

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

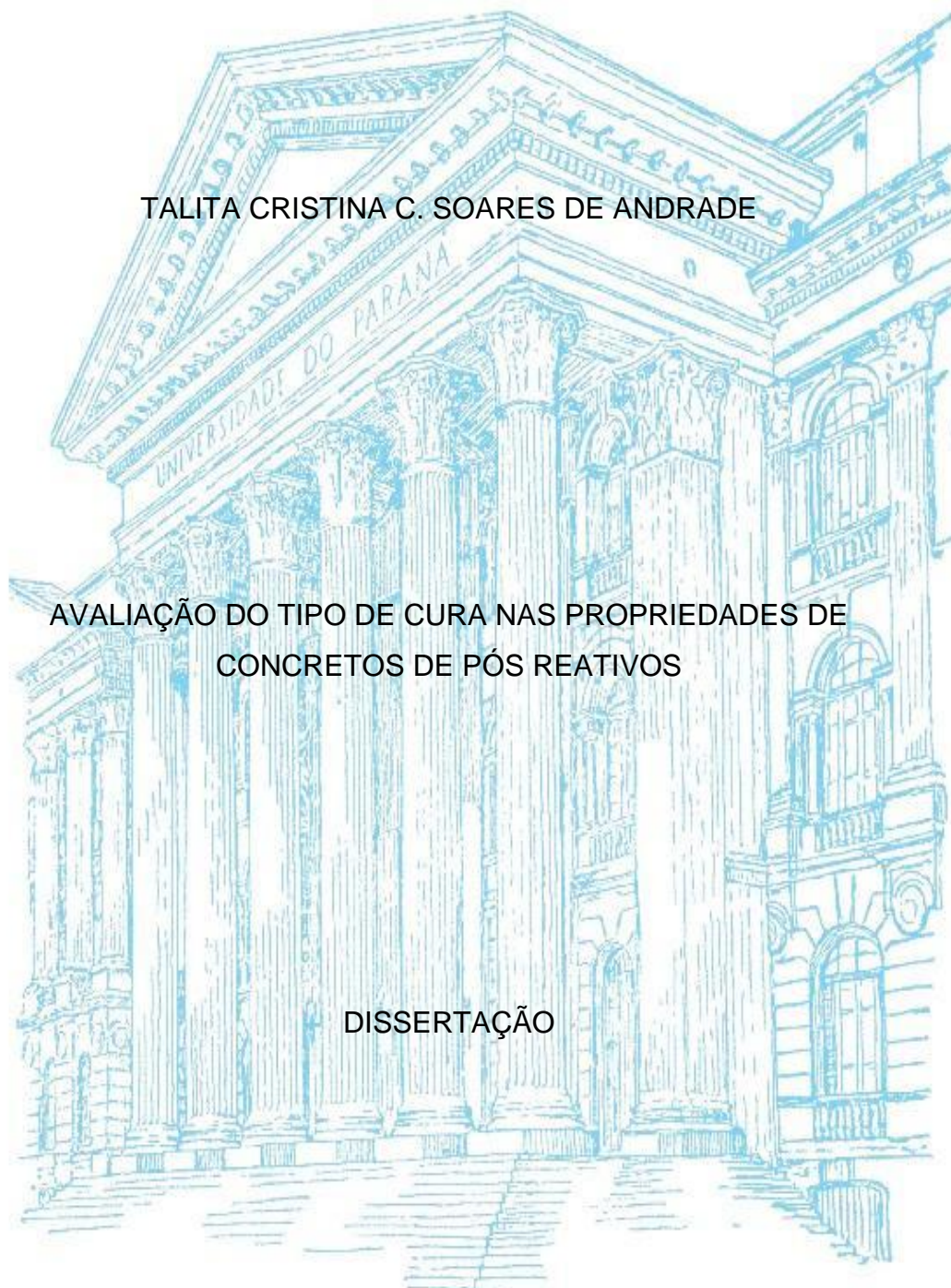
TALITA CRISTINA C. SOARES DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DO TIPO DE CURA NAS PROPRIEDADES DE  
CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2015



TALITA CRISTINA C. SOARES DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DO TIPO DE CURA NAS PROPRIEDADES DE  
CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nayara Soares Klein

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2015

---

A553a      Andrade, Talita Cristina C. Soares de  
Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos/  
Talita Cristina C. Soares de Andrade. – Curitiba, 2015.  
102 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Nayara Soares Klein – Co-orientador: Wellington Mazer.  
Bibliografia: p. 84-92.

1. Concreto. 2. Processo de endurecimento superficial. 3. Autoclaves. 4.  
Partículas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Klein, Nayara Soares. III.  
Mazer, Wellington. IV. Título.

CDD: 624.1834

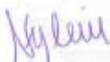
---

**TERMO DE APROVAÇÃO**

TALITA CRISTINA C. SOARES DE ANDRADE

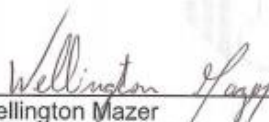
**AVALIAÇÃO DO TIPO DE CURA NAS PROPRIEDADES DE  
CONCRETOS DE PÓS REATIVOS**

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



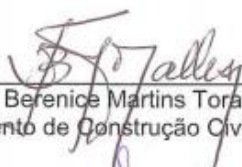
---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Nayara Soares Klein  
Departamento de Construção Civil, UFPR, Curitiba-PR.



---

Prof. Dr. Wellington Mazer  
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR, Curitiba-PR.



---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Benenice Martins Toralles  
Departamento de Construção Civil, UEL, Londrina -PR.



---

Prof. Dr. José Marques Filho  
Departamento de Construção Civil, UFPR, Curitiba-PR.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Nayara Soares Klein, pelos ensinamentos, contribuições, dedicação, pelo incentivo ao término do mestrado e principalmente pela compreensão quanto a minha situação de mãe, esposa e profissional durante o mestrado.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Wellington Mazer, por todