosidade;
- Com estes procedimentos a mistura já apresenta uma boa consistência, quando é possível inserir as fibras, iniciando com as de aço e após as de polipropileno, sempre em pequenas proporções para não formação de grumos. O período desta etapa não deve ultrapassar 2 minutos;
- Após isso mistura-se por mais 3 minutos na velocidade rápida;
- Com o CPR pronto, realiza-se o ensaio de consistência, moldagem dos corpos-de-prova com aplicação da carga confinante no material ainda no estado fresco. Com isso, procede-se à cura das amostras, com a acomodação na sala climatizada do LMC por um período de 24 horas, para então serem desmoldados e permanecerem em cura até a data dos ensaios.

### **3.4.2 Trabalhabilidade**

Para a determinação da trabalhabilidade do CPR foi utilizado o método da mesa de consistência, para medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a impactos sucessivos após a retirada do cone, conforme prescrição da NBR 13276:2005 Figura 31.



**Figura 31 – Ensaio de abatimento nas misturas de CPR.**

O método utilizado para a determinação da trabalhabilidade foi utilizado apenas para fins de comparação entre as diversas misturas desenvolvidas. Para que fosse possível a verificação da influência das diversas variáveis utilizadas na primeira e segunda etapa.

### **3.4.3 Cura**

Após a desforma dos corpos-de-prova iniciou-se a cura térmica na câmara de climatização do LMC. Esta câmara permite simular o ambiente a uma temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ .

As amostras foram inicialmente imersas em água com temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  e então mantidas, por 24 horas, dentro da câmara com uma temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ . A temperatura da água foi sendo gradativamente aumentada, iniciando em  $40^{\circ}\text{C}$  até chegar a  $100^{\circ}\text{C}$ , em aproximadamente 12 horas. Após o período de cura térmica, os CPR foram dispostos na sala de cura do LMC, onde o ambiente apresenta uma umidade relativa de  $65 \pm 10\%$  e temperatura de  $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### **3.4.4 Ensaios de resistência à compressão axial**

Para os ensaios de compressão axial foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 50 mm x 100 mm, utilizando fôrmas que possibilitam a aplicação de carga

confinante. O ensaio de compressão axial foi realizado conforme a NBR 5739:2007 no LMC da UNISINOS, conforme Figura 32.



**Figura 32 – Corpo-de-prova em ensaio de compressão axial.**

As fôrmas, Figura 33, foram confeccionadas no Laboratório de Mecânica (LM) da UNISINOS. Para a sua fabricação foi utilizado um tubo com diâmetro interno de duas polegadas e com espessura da parede de 5 mm. Para a base foram cortadas tiras de dois centímetros de espessura de uma barra maciça de aço carbono, com dimensão de 70 x 70 mm.



**Figura 33 – Fôrma cilíndrica utilizadas na pesquisa.**

O molde foi confeccionado com dimensão interna de 50 mm de diâmetro e 150 mm de altura, para obter um corpo-de-prova cilíndrico com dimensões de 50 mm x 100 mm, conforme os geralmente utilizados para testes de cimentos e argamassas. Foi necessário confeccionar o molde com uma altura de 150 mm para que fosse possível a introdução de uma bucha dentro do cilindro, para realizar o contato com o concreto, deslizando internamente dentro do molde. Para a confecção da bucha foi utilizada uma barra de nylon com diâmetro de 50 mm, cortada com altura de 40 mm.

Os corpos-de-prova foram confeccionados com uma altura média de 120 mm, para que antes do ensaio de compressão, os mesmos fossem serrados e retificados mantendo a relação de altura/diâmetro ( $h/d$ ) igual a 2. Na Figura 34 observa-se o corte e retífica da amostra.



**Figura 34 – Corpo-de-prova sendo retificado.**

### **3.4.5 Ensaio de resistência à tração na flexão**

Para o ensaio de tração na flexão foram moldados corpos-de-prova prismáticos com dimensão de 4 cm x 4 cm x 16 cm, utilizando fôrmas que possibilitaram a aplicação de carga confinante no material, Figura 35. O ensaio foi realizado conforme a NBR 12816:2010, flexão com carga aplicada nos terços médios do prisma.



**Figura 35 – Fôrmas prismáticas utilizadas na pesquisa.**

As fôrmas foram confeccionadas no LM da UNISINOS. Foram confeccionadas com chapa de aço SAE 1020 com espessura de 10 mm, usinadas em torno mecânico e fresadora para os encaixes.

Nos prismas foram instalados extensômetros elétricos, *strain gages*, para que fosse possível a determinação da deformação na face mais tracionada durante o ensaio de tração na flexão, para verificar o comportamento do material com as diferentes quantidades das fibras e determinar o módulo de elasticidade na flexão.

Foi acoplado também um LVDT (*linear variable differential transformer*) para determinar a deformação vertical do material durante o ensaio de tração na flexão, visando a tenacidade do material para cada composição de fibras. A Figura 36 mostra um corpo-de-prova instrumentado com os dois sistemas.



**Figura 36 – Instrumentação das amostras ensaiadas a flexão.**

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – LEME na UFRGS, e para isso foi utilizada uma prensa de marca Shimadzu com capacidade de 2000kN. Para a aquisição dos dados de forma simultânea foi utilizado um *datalogger* marca Spider 8, juntamente com o software Catman. A Figura 37 mostra a instrumentação completa do sistema.



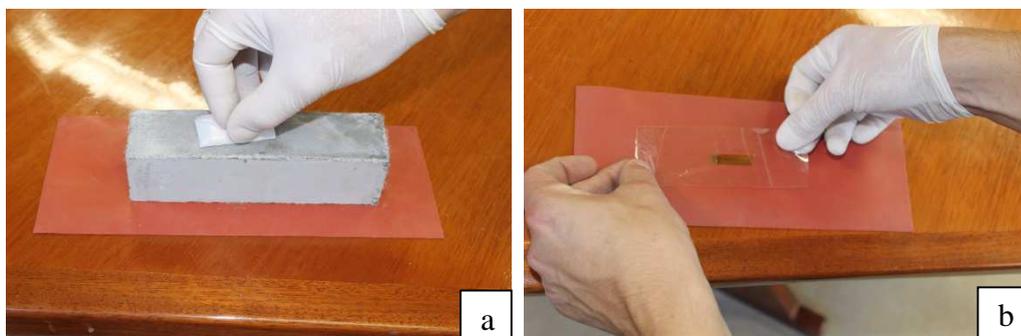
**Figura 37 – Equipamentos utilizados para aquisição de dados.**

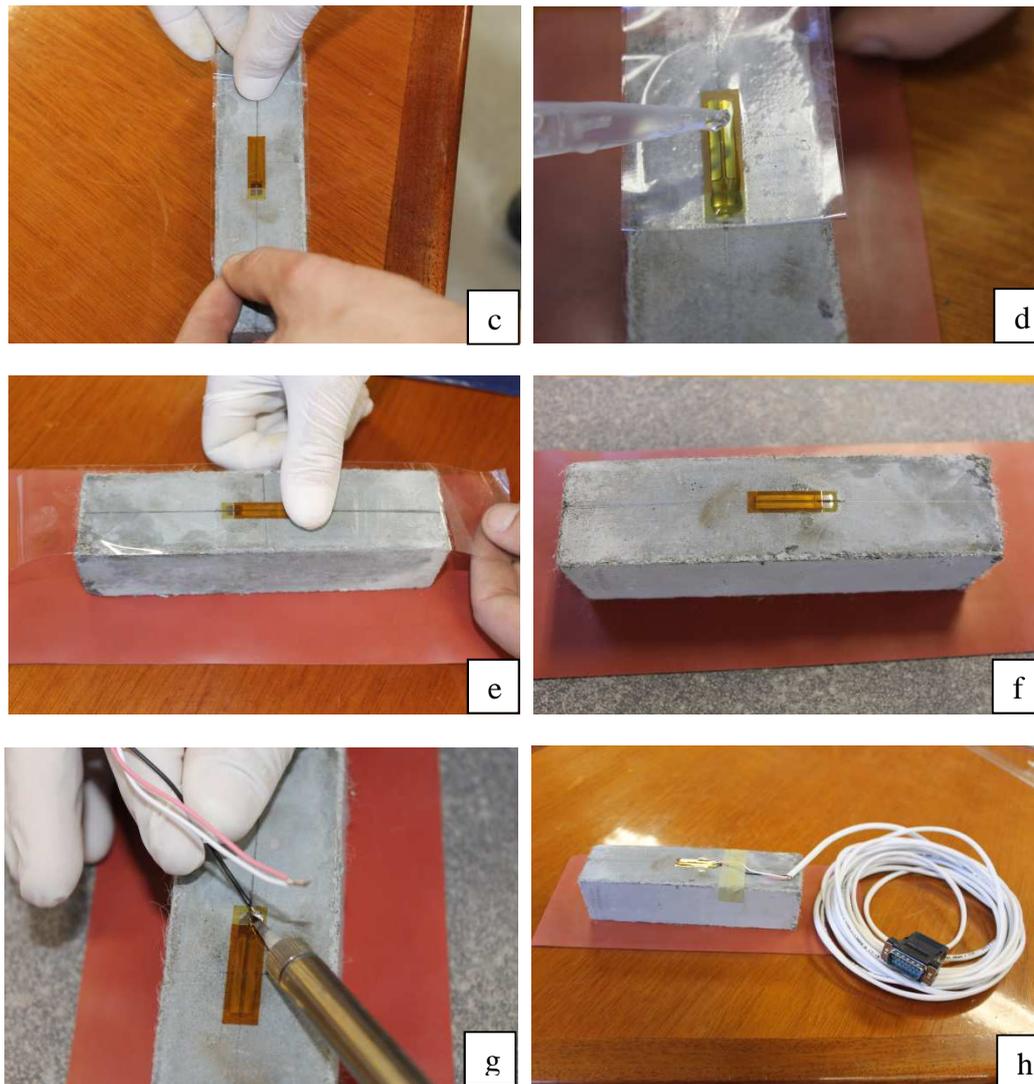
A aquisição dos dados de resistência, deformação da parte mais tracionada e o deslocamento vertical dos corpos-de-prova foram coletados para posterior avaliação do módulo de elasticidade e da tenacidade do composto.

#### 3.4.5.1 Módulo de elasticidade na flexão

Para a determinação do módulo de elasticidade na flexão os corpos-de-prova foram instrumentados com *strain gages* da marca HBM modelo LY 41 20/120. Para cada amostra foi utilizado um *strain gage*, ligado em  $\frac{1}{4}$  de ponte de Wheatstone.

A instrumentação foi realizada três dias antes do início dos ensaios. O processo de instrumentação segue apresentado na Figura 38.





(a) Limpeza da superfície (b) Colagem do extensômetro em uma fita para posicionamento correto no corpo de prova (c) Posicionamento do extensômetro no terço médio do corpo de prova (d) Colocação da cola no extensômetro (e) Colagem do extensômetro (f) Extensômetro devidamente colado (g) Soldagem dos cabos (h) Instrumentação completa do corpo-de-prova

**Figura 38 – Sequencia da instrumentação dos corpos-de-prova.**

O sistema de aquisição de dados utilizado permite fazer a leitura direta dos sinais analógicos emitidos pelos *strain gages*, fazendo a conversão direta dos sinais para  $\mu\text{m/m}$ , sem a necessidade de adicionar ao sistema um condicionador de sinais.

O *datalogger* utilizado possibilita uma fácil instalação e operação do sistema, ao contrário de outros equipamentos similares. As informações são recolhidas de forma muito simples e fácil, sem a necessidade de uso dos *jumpers*, potenciômetros que fazem a conversão dos sinais analógicos para sinais equivalentes. A conexão dos *strain gages* ao *datalogger* foi feita com um conector tipo BD 15, Figura 39.

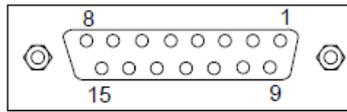


Figura 39 – Tipo de conector utilizado para a ligação dos *strain gages* ao analisador.

Este *datalogger* permite fazer ligações de extensômetros com ponte completa, meia ponte e ¼ de ponte. As ligações foram feitas todas em ¼ de ponte, pois foi utilizados *strain gage externos*, com esquema de montagem apresentado na Figura 41.

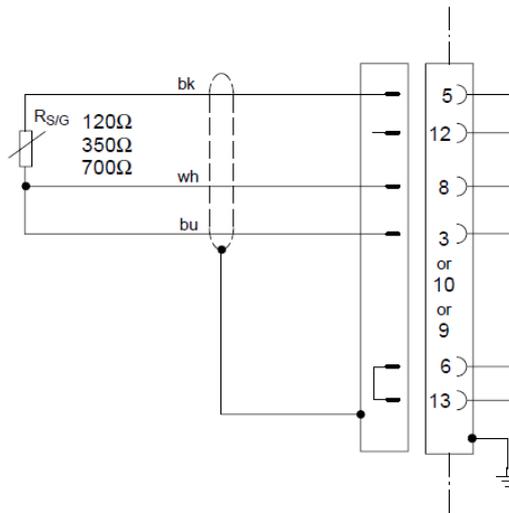


Figura 40 – Esquema da conexão elétrica dos *strain gages*.

Os dados para a avaliação do módulo de elasticidade foram fornecidos pela prensa utilizada no ensaio de flexão em quatro pontos, e a deformação na parte mais tracionada dos corpos-de-prova foi determinada pelos extensômetros.

A determinação do módulo de elasticidade na tração foi realizada utilizando a teoria desenvolvida pelo físico Thomas Young em 1802, conhecida também com módulo de Young. A teoria é baseada na lei de Hooke aplicada aos materiais, dada pela equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 3}$$

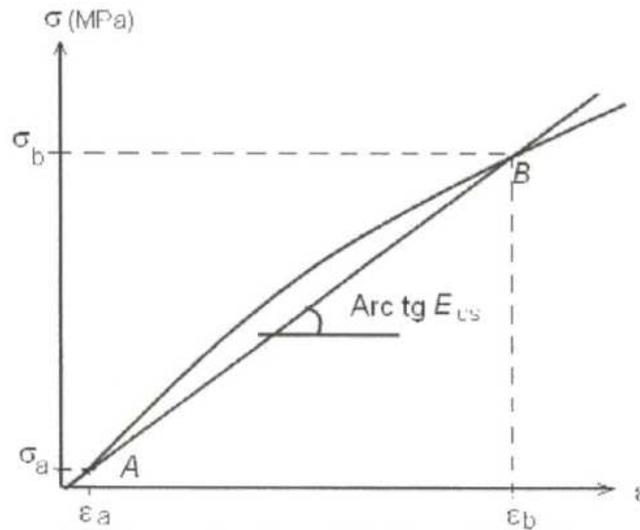
Onde:

$\sigma$  = tensão

E = o módulo de elasticidade ou módulo de Young

$\varepsilon$  = deformação específica

Neste estudo foi adotado o módulo de elasticidade secante ( $E_{sc}$ ), determinado pelo coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão deformação específico, como ilustra a Figura 41.



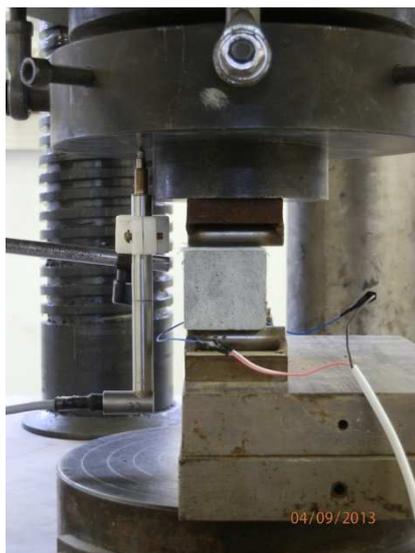
**Figura 41 – Representação esquemática do módulo de deformação secante.**

Fonte: ABNT NBR 8522

O módulo de elasticidade foi determinado através da equação mostrada na Figura 41, onde foi considerada a inclinação da reta gerada no regime elástico do gráfico tensão vs deformação. A deformação inicial, representada pelos primeiros 5%, foi ignorada tendo em vista a acomodação do sistema. Os 10% de deformação final antes da primeira fissura gerada nos corpos-de-prova também foram desconsiderados, obtendo assim a reta onde  $\sigma_a$  corresponde a 5% e  $\sigma_b$  corresponde a 90% da carga necessária para causar a primeira fissura.

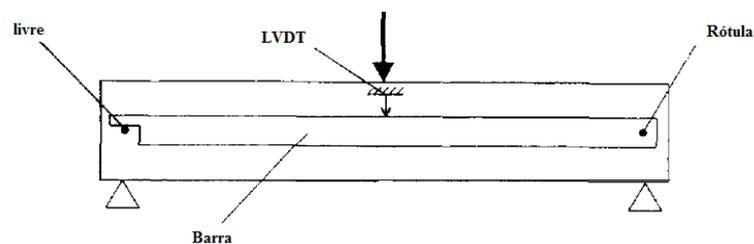
#### 3.4.5.2 Tenacidade

Para a determinação da tenacidade foi utilizado no mesmo ensaio de flexão um transdutor de deslocamento (LVDT) para medir a deformação vertical da amostra e assim obter o gráfico de carga vs deslocamento, como mostra a Figura 42.



**Figura 42 – Detalhamento da instrumentação do transdutor de deslocamento.**

Cabe ressaltar que o transdutor busca o deslocamento do conjunto, e não do centro do vão do corpo-de-prova. Para que o valor exato do deslocamento seja determinado a amostra deveria ser instrumentada com um sistema como mostrado na Figura 43, porém não foi possível utilizar este sistema devido às dimensões dos corpos-de-prova, e por isso foi adotada a solução apresentada.



**Figura 43 – Representação da instrumentação utilizada para a determinação do deslocamento axial em peças submetidas a ensaio de flexão.**

O LVDT foi acoplado ao *datalogger* e os dados foram registrados simultaneamente com a carga, deslocamento do *strain gage* e do LVDT. Com estes dados foram gerados os gráficos de carga vs deslocamento e a área abaixo da curva foi calculada pelo método do trapézio consecutivo. Para a determinação deste parâmetro foi utilizada a norma ASTM C 1018 (ver item 2.6), porém utilizando os corpos-de-prova prismáticos, devido à introdução de pressão confinante no material ainda no estado fresco. Este método consiste em determinar a tenacidade do material para valores múltiplos da deflexão encontrada.

### 3.4.6 Absorção de água por sucção capilar

O ensaio de absorção de água por sucção capilar foi realizado seguindo os requisitos da RILEM TC 116 PCB, com uma adaptação nas dimensões das amostras, mas seguindo a recomendação da área mínima. O ensaio consiste em submeter os corpos-de-prova a uma lâmina de água constante, suas faces externas envolvidas por material impermeável, Figura 44.

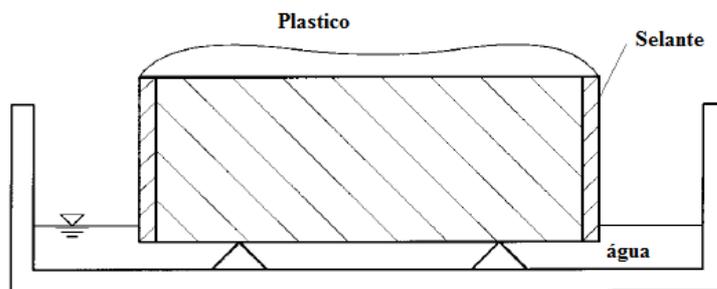


Figura 44 – Esquema da instrumentação do ensaio.

Fonte: RILEM TC 116 PCB.

O consumo de água por sucção capilar é mensurado através do peso dos elementos submersos em função do tempo, sendo recomendada a determinação do peso nos intervalos de 10 min, 1h, 4h e 24h.

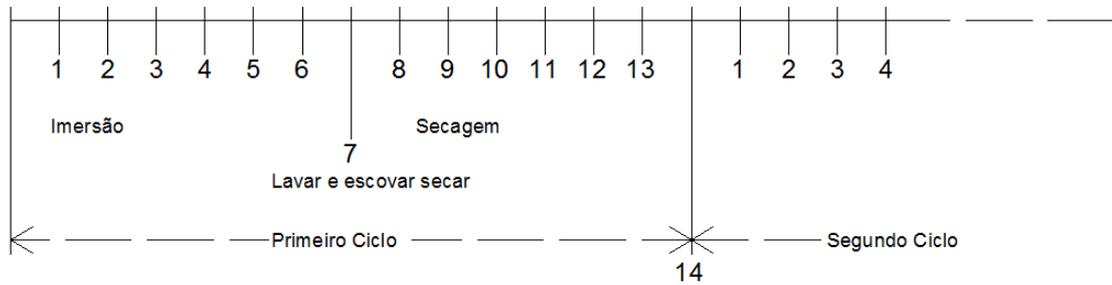
### 3.4.7 Ataque químico

O estudo de ataque químico foi realizado seguindo os procedimentos recomendados por Camps, Laplanche e Rim (2003), com os ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), nítrico ( $HNO_3$ ) e clorídrico ( $HCl$ ).

A escolha dos reagentes supracitados se deu devido ao ácido sulfúrico estar presente na indústria petroquímica, papelreira e de baterias de automóveis; o ácido clorídrico ser utilizado comumente na limpeza do setor de construção, também com o uso bastante difundido em indústrias e laboratórios; e o ácido nítrico por ser um dos ácidos mais produzidos e consumidos pela indústria.

O ensaio consiste em submeter amostras a ciclos de imersão em solução com uma concentração definida do reagente por um período, seguidos por ciclos de secagem em ambiente de laboratório por intervalo de tempo igual ao de imersão. O ciclo compreende em pesar os corpos-de-prova secos, coloca-los em imersão na solução por sete dias, retirar da solução e colocar para secar em ambiente de laboratório por mais sete dias. Os corpos-de-prova ao serem retirados da solução química foram lavados com água corrente e escovados

suavemente para eliminar eventuais produtos de corrosão da superfície; e após o período de secagem foram novamente pesados e se iniciou o novo ciclo. A Figura 45 apresenta o esquema do ciclo de agressão (CAMPS; LAPLANCHE; RIM, 2003).



**Figura 45 – Esquema do ciclo de agressão.**

Para a realização deste ensaio foram utilizados corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, sendo utilizados 3 amostras para cada reagente. A concentração do reagente na solução foi de 5%, para a realização de cinco ciclos completos de exposição, seguidos da avaliação da sua resistência à flexão, perda de massa e perda de volume.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados para cada variável de resposta estudada, em forma de tabelas e gráficos para facilitar a visualização. O programa experimental foi dividido em três etapas, como descrito em 3.1.1.

### 4.1 PRIMEIRA ETAPA

#### 4.1.1 Substituição parcial do cimento por cinza volante

Para a avaliação da substituição parcial do cimento por cinza volante foi utilizado o traço apresentado no item 3.3, com a substituição de parte do cimento por cinza volante. O traço utilizado para esta avaliação está apresentada na Tabela 12. Para melhor organização do programa experimental foram criadas siglas para todas as misturas.

- M0 – Mistura referência;
- M10 – Mistura com 10% de substituição parcial do cimento por cinza volante;
- M20 – Mistura com 20% de substituição parcial do cimento por cinza volante;
- M30 – Mistura com 30% de substituição parcial do cimento por cinza volante;
- M40 – Mistura com 40% de substituição parcial do cimento por cinza volante;
- M50 – Mistura com 50% de substituição parcial do cimento por cinza volante;

**Tabela 12 – Traço utilizado na primeira etapa.**

Traço da primeira etapa em kg/m <sup>3</sup>									
Mistura	Cimento	Cinza Volante	Sílica ativa	Areia fina	Areia de fundição	Pó de quartzo	Água	Aditivo superplastif.	Aditivo modificador viscosidade
M0	359,72	0	213,88	495,83	583,33	291,66	114,72	17,2	5,7
M10	323,75	35,97	213,88	495,83	583,33	291,66	114,72	17,2	5,7
M20	287,77	71,944	213,88	495,83	583,33	291,66	114,72	17,2	5,7
M30	251,80	107,92	213,88	495,83	583,33	291,66	114,72	17,2	5,7
M40	215,83	143,89	213,88	495,83	583,33	291,66	114,72	17,2	5,7
M 50	179,86	179,86	213,88	495,83	583,33	291,66	114,72	17,2	5,7

A consistência das misturas não apresentou grande variação com a substituição do cimento pela cinza volante. Todas se mantiveram próximas a 260 mm de diâmetro, como pode ser visto na Tabela 13 e visualizado na Figura 46 que mostra uma das medições realizadas.

**Tabela 13 – Resultados do ensaio de trabalhabilidade do CPR.**

Misturas	Abatimento (mm)
M0	259
M10	260,5
M20	260
M30	262
M40	262,5
M50	263



**Figura 46 – Trabalhabilidade do CPR em ensaio na mesa de consistência.**

Para cada mistura foram confeccionados quatro (4) corpos-de-prova. Os resultados em termos de resistência à compressão, assim como as médias aritméticas e coeficiente de variação das resistências estão apresentadas na Tabela 14. Os valores espúrios foram desconsiderados nos cálculos e estão identificados com a cor vermelha.

**Tabela 14 – Resultados das resistências à compressão das misturas e médias aritméticas .**

	M0	M10	M20	M30	M40	M50
Resistência (MPa)	112,2	116,3	149,2	181,9	173,4	115,6
	102,5	125,3	167,2*	205,0	171,0	134,3
	110,3	96,1	141,5	185,9	181,8	139,6
	164,8*	115,8	128,6	185,9	189,9	173,4*
<b>Média aritmética (MPa)</b>	<b>108,3</b>	<b>119,1</b>	<b>139,8</b>	<b>189,7</b>	<b>179,0</b>	<b>129,8</b>
<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	<b>5,1</b>	<b>5,3</b>	<b>10,4</b>	<b>10,4</b>	<b>8,6</b>	<b>12,6</b>
<b>Coeficiente de Variação (%)</b>	<b>4,7</b>	<b>4,5</b>	<b>7,4</b>	<b>5,5</b>	<b>4,8</b>	<b>9,7</b>

\* Valores espúrios

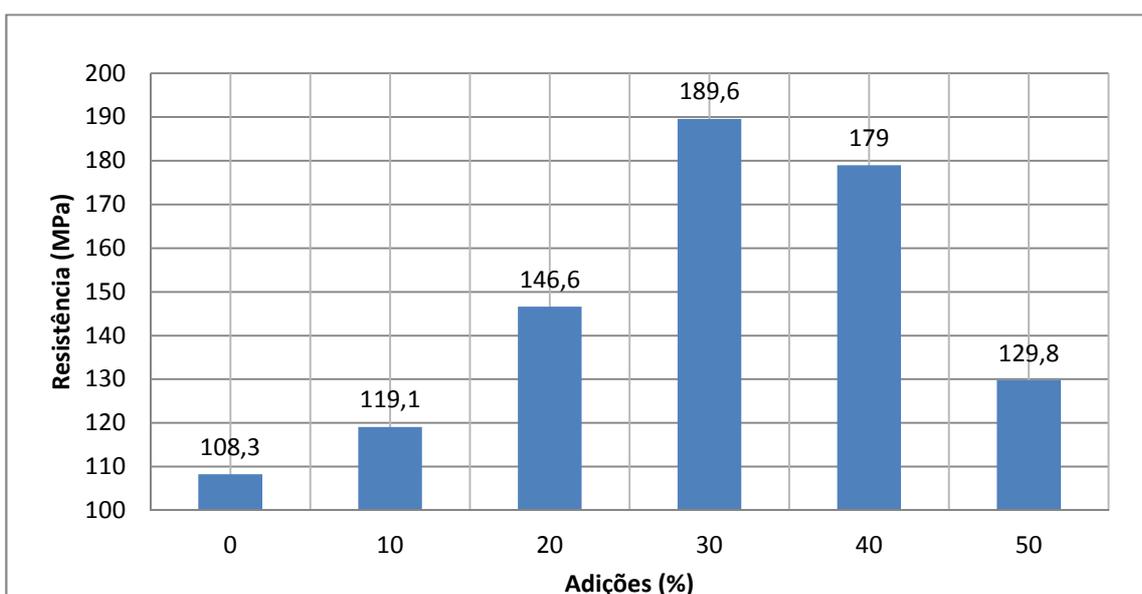
A partir dos resultados apresentados foi realizada uma análise estatística dos resultados, apresentada na Tabela 15, através de análise de variância (ANOVA).

**Tabela 15 – Resultado da análise de variância desenvolvida com os resultados.**

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teores de adição	18413,45208	5	3682,690417	11,10789188	5,35705E-05	2,772853153
Erros	5967,6875	18	331,5381944			
Total	24381,13958	23				

Analisando os resultados da análise estatística pode-se concluir que com o valor “p” menor que 0,01 indica que a relação entre a variável é estatisticamente significativa a um intervalo de confiança de 99%.

Apesar das grandes variações nas resistências pode se perceber que a mistura com a maior resistência foi a de 30% de substituição, M30. A substituição de cimento por cinza volante apresentou um aumento gradativo conforme o aumento da porcentagem de substituição, até 30%, pois após este teor a resistência apresentou um declínio, como é possível perceber na Figura 47, que apresenta as médias aritméticas das resistências à compressão em relação ao teor de substituição.



**Figura 47 – Resistências médias para cada teor de substituição do cimento por cinza volante.**

Pode ser visualizado um claro aumento na resistência à compressão do CPR com a substituição parcial do cimento por cinza volante entre os teores de 10% a 30%, e também pode ser percebida a diminuição da resistência a partir da substituição de 30%.

A partir dos resultados encontrados na primeira etapa, foi possível dar continuação à segunda etapa, que consiste em verificar a melhor composição dos dois tipos de fibras dentro da mistura, no traço com substituição de 30% de cimento por cinza volante.

## **4.2 SEGUNDA ETAPA**

Como descrito anteriormente, para a avaliação da melhor composição entre os dois tipos de fibras no CPR, foi criado um programa experimental com a mistura que apresentou maior resistência à compressão na primeira etapa. O traço utilizado está descrito na Tabela 16, onde foram estudadas sete misturas de fibras e avaliado o seu comportamento mecânico. Para melhor organização da apresentação e discussão dos resultados foram criadas siglas para cada mistura, que correspondem a:

- A0 – Mistura com 0% de fibras de aço e 100% polipropileno;
- A50 - Mistura com 50% de fibras de aço e 50% polipropileno;
- A60 - Mistura com 60% de fibras de aço e 40% polipropileno;
- A70 - Mistura com 70% de fibras de aço e 30% polipropileno;
- A80 - Mistura com 80% de fibras de aço e 20% polipropileno;
- A90 - Mistura com 90% de fibras de aço e 10% polipropileno;
- A100 - Mistura com 100% de fibras de aço e 0% polipropileno;

As fibras foram dosadas em relação a massa do CPR, quantidade de fibra para cada porcentagem foi determinada através do peso específico de cada material.

**Tabela 16 – Traço utilizado na segunda etapa.**

Traço da segunda etapa em kg/m <sup>3</sup>											
Mistura	Fibra Aço	Fibra PP	Cinza	Cimento	Areia fina	Areia de fundição	Pó de quartzo	Sílica ativa	Água/aglom.	Aditivo	Mod. Viscosi.
A0	0	27,29	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7
A50	117,75	13,65	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7
A60	141,30	10,92	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7
A70	164,85	8,19	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7
A80	188,40	5,46	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7
A90	211,95	2,73	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7
A100	235,50	0	107,9	251,8	495,8	583,3	291,7	213,9	114,7	17,2	5,7

#### 4.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade das misturas, com diferentes tipos e teores de fibras, mostrou-se bastante sensível à adição das fibras de polipropileno. A Tabela 17 apresenta os valores obtidos para cada mistura.

**Tabela 17 – Resultado da trabalhabilidade das misturas híbridas.**

Misturas	Espalhamento (mm)
A0	210
A50	216
A60	219
A70	218
A80	220
A90	221
A100	240

A trabalhabilidade das misturas foi reduzida com o aumento do teor de fibra de polipropileno. As fibras de polipropileno são fibras muito pequenas, seu diâmetro é cerca de 95% menor do que as fibras de aço, obtendo assim uma maior concentração de fibras, o que gera uma maior área específica.

Os teores de fibras incorporados são em massa, logo, 10% da massa de fibra de polipropileno representa uma quantidade unitária de fibras grande. Consequentemente, em cada teor que diminui 10% de fibras de polipropileno, para aumentar os mesmos 10% de fibra de aço, o volume de fibras diminui consideravelmente, fazendo com que a mistura tenha melhor trabalhabilidade.

#### 4.2.2 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão do CPR com as diferentes misturas de fibras estão apresentados na Figura 48. Estes valores correspondem à média aritmética das resistências dos quatro corpos-de-prova analisados, para cada mistura de fibras.

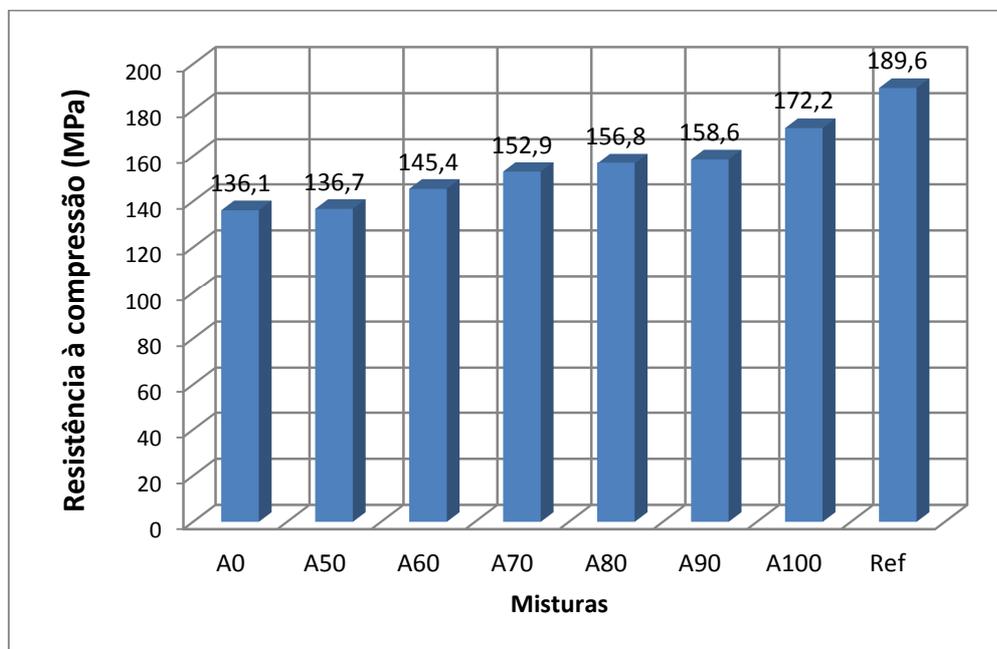


Figura 48 – Resistência à compressão das misturas com variação de fibras e o referencia.

Com auxílio da Figura 48 é possível notar o aumento da resistência à compressão com o acréscimo de percentual de fibras de aço na mistura. Pode ser verificado também que a resistência à compressão do material diminui com o aumento do teor de fibras de polipropileno incorporado na mistura, na medida em que se tem maior quantidade de fibras de aço, maior é a resistência à compressão.

A resistência à compressão do CPR com 100% de fibras de polipropileno apresentou um decréscimo de 28% na resistência à compressão se comparada com o referência, sem fibras. Já o CPR com 100% de fibras metálicas apresentou um decréscimo de 9%.

A resistência à compressão de um concreto é fundamentalmente dependente de sua matriz cimentícia, onde as fibras são exigidas apenas na fase de pós-fissuração. Portanto, em geral não há contribuição no aumento da resistência à compressão do material (DING *et al.*, 2011).

### 4.2.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de tração na flexão estão apresentados na Figura 49. Estes resultados são as médias dos quatro corpos-de-prova ensaiados para cada mistura. Pode-se perceber que a hibridização de fibras é um fator determinante na resistência à tração na flexão do CPR.

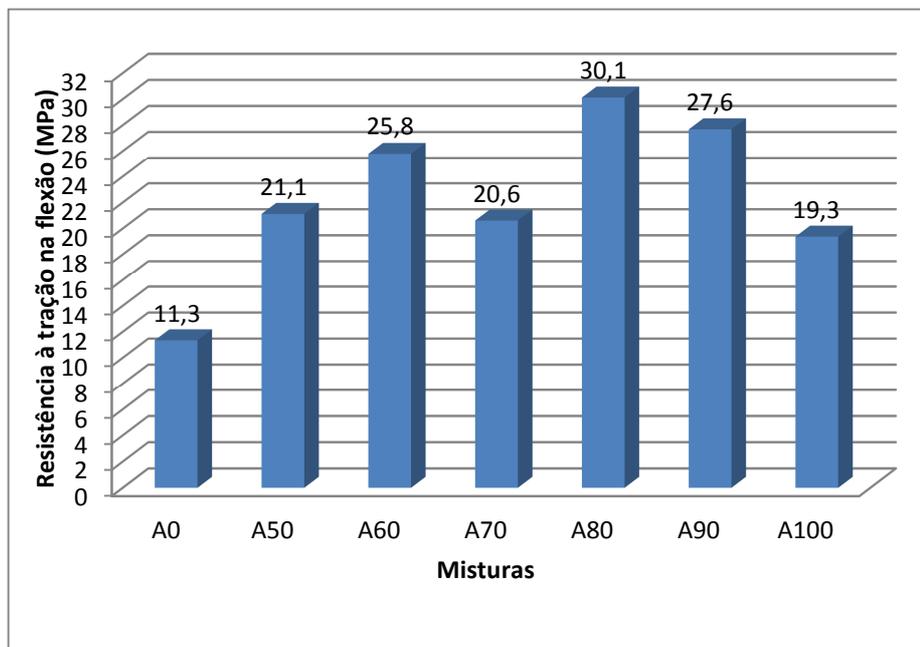


Figura 49 – Resistências à tração na flexão das misturas estudadas.

A mistura que apresentou maior resistência à tração na flexão foi a com 80% de fibras de aço e 20% de fibras de polipropileno. Pode-se perceber que à medida que se aumenta a quantidade de fibras de aço na mistura, em teores de até 80%, a resistência à tração na flexão aumenta gradativamente, tendo um pequeno decréscimo nos teores de 70% de fibras de aço e 30% de polipropileno, provavelmente um erro de ensaios.

A baixa resistência à tração dos CPR com maiores teores de fibras de polipropileno está ligada a função da fibra na mistura. As fibras poliméricas em concreto ou em argamassas tem a finalidade de diminuir retração e a iniciação de microfissuras, e não necessariamente melhorar propriedades mecânicas dos compósitos (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2003). A discussão sobre o papel de cada tipo de fibra poderá ser mais aprofundada a partir da análise dos valores de tenacidade das misturas (item 4.2.5).

Com a verificação da resistência à tração na flexão do CPR com fibras híbridas conclui-se, como esperado, que a combinação de fibras distintas pode levar a resultados superiores em

relação a um único teor de fibras, tanto para fibras de aço como para de polipropileno, como pode ser observado na Figura 49.

#### 4.2.4 Módulo de elasticidade na flexão

A determinação do módulo de elasticidade na flexão ocorreu a partir das leituras dos *strain gages*, instalados na parte inferior nos prismas, e das medições das cargas aplicadas. Ambos os dados foram adquiridos no ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos, cujos resultados são apresentados na Figura 50.

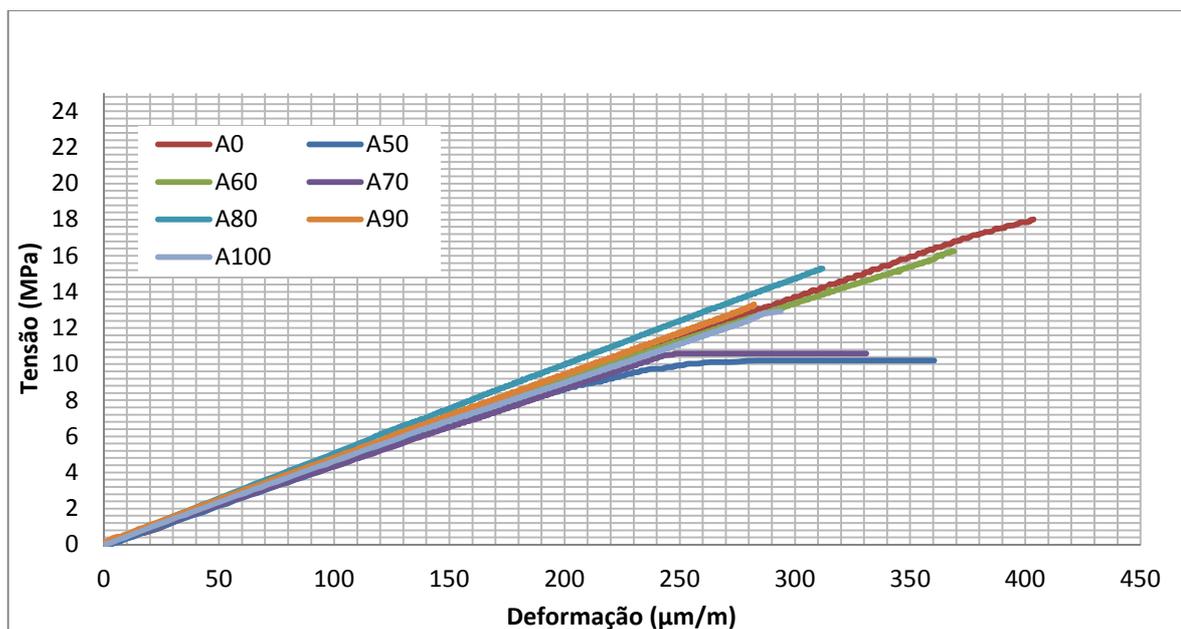


Figura 50 – Gráfico tensão deformação da parte mais tracionada dos corpos-de-provas prismáticos em ensaio de flexão em quatro pontos.

Com auxílio da Figura 50 é possível perceber que os modelos apresentam praticamente o mesmo comportamento na resposta inicial. Verifica-se que a resposta elástica inicial, compreendida no intervalo entre 0 e 240 µm de deslocamento na face mais tracionada dos modelos, é praticamente inalterada em função do tipo de fibra utilizada ou pela hibridização das fibras.

Na maioria das amostras a ruptura ocorreu devido a apenas uma fissura discreta; entretanto, em algumas amostras, foi verificada a formação de múltiplas fissuras, como esperado nas amostras de melhor desempenho. As imperfeições apresentadas no gráfico da Figura 50 nos modelos A80 e A90 são devidas ao surgimento de fissuras secundárias fora do terço médio, o que ocasionou um alívio das tensões na parte mais tracionada, como ilustrado na Figura 51. Os *strain gages* foram posicionados dentro do terço médio dos corpos-de-prova,

com o surgimento de fissuras fora do terço médio o *strain gages* não se romperam, porém registraram uma leitura de encurtamento do material, devido ao alívio de tensão gerada pela fissura.

Ainda é possível perceber com auxílio da Figura 50 que o modelo A70 apresentou após a fase elástica um período em que a carga se manteve constante e a deformação foi gradativamente aumentada, e em certo momento o material começou a resistir novamente ao carregamento. Este processo ocorreu devido a uma fissura, e a mesma foi sendo aberta até certo estágio, quando as fibras inibiram a propagação da mesma, atuando como ponte de transferência de tensões.

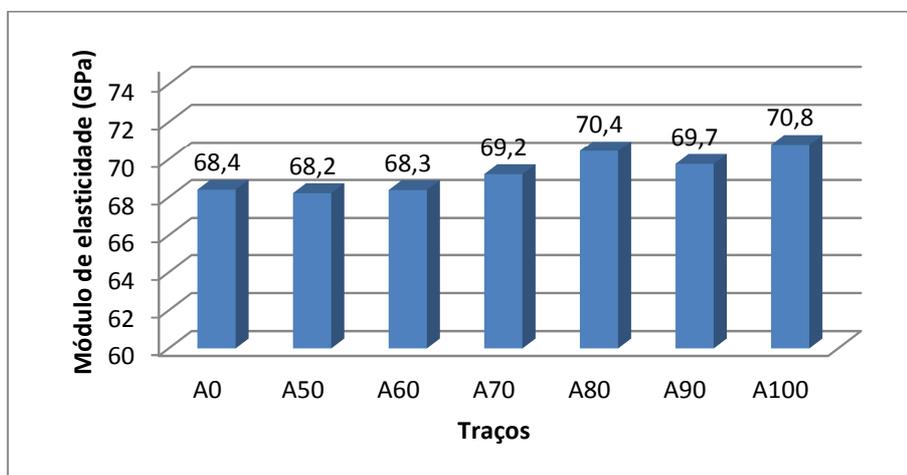


**Figura 51 – Fissuras fora do terço médio dos corpos-de-prova.**

A partir do gráfico de tensão x deformação gerado no ensaio de resistência à tração na flexão foi possível determinar o módulo de elasticidade secante  $E_{cs}$  à tração das diferentes misturas de fibras analisadas, determinada pela equação 3. Onde os resultados estão apresentados na Figura 52.

$$E_{cs} = tg\alpha$$

**Equação 4**



**Figura 52 – Módulo de elasticidade á flexão das diferentes misturas.**

Percebe-se que o módulo de elasticidade à flexão do CPR aumenta conforme o aumento do teor de fibras de aço na mistura. Cabe ressaltar que mesmo com pequena proporção de fibras de aço o material apresenta um elevado módulo de elasticidade, ficando acima de 68 GPa.

#### 4.2.5 Tenacidade

Para a determinação da tenacidade, foi utilizado o diagrama gerado no ensaio de tração na flexão, utilizando um LVDT para determinação do deslocamento. Para cada mistura híbrida de fibras foi gerado um gráfico de carga x deslocamento dos modelos analisados; os valores são apresentados na Figura 53.

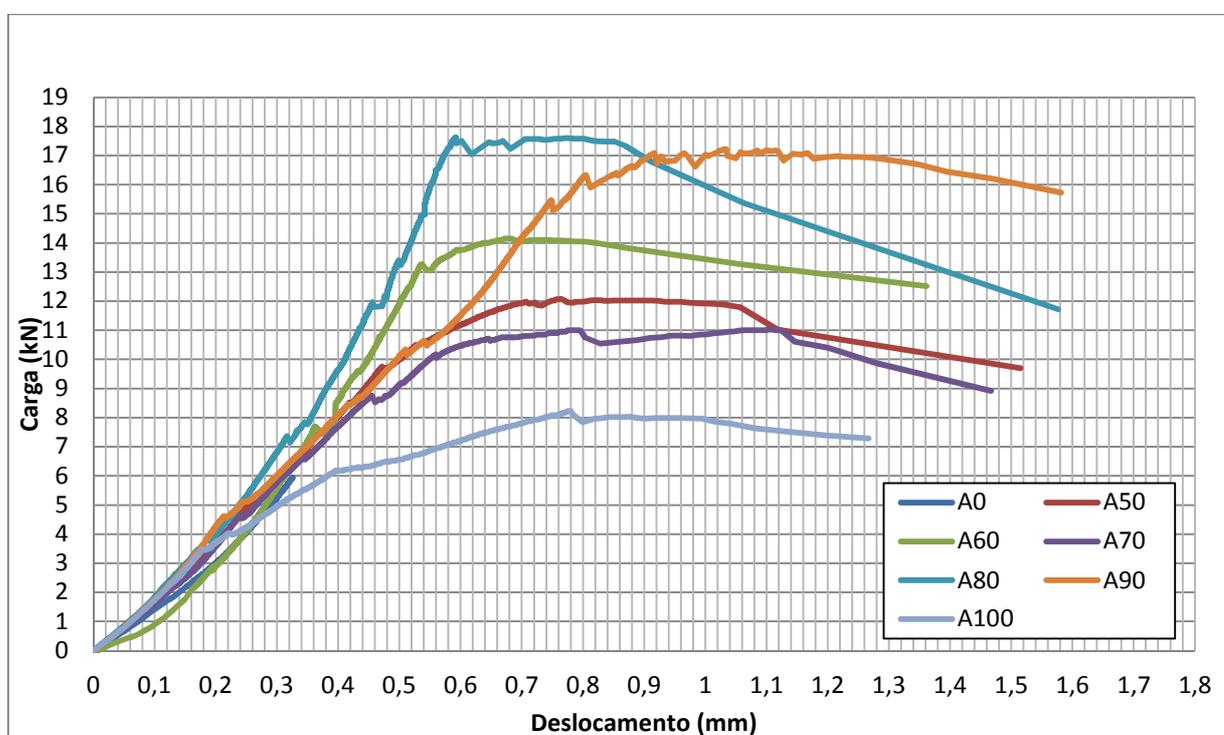


Figura 53 – Diagramas carga x deslocamento para cada mistura híbrida de fibras.

Pode-se perceber que todas as amostras apresentam na sua fase inicial um comportamento não linear causado pela acomodação do ensaio, seguido por uma fase elástica linear com capacidade de suporte e deslocamentos bastante variáveis em função de cada mistura analisada.

Com base nestes resultados, pode-se perceber claramente o efeito sinérgico obtido a partir da utilização de diferentes tipos e tamanhos de fibras em uma mesma mistura. Neste ponto, uma análise comparativa entre as amostras A0, A80 e A100 é particularmente ilustrativa. A amostra A0, apenas com fibras de polipropileno, sofre uma ruptura brusca

causada pela formação de uma única fissura, em um valor relativamente baixo (cerca de 7 kN), pois as fibras de PP não são capazes de impedir a propagação da fissura formada. A amostra A100, apenas com fibras de aço, apresenta apenas uma leve melhoria em relação à amostra A0, atingindo cerca de 9kN. Ao passo em que as fibras de aço, mais longas e mais resistentes, são capazes de evitar a propagação de fissuras formadas, evitando uma ruptura brusca, estas não são eficazes na prevenção da iniciação das microfissuras. Cabe lembrar que as fibras de aço têm comprimento de 13mm e diâmetro de 0,20mm, levando a um fator de forma (L/D) relativamente baixo, igual a 65. Por outro lado, a mistura A80 apresenta um comportamento sinérgico que supera em muito o desempenho individual das amostras confeccionadas apenas com um tipo e tamanho de fibra, chegando a quase 19kN de carregamento e uma excelente capacidade de absorver deformação sem romper. Neste caso, as fibras de PP (com 6mm de comprimento e apenas 12 $\mu$ m de diâmetro, levando a um fator de forma L/D=500 e, conseqüentemente, a uma expressiva quantidade de 1,62 milhões de fibras para cada kg adicionado) atuam no início do processo, prevenindo e atuando sobre a iniciação de microfissuras em toda a matriz, enquanto as fibras de aço atuam concomitantemente para evitar a propagação destas microfissuras, quando formadas.

Pode-se observar ainda que as amostras A50 e A70 apresentam um comportamento intermediário muito parecido, tanto na fase não linear quanto na fase linear. É possível perceber também que a mistura A60 apresenta uma maior deformação no carregamento inicial de 0 a 2 kN, no entanto apresentou elevada resistência final.

A partir deste diagrama, e com auxílio do método dos trapézios foi possível determinar a tenacidade de cada mistura em determinadas faixas de deformação. A norma ASTM C 1018 determina que a tenacidade seja calculada em faixas múltiplas da deformação encontrada na primeira fissuração, porém, para este trabalho e devido a grande variação do deslocamento dos modelos optou-se por também determinar a tenacidade para uma faixa específica da deformação.

A deformação máxima obtida nos ensaios foi variada, alguns modelos resistiram mais e outros menos, com a máxima deformação chegando a aproximadamente 1,6 mm para as misturas A80 e A90. Com isso foram realizadas cinco determinações de tenacidade múltiplas de 0,286 mm de deformação, valor este que foi determinado por ser o valor mais próximo da faixa da primeira fissuração da maioria das misturas testadas. A Tabela 18 apresenta os resultados da tenacidade para cada mistura submetida a ensaio de flexão.

**Tabela 18 – Resultados do ensaio de tenacidade**

Tenacidade	A0	A50	A60	A70	A80	A90	A100
$I_5 (0,286)$	0,28	0,34	0,23	0,33	0,38	0,37	0,25
$I_{10} (0,572)$	1,57	2,38	2,32	3,42	2,81	2,44	1,94
$I_{20} (0,858)$	-	5,69	6,31	8,00	7,72	6,17	4,11
$I_{30} (1,144)$	-	9,18	10,16	8,48	13,98	11,08	6,43
$I_{40} (1,43)$	-	12,28	13,44	11,49	18,09	16,01	8,58

Pode-se perceber uma grande variação na tenacidade em relação às diferentes misturas de fibras, sendo que uma similaridade dos valores é encontrada para as misturas A80 e A90. Na mistura A0, com 100% de fibras de polipropileno, não foi possível determinar a energia de fratura para elevadas deformações, mostrando incapacidade desta fibra em evitar a propagação de fissuras, como discutido anteriormente. A mistura que apresentou o melhor comportamento foi a 80% de fibras de aço e 20% de polipropileno.

### 4.3 TERCEIRA ETAPA

Com todos os dados apresentados na etapa 2, de resistência à compressão, resistência à tração, trabalhabilidade, módulo de elasticidade e tenacidade, a terceira etapa consiste em avaliar o desempenho da mistura que apresentou melhor resultado: a mistura com substituição parcial de 30% de cimento por cinza volante e 80% de fibras de aço e 20 % de fibras de polipropileno.

Nesta etapa foi avaliado o desempenho mecânico do material ao longo do tempo, e a durabilidade em relação ao ataque químico e a absorção de água por sucção capilar. O traço utilizado nesta etapa está apresentado na Tabela 19.

**Tabela 19 – Traço utilizado na terceira etapa.**

Materiais	Traço unitário		Traço em kg/m <sup>3</sup>	
Cimento	1	0,44	573,59	251,80
Sílica ativa		0,37		213,88
Cinza volante		0,19		107,91
Areia de fundição	2,39	1,02	1370,82	583,33
Areia fina		0,86		495,83
Pó de quartzo		0,51		291,66
Água	0,22*		126,19	
Superplastificante	0,03*		17,21	
Modif. de Visc.	0,01*		5,74	
Fibra de aço	0,748		188,4**	
Fibra de PP	0,021		5,46**	

\*Teor de adição em relação ao aglomerante

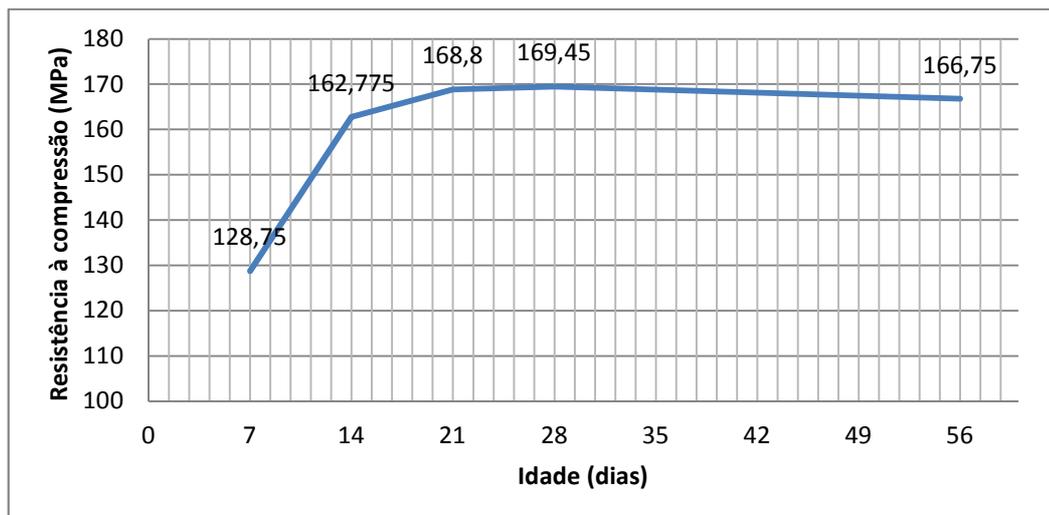
\*\*Valores em relação à massa de CPR

#### 4.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão ao longo do tempo do CPR com mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente, foi realizado e os resultados estão apresentados na Tabela 20 e a representação gráfica das médias aritméticas está apresentada na Figura 54.

**Tabela 20 – Resultados à compressão ao longo do tempo.**

Idades de ensaio	CP's	Resistência à compressão (MPa)	Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
7 dias	1	135	128,7	12,78	9,93
	2	132			
	3	138			
	4	110			
14 dias	5	154,1	162,8	13,73	8,43
	6	181,1			
	7	150,6			
	8	165,3			
21 dias	9	170,3	168,8	5,12	3,03
	10	162,9			
	11	175			
	12	167			
28 dias	13	185	169,4	13,37	7,89
	14	176			
	15	160,3			
	16	156,5			
56 dias	17	164	166,7	5,56	3,33
	18	165			
	19	163			
	20	175			

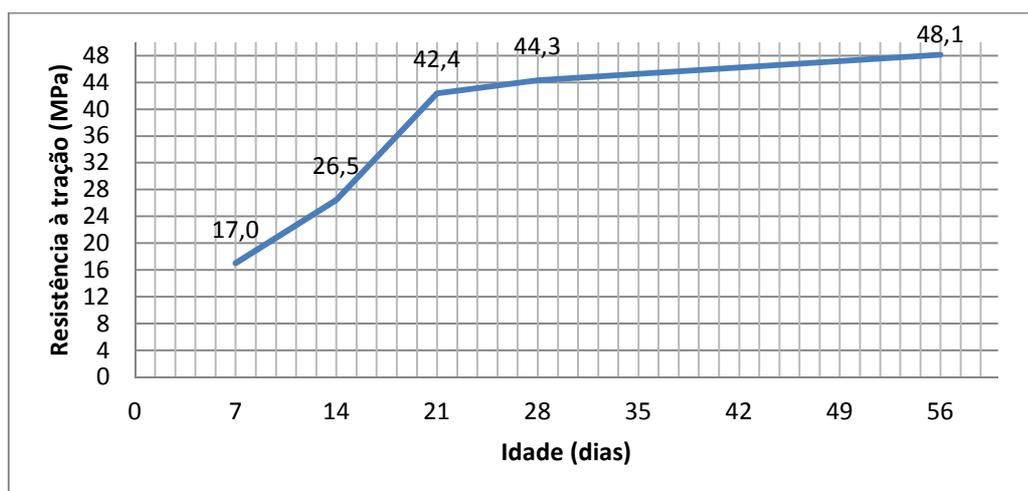


**Figura 54 – Resistência média dos corpos-de-prova ao longo do tempo.**

Com o auxílio da Tabela 20 é possível perceber que a resistência à compressão aumentou ao longo do tempo até a idade de 14 dias, após isso a resistência apresenta uma estabilização. A resistência encontrada está muito próxima da encontrada na etapa 2, com a mistura A80 que corresponde a mesma mistura desta etapa, onde a resistência encontrada é de 156,8 MPa.

#### 4.3.2 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração na flexão ao longo do tempo do CPR com mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente, foi feito e os resultados estão apresentados na Figura 55.



**Figura 55 – Resistência à tração na flexão ao longo do tempo.**

Com o auxílio da Figura 55, é possível notar que a resistência à tração na flexão do CPR aumenta com o tempo. A evolução é maior nas idades iniciais até o período de 21 dias, após isso a resistência segue crescendo, porém em uma menor proporção.

O cimento utilizado na pesquisa foi um cimento CP-V, onde a resistência final é rapidamente atingida. Durante a hidratação do cimento é produzido o hidróxido de cálcio que reage com os materiais pozolânicos formando novos cristais hidratados aumentando a resistência do material. E até os 28 dias, aproximadamente, os materiais pozolânicos já consumiram todo o hidróxido de cálcio disponível, estabilizando a mistura. Certamente, no interior do CPR, resta uma série de partículas de cimento não hidratadas e materiais pozolânicos atuando como inertes.

#### 4.3.3 Ataque químico

A verificação da variação volumétrica, perda de massa e resistência à tração na flexão foram os itens avaliados após ensaio de ataque químico no CPR com substituição de 30% do cimento por cinza volante e utilização de uma mistura híbrida de fibras em teores de 80% e 20% de aço e polipropileno, respectivamente.

O material apresentou variações das propriedades avaliadas em função do tempo de exposição a que foi submetido. Os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 56 e na Figura 57, onde as perdas de massa e de volume estão apresentadas em percentuais para cada ciclo.

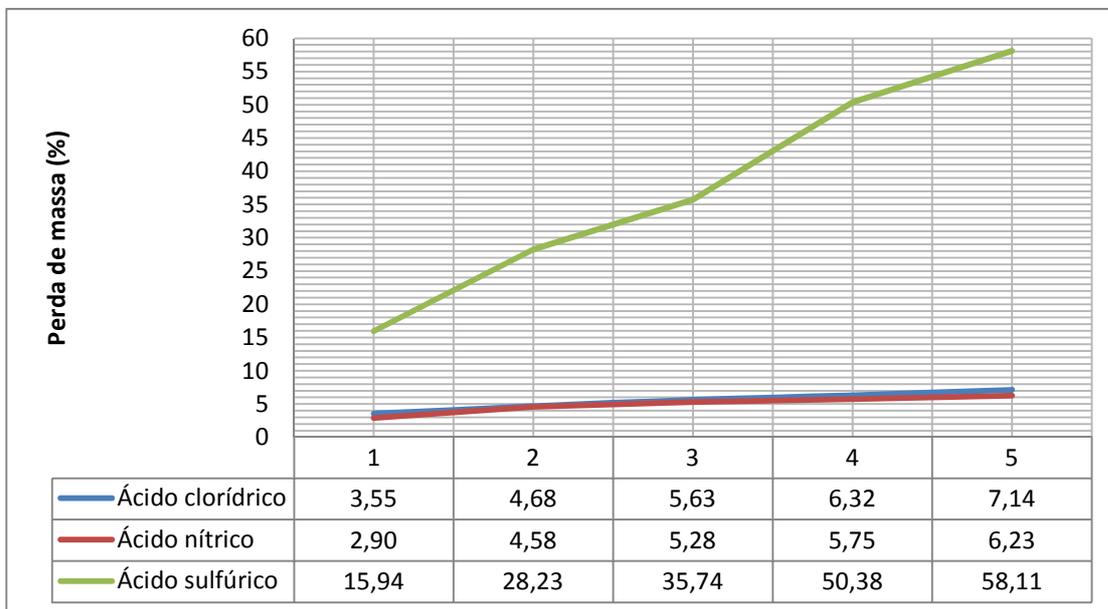
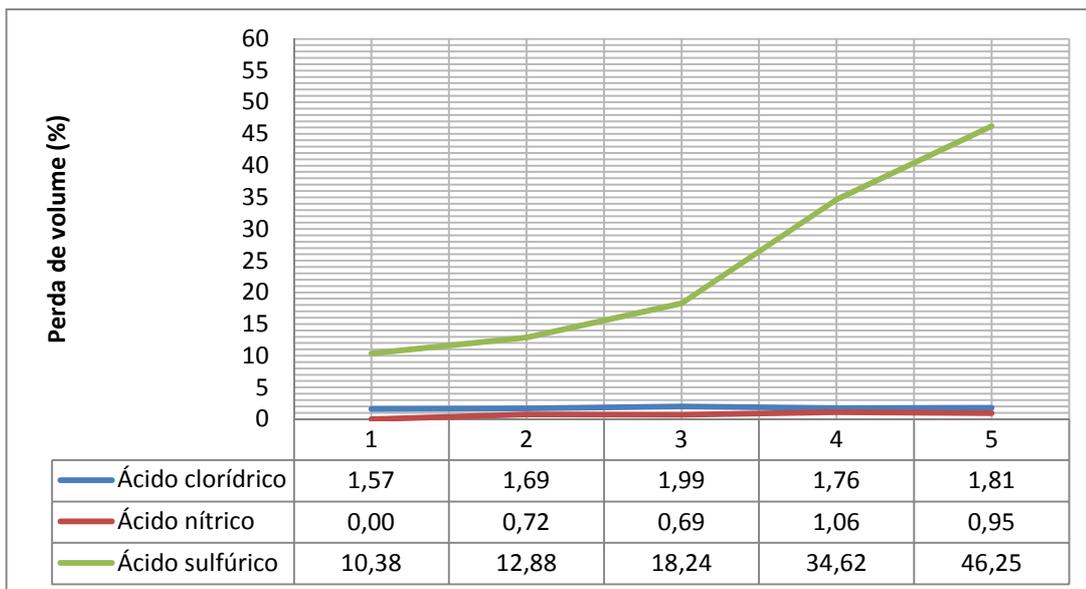
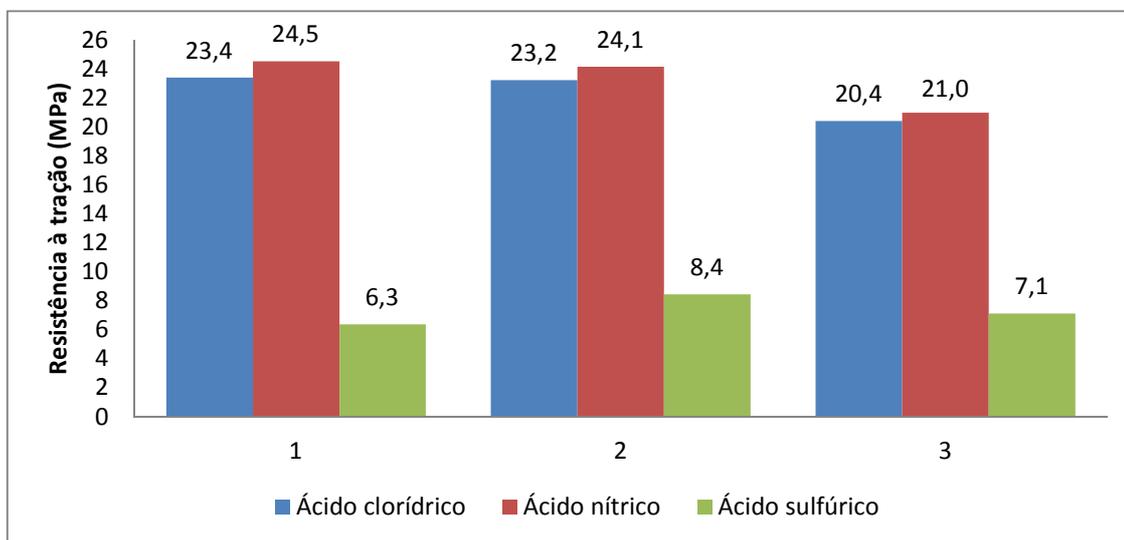


Figura 56 – Resultados da perda de massa em função dos ciclos de exposição.



**Figura 57 – Resultados da perda de volume em função dos ciclos de exposições**

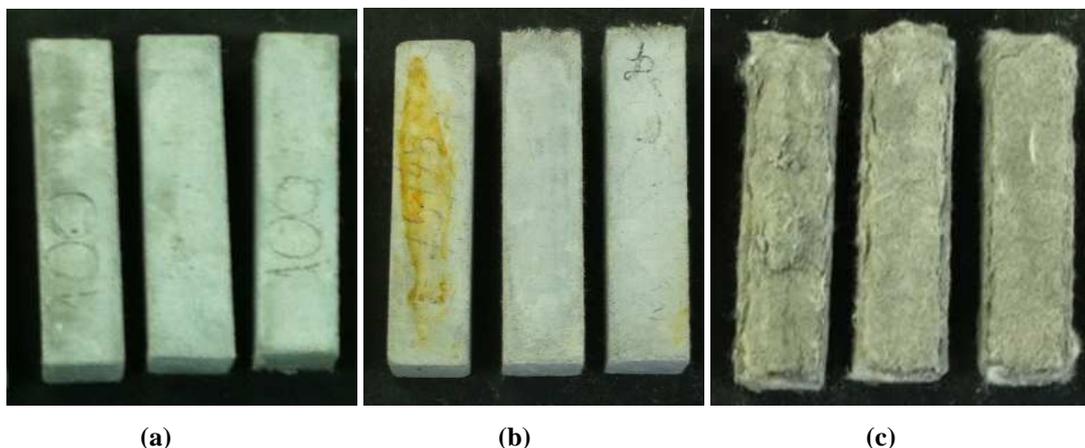
Após o término do quinto ciclo e com as massas e volumes devidamente registrados, foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova. As médias dos resultados da resistência à tração, para cada ácido, estão apresentados na Figura 58.



**Figura 58 – Resistência à tração dos corpos-de-prova após os cinco ciclos de ataque químico.**

Com os resultados apresentados é possível perceber que a exposição do CPR em ambientes extremamente agressivos afeta as propriedades físicas do material. Observa-se que as soluções de ácido clorídrico e nítrico não afetaram significativamente o desempenho do CPR, porém a solução de ácido sulfúrico prejudica consideravelmente o desempenho do material.

A análise visual feita nas amostras após os ciclos de ataque químico mostram as mesmas conclusões. Os corpos-de-prova que sofreram maior degradação foram os que ficaram em contato com o ácido sulfúrico, tendo uma expansão em toda sua periferia, já os outros corpos-de-prova não apresentaram nenhuma avaria, Figura 59.



**Figura 59 – Imagem dos corpos-de-prova após o último ciclo de ataque químico (a) ácido clorídrico (b) ácido nítrico (c) ácido sulfúrico.**

A principal causa da degradação dos cristais hidratados de cimento é o pH da solução onde o material está exposto e os íons envolvidos. O material cimentício, quando em contato com uma solução de ácido sulfúrico, tem seus cristais dissolvidos e assim ocorre maior degradação.

O pH das soluções antes da imersão dos corpos de prova foram determinadas através de um pHmetro, onde para a solução de ácido clorídrico e nítrico o pH foi de 0,73 já o ácido sulfúrico apresentou o pH de 0,66.

Os corpos-de-prova submetidos ao ciclo de ataque químico em ácido sulfúrico apresentaram visualmente uma diferença na deterioração. Observa-se esta diferença na Figura 61, que mostra a lixiviação dos compostos hidratados na camada periférica, após o ensaio de resistência à tração.



**Figura 60 – Visualização interna dos corpos-de-prova submetidos a ataque químico em ácido sulfúrico.**

#### **4.3.4 Absorção de água por sucção capilar**

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias, com 6 amostras em períodos de 10, 60, 240 e 1440 minutos.

Para a realização do ensaio foi necessária a preparação das amostras, com a secagem em estufa a temperatura de 60°C até atingir a constância de massa. Após os CPR foram envoltos com uma fita plástica com uma borracha fechando sua parte superior, Figura 61.



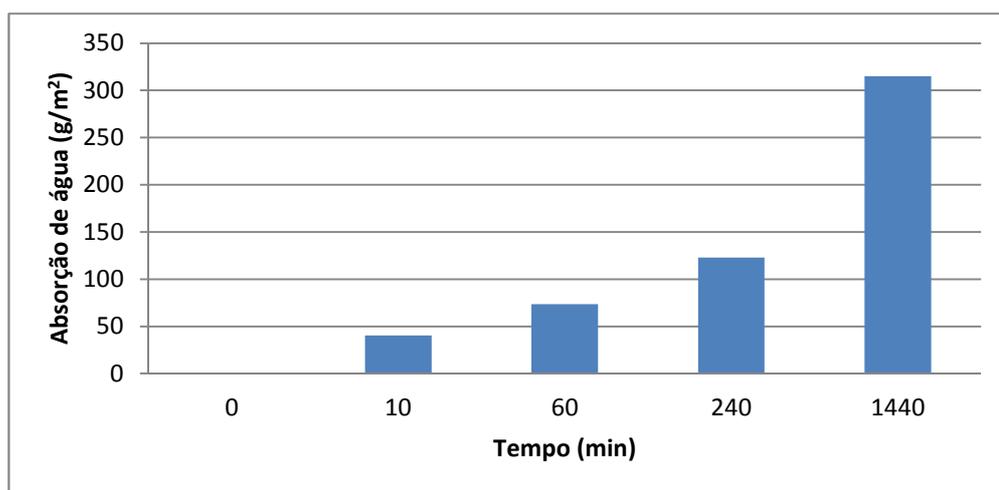
**Figura 61 – Ensaio de absorção capilar.**

Os corpos-de-prova foram pesados e colocados em contato com a água, para que o tempo de permanência fosse igual. A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos para os diferentes períodos de leitura.

**Tabela 21 – Resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade.**

Absorção de água por capilaridade ( $\text{g/m}^2$ )					
Cp's	Áreas	Tempo (min)			
		10	60	240	1440
1	0,0019	36,84	52,63	100,00	273,68
2	0,0019	31,58	73,68	142,11	278,95
3	0,0019	15,79	52,63	63,16	294,74
4	0,0019	57,89	100,00	184,21	436,84
5	0,0019	52,63	84,21	152,63	373,68
6	0,0019	47,37	78,95	94,74	236,84
<b>Médias (<math>\text{g/m}^2</math>)</b>		<b>40,35</b>	<b>73,68</b>	<b>122,81</b>	<b>315,79</b>
<b>Desvio padrão</b>		<b>15,49</b>	<b>18,53</b>	<b>44,49</b>	<b>74,58</b>
<b>Coefficiente de variação (%)</b>		<b>38</b>	<b>25</b>	<b>36</b>	<b>23</b>

A absorção de água por sucção capilar encontrada no CPR apresentou uma grande variação, porém o resultado encontrado é inferior se comparado com um concreto convencional onde o valor médio para 72 horas é de  $1270 \text{ g/m}^2$  e em concretos de alto desempenho de  $840 \text{ g/m}^2$  (FRIZZO, 2001). Como era esperado, houve um aumento da absorção em função do tempo, a Figura 62 apresenta esta evolução, mostrando que a absorção por sucção capilar não é linear.



**Figura 62 – Resultados da absorção por sucção capilar em função do tempo.**

Ao analisar a Figura 62, pode-se concluir que a absorção de água por sucção capilar aumenta conforme o tempo, em um período de 1440 minutos, o que equivale a um dia. Não foi avaliada a absorção de água para um período maior, mas a tendência é de que esta

absorção teria um pequeno aumento até se estabilizar. Esta avaliação fica como premissa para trabalhos futuros.

#### **4.3.5 Estudo piloto 1: Microtomografia 3D**

Para a verificação da distribuição interna das fibras, foi realizado um estudo piloto, através de microtomografia 3D, em uma amostra retirada aleatoriamente de um corpo-de-prova prismático desenvolvido na terceira etapa deste trabalho, com dimensões de 22 mm de diâmetro e 30 mm de altura.

A microtomografia foi realizada no instituto tecnológico em ensaios e segurança funcional ITT FUSE da Unisinos. O ensaio foi realizado no laboratório de caracterização eletroeletrônica em um tomógrafo que realiza imagens de raio-x em tamanho real.

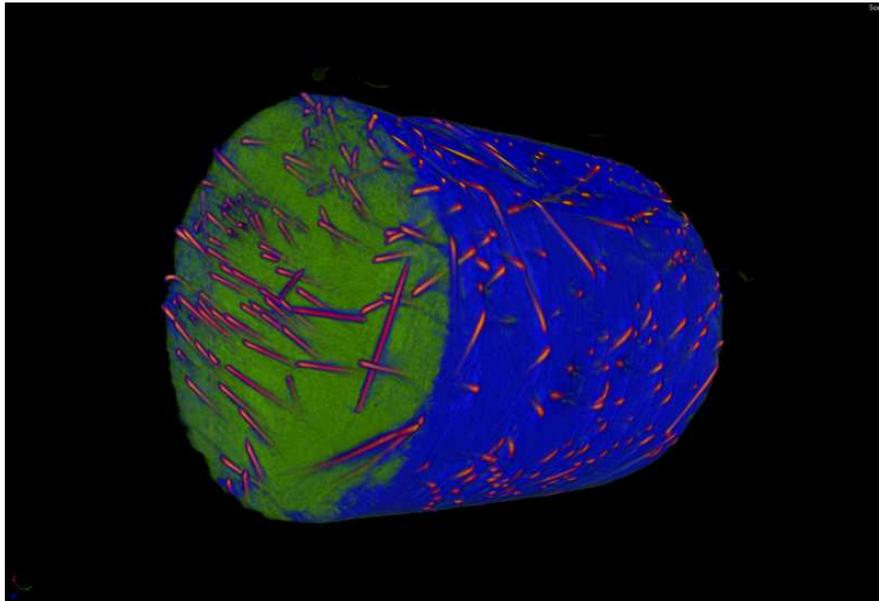
Com auxílio desta ferramenta de análise não destrutiva foi possível investigar a distribuição das fibras dentro da mistura, e identificar a existência de falhas de concretagem ou vazios na mistura.

Esta técnica não necessita de uma árdua preparação da amostra, apenas a amostra deve obedecer à dimensão máxima que o equipamento comporta, Figura 63.



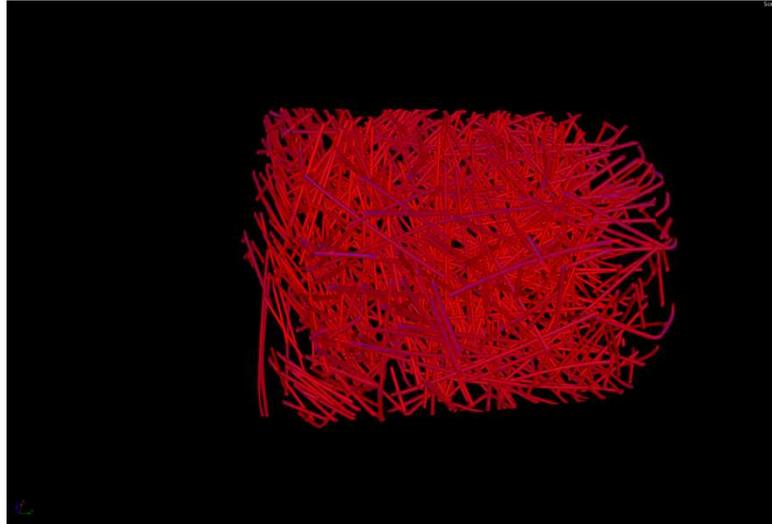
**Figura 63 – Corpo-de-prova utilizado para ensaio da microtomografia 3D.**

As imagens geradas pelo equipamento são trabalhadas e possibilitam a visualização de variações de tons pela diferença de densidade de cada material presente na mistura. O equipamento permite que sejam colocadas cores para diferentes densidades de materiais, gerando imagem que mostra a distribuição aleatória das fibras dentro da mistura, Figura 64.



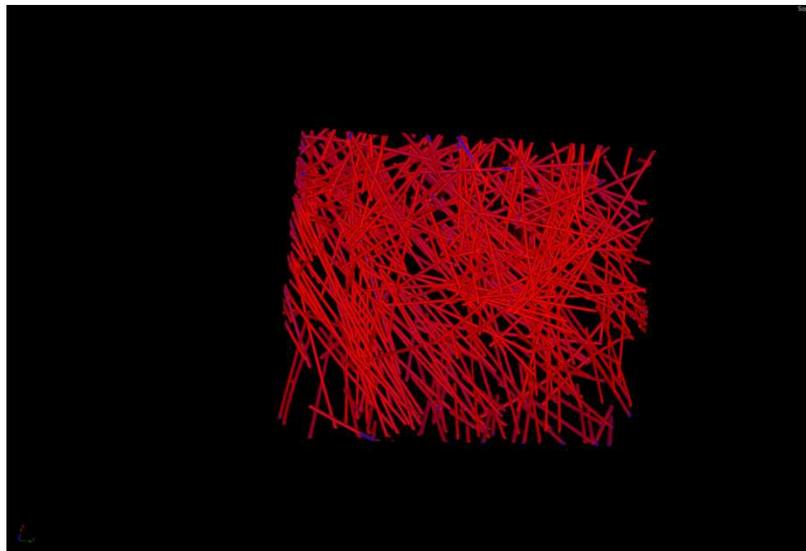
**Figura 64 – Imagem periférica do corpo-de-prova em microtomografia 3D.**

Com a obtenção das imagens de raio-x é possível a elaboração de imagens com apenas os materiais de uma mesma densidade, como as fibras de aço e o concreto. As fibras de polipropileno não puderam ser visualizadas nesta técnica, devido a sua baixa densidade. As fibras de aço foram visualizadas com exatidão. A Figura 65 apresenta a distribuição das fibras.



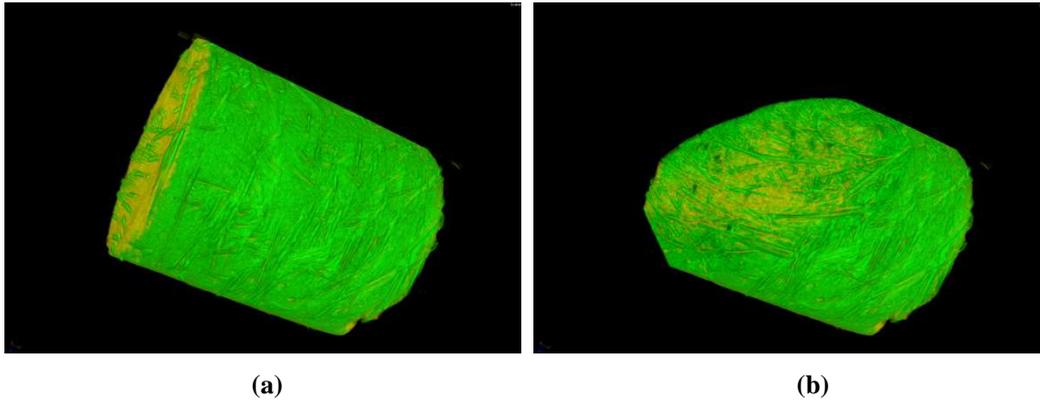
**Figura 65 – Distribuição das fibras de aço dentro da mistura.**

Analisando a imagem gerada da distribuição das fibras é possível notar a grande concentração de fibras dentro da mistura, porém esta concentração é devido a sobreposição dos elementos. Esta técnica permite que a imagem possa ser gerada em qualquer ponto da amostra; a Figura 66 apresenta um corte parcial da imagem mostrando a concentração de fibras e a aleatoriedade das fibras.



**Figura 66 – Distribuição das fibras em um corte parcial da imagem.**

Realizando uma imagem do material sem as fibras metálicas, é possível notar que a mistura apresenta a inexistência de macro poros tanto na sua periferia quanto no seu interior, [Figura 67](#).



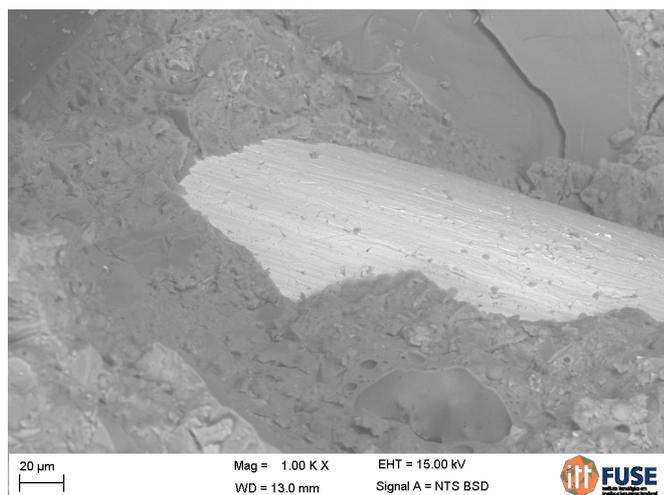
**Figura 67 – Imagem de micro tomografia 3D com apenas a matriz cimentícia.**

#### **4.3.6 Estudo piloto 2: Microscopia Eletrônica de Varredura**

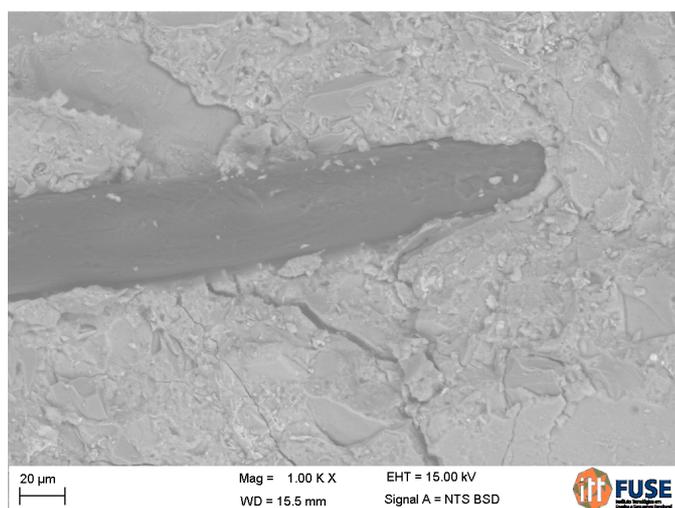
A microestrutura de uma amostra do CPR com substituição de 30% de cimento por cinza volante e mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente, foi observada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), no instituto tecnológico em ensaios e segurança funcional ITT FUSE da Unisinos. O instituto dispõe de um MEV da marca ZEISS com analisador químico EDS, o qual possibilita gerar imagens com resolução de até 3 nm com magnificação de 700.000x e energia de medição de 30 kV, podendo operar em baixo e alto vácuo.

A amostra utilizada neste ensaio foi a mesma da micro tomografia 3D, porém esta foi fraturada para que fosse possível a visualização da ligação das fibras com a matriz, eventuais poros internos e a formação de cristais hidratados de cimento. A amostra foi metalizada para que fosse possível uma melhor visualização dos compostos gerados na hidratação. O ensaio foi observado em baixo e alto vácuo, onde a ligação das fibras foi observada em baixo vácuo e a investigação da existência de cristais hidratados foi realizada em alto vácuo.

As imagens geradas mostram que a ligação das fibras, tanto as de aço como as de polipropileno na matriz não apresentam falhas. A Figura 68 e a Figura 69 mostram a ligação de uma fibra de aço e de polipropileno, respectivamente.



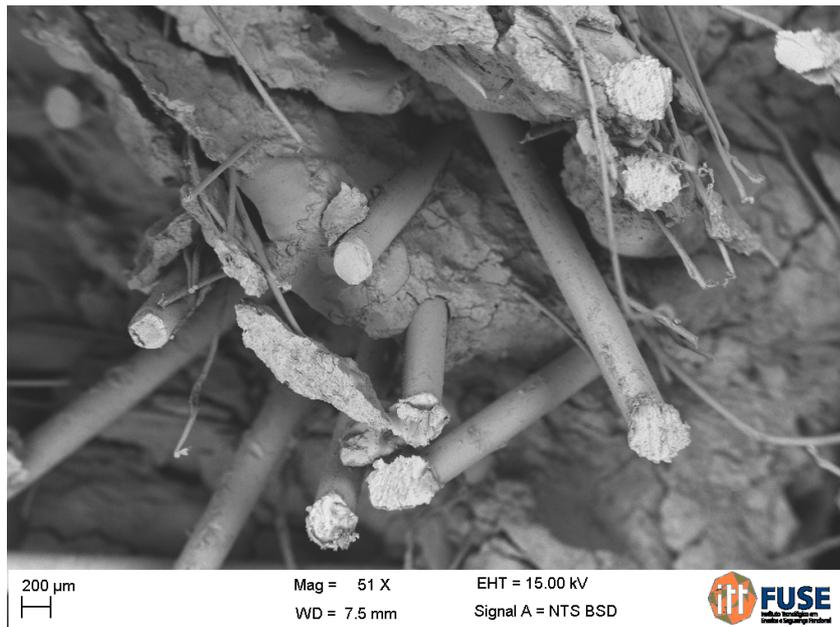
**Figura 68 – Imagem de MEV da ligação da fibra de aço com a matriz.**



**Figura 69 Imagem de MEV da ligação da fibra de polipropileno com a matriz.**

A amostra utilizada para gerar estas imagens sofreu uma fratura, como observa-se na Figura 69. Pode ser notado que a ligação das fibras na matriz não apresenta falhas, as fibras são totalmente envoltas pela matriz.

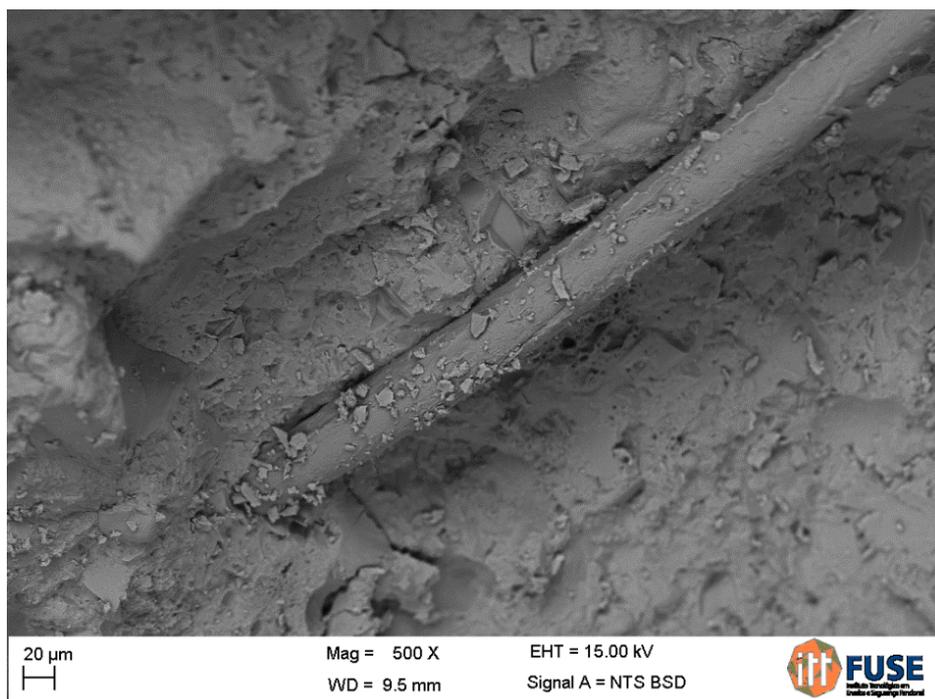
Ainda na microscopia eletrônica de varredura foi possível visualizar um trecho da amostra onde a distribuição das duas fibras pode ser vista, Figura 70.



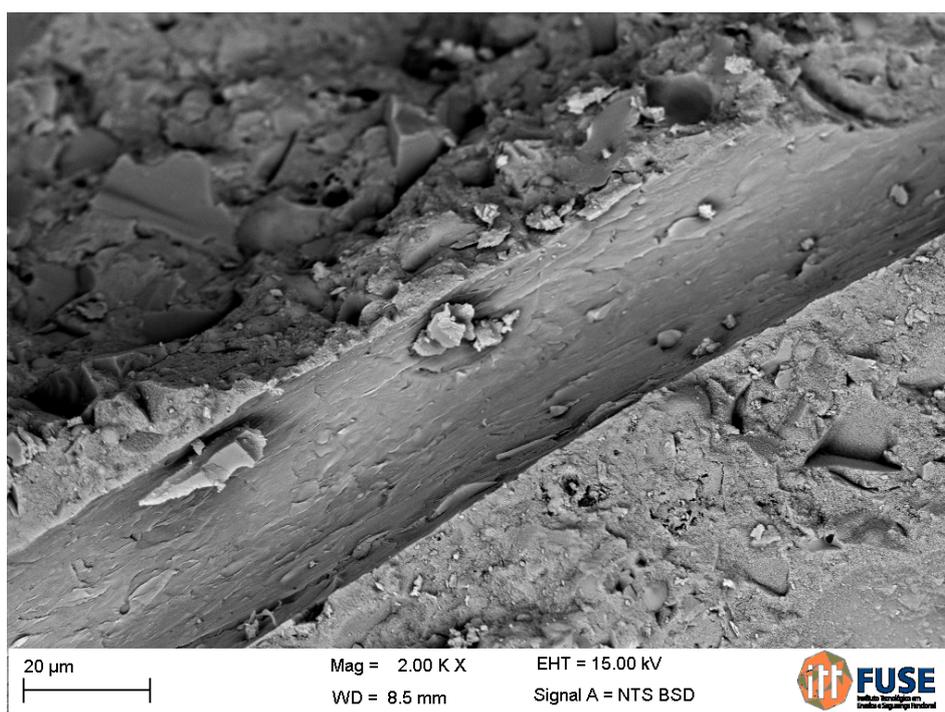
**Figura 70 – Imagem de MEV da distribuição das fibras em um trecho da amostra.**

Com auxílio da Figura 70 pode-se observar a diferença da espessura das duas fibras utilizadas na pesquisa, além da visualização da distribuição das fibras dentro da mistura. Esta diferença de espessuras fica bem nítida em visão microscópica, com isso é possível afirmar que a fibra de aço utilizada é a macrofibra e a de polipropileno a microfibra. Esta hibridização faz com que as microfibras retardam o surgimento das microfissuras enquanto as macrofibras atuam na pós fissuração, impedindo o seu prolongamento.

A visualização dos cristais hidratados formados pela hidratação do cimento é possível em regiões de baixa densidade, na interface pasta/agregado. Se o material analisado apresentar regiões com alta densidade a visualização dos cristais hidratados é mais difícil. A visualização dos cristais hidratados no composto analisado não foi possível, as imagens geradas apresentavam características de uma massa densa mesmo em regiões de interface com as fibras Figura 71.



**Figura 71 – Imagem de MEV da massa densa sem visualização dos cristais hidratados.**



**Figura 72 – Imagem de MEV sulco deixado pela fibra arrancada na fratura do corpo-de-prova.**

A pressão confinante aplicada no material ainda no estado fresco elimina os vazios presentes. A Figura 72 mostra o sulco onde a fibra de aço estava inserida, pode ser percebido que as fibras estavam bem envoltas com o compósito.

## 5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi estudada a substituição parcial do cimento por cinza volante e a mistura híbrida de fibras em sete teores diferentes em concretos de pós reativos. As propriedades avaliadas neste estudo foram a trabalhabilidade do CPR com os diferentes materiais, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, explorando a tenacidade e módulo de elasticidade, e a durabilidade, avaliando o CPR em ensaio de ataque químico e permeabilidade. A pesquisa foi dividida em três etapas distintas e subsequentes, onde o resultado de cada etapa forneceu subsídios para a realização da etapa seguinte.

Com base em todos os resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir, para os materiais e métodos usados nesta pesquisa, que:

- A substituição de 30% de cimento por cinza volante em concretos de pós reativos melhorou o desempenho mecânico e a sustentabilidade do material;
- A utilização de uma mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno contribuiu para o aumento da resistência à tração na flexão com adição de 3% de fibras em relação ao volume, sendo os melhores resultados obtidos para uma mistura composta por 80% fibras de aço e 20% de polipropileno;
- A trabalhabilidade do CPR com fibras, medida pelo espalhamento se reduz quando comparada ao CPR sem a adição de fibras;
- O CPR com substituição de 30% de cimento por cinza volante e a incorporação de uma mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente, apresenta módulo de elasticidade na flexão de 70 GPa;
- Dentre os teores das misturas dos dois tipos de fibras, que apresentou maior tenacidade foi a com 80% de fibras de aço e 20% de polipropileno;
- As resistências à compressão e tração na flexão do CPR com 30% de substituição parcial do cimento por cinza volante e com mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente, aumenta com o passar do tempo, com acréscimo pronunciado até a idade de 14 dias, após esta idade a resistência se mantém estável até os 56 dias.

Já a resistência à tração aumenta com o tempo e cresce gradativamente até a idade de 56 dias;

- O CPR se mostrou muito resistente ao ataque dos ácidos clorídrico e nítrico, para as quais a perda de massa e volume apresentaram valores baixos. O ataque químico com ácido sulfúrico no CPR apresentou grande perda de volume, massa e resistência à tração na flexão;
- A técnica de microtomografia 3D se mostrou muito eficiente para a análise da dispersão e das fibras de aço dentro da mistura;

O CPR desenvolvido neste estudo mostra-se um produto promissor e com grande potencial de desenvolvimento em indústrias de pré-moldados. A cinza volante utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa, além de proporcionar um benefício para o desempenho do material, a incorporação deste coproduto no CPR diminui a quantidade de cinza volante descartada no meio ambiente.

O CPR desenvolvido apresentou baixo consumo de cimento, e com elevado desempenho mecânico, mostrando o elevado potencial de desenvolvimento deste material na indústria. Perpetrando assim um desenvolvimento de um CPR com menor impacto ambiental.

A utilização de uma mistura híbrida de fibras proporciona ao material um aumento na tenacidade do CPR. O custo das fibras de aço, utilizadas nesta pesquisa, é maior se comparado com as fibras de polipropileno. Com a mistura destas duas fibras, nas proporções apresentadas, além de contribuir com o aumento do desempenho mecânico do material, acaba proporcionando uma representativa diminuição do custo do CPR.

## **5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com os resultados obtidos nesta pesquisa, algumas considerações podem ser ponderadas e servem como sugestões para trabalhos futuros. As sugestões são:

- Avaliação da mistura híbrida de fibras de aço e fibras de PVA, onde estas são mais resistentes do que as de polipropileno;
- Avaliar a variação ao longo do tempo da absorção capilar do material;

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-JAWAD, Y. A.; ABDULLAH, W. S. Design of maximum density aggregate grading. **Construction and Building Materials**, dez. 2002. v. 16, n. 8, p. 495–508. . Acesso em: 7 ago. 2013.

AİTCIN, P. . The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, maio. 2003. v. 25, n. 4-5, p. 409–420. . Acesso em: 15 ago. 2013.

AİTCIN, P. C. **High-performance concrete**. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1998.

AİTCIN, P. C. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. 2000. n. 30, p. 1349–1359. . Acesso em: 20 jul. 2013.

APPOLONI, C. *et al.* Caracterização de materiais cerâmicos através da microtomografia computadorizada 3D. 2007. v. 1.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**, dez. 2004. v. 37, n. 10, p. 707–716. . Acesso em: 30 maio. 2013.

BANTHIA, N.; NANDAKUMAR, N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, jan. 2003. v. 25, n. 1, p. 3–9. . Acesso em: 22 ago. 2013.

BARR, B. *et al.* Toughness Measurement - the Need to Think Again. 1996. v. 18, n. 4, p. 221–301.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, mar. 2001. v. 15, n. 2-3, p. 93–103. . Acesso em: 15 ago. 2013.

BATOZ, J. F.; BEHLOUL, M. **UHPFRC development on the last two decades: an overview**. In: FIB. **Anais...** Disponível em: <[http://www.ductal-lafarge.com/SLib/17\\_Belhoul.pdf](http://www.ductal-lafarge.com/SLib/17_Belhoul.pdf)>. Acesso em: 6 jun. 2013.

BEHLOUL, M. *et al.* **Ductal® Pont du Diable footbridge, France**. France: CRC Press, 2008.

BEHLOUL, M.; LEE, K. C. Ductal Seonyu footbridge. 2003. v. 4, n. 4, p. 7. . Acesso em: 6 jul. 2013.

CAMPS, J. P.; LAPLANCHE, A.; RIM, K. A. Corrosion of concrete by sequestering agents of detergents. 2003. p. 55/65.

CAVILL, B.; REBENTROST, M.; PERRY, V. Ductal - An Ultra-High Performance Material for Resistance to Blasts and Impacts. 2006. p. 10. . Acesso em: 6 jul. 2013.

CHAN, Y.-W.; CHU, S.-H. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, jul. 2004. v. 34, n. 7, p. 1167–1172. . Acesso em: 5 jun. 2013.

CHEN, B.; LIU, J. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. **Cement and Concrete Research**, maio. 2005. v. 35, n. 5, p. 913–917. . Acesso em: 30 maio. 2013.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). **Cement and Concrete Research**, out. 1995. v. 25, n. 7, p. 1491–1500. . Acesso em: 7 ago. 2013.

COPPOLA, L. *et al.* The influence of materials on the performance of reactive powder concrete. 1996. p. 502–513. . Acesso em: 20 ago. 2013.

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Concrete Having High Workability. **Procedia Engineering**, jan. 2011. v. 14, p. 814–820. . Acesso em: 30 maio. 2013.

DING, Y. *et al.* Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature. **Construction and Building Materials**, jul. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181100198X>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

EL DEBS, M. K.; NAAMAN, A. E. Bending behavior of mortar reinforced with steel meshes and polymeric fibers. **Cement and Concrete Composites**, jan. 1995. v. 17, n. 4, p. 327–338. . Acesso em: 15 ago. 2013.

FRIZZO, B. T. **Influência do Teor e da Finura de Pozolanas na Permeabilidade ao Oxigênio e na Absorção Capilar do Concreto**. Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

GORNINSKI, J. P.; MOLIN, D. C. C. DAL; KAZMIERCZAK, C. S. Strength degradation of polymer concrete in acidic environments. **Cement and Concrete Composites**, set. 2007. v. 29, n. 8, p. 637–645. . Acesso em: 9 nov. 2013.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ÖZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, out. 2010. v. 24, n. 10, p. 1878–1887. . Acesso em: 6 jul. 2013.

HABEL, K.; GAUVREAU, P. Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC) to impact and static loading. **Cement and Concrete Composites**, nov. 2008. v. 30, n. 10, p. 938–946. . Acesso em: 15 ago. 2013.

HARTMANN, C. *et al.* Aditivos Químicos para concretos e cimentos. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. G.C. Isaia. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

IPEK, M. *et al.* Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase. **Construction and Building Materials**, jan. 2011. v. 25, n. 1, p. 61–68. . Acesso em: 5 jun. 2013.

JOHNSTON, C. D. Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters. maio. 1992. v. 25, p. 191–200. . Acesso em: 13 out. 2013.

MACHADO, A. C. *et al.* Investigação 3D da distribuição de fibras de aço em concreto reforçado por microtomografia de raios X. [S.l.], out. 2013.

MACHADO, A. C.; LIMA, I.; LOPES, R. T. Effect of 3d computed microtomography resolution on reservoir rocks. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.12.029i>>.

MAGALHÃES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno.** Belo Horizonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2007.

MANGULKAR, M. N.; JAMAKAR, S. S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. maio. 2013. p. 143–148. . Acesso em: 8 maio. 2013.

MATTE, V.; MORANVILLE, M. Durability of Reactive Powder Composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. 9 jul. 1998. n. 21, p. 1–9. . Acesso em: 6 jul. 2013.

MEDEIROS, M. H.; ANDRADE, J. J.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** G.C. Isaia. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

MEDEIROS, M. H. F. DE *et al.* Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Rem: Revista Escola de Minas**, mar. 2013. v. 66, n. 1, p. 59–65. . Acesso em: 22 ago. 2013.

MEHTA, P. K. HIGH-PERFORMANCE , HIGH-VOLUME FLY ASH CONCRETE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 2004. . Acesso em: 14 ago. 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. . **Concreto microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** G.C. Isaia. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

MOLIN, D. C. C. DAL; OLIVEIRA, A. P. M.; KULAKOWSKI, M. P. ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (MICROSSÍLICA) FRENTE AO ATAQUE DE AGENTES AGRESSIVOS PARA EMPREGO EM PISOS ESPECIAIS. 2009. . Acesso em: 13 out. 2013.

NASSIF, H. H.; NAJM, H.; SUKSAWANG, N. Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. **Cement and Concrete Composites**, jul. 2005. v. 27, n. 6, p. 661–670. . Acesso em: 15 ago. 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology.** Harlow, England; New York: Prentice Hall, 2010.

NILI, M.; SALEHI, A. M. Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, nov. 2010. v. 24, n. 11, p. 2108–2116. . Acesso em: 31 maio. 2013.

NOUMOWE, A. N.; SIDDIQUE, R.; DEBICKI, G. Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C). **Construction and Building Materials**, maio. 2009. v. 23, n. 5, p. 1855–1861. . Acesso em: 14 ago. 2013.

OSTERTAG, C. .; BLUNT, J. Hybrid fiber reinforced concrete for use in bridge approach slabs motivation for using hyfrc in bridge approach slabs. 2007. p. 415–422.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, out. 1995. v. 25, n. 7, p. 1501–1511. . Acesso em: 3 ago. 2013.

ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, fev. 1996. v. 8, n. 1, p. 1–6. . Acesso em: 3 ago. 2013.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica**, dez. 2004. v. 50, n. 316, p. 345–354. . Acesso em: 5 ago. 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Auto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. G.C. Isaia. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

VILLARES, A. M. O. **INFLUENCIA DA LARGURA DO CORPO-DE-PROVA NA MEDIDA DA TENACIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2001.

WARNOCK, R. **SHORT-TERM AND TIME-DEPENDENT FLEXURAL BEHAVIOUR OF STEEL-FIBRE REINFORCED REACTIVE POWDER CONCRETE BEAMS**. Australia: UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES SCHOOL OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2005.

YAZICI, H. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. **Building and Environment**, maio. 2007. v. 42, n. 5, p. 2083–2089. . Acesso em: 7 ago. 2013.

YAZICI, H.; DENIZ, E.; BARADAN, B. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, maio. 2013. v. 42, p. 53–63. . Acesso em: 7 ago. 2013.

YİĞİTER, H. *et al.* Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). **Composites Part B: Engineering**, dez. 2012. v. 43, n. 8, p. 2907–2914. . Acesso em: 31 maio. 2013.

YUNSHENG, Z. *et al.* Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors. **Cement and Concrete Composites**, out. 2008. v. 30, n. 9, p. 831–838. . Acesso em: 31 maio. 2013.

ZHENG, Z. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**, 1995. v. 20, n. 2, p. 185–210. . Acesso em: 15 ago. 2013.

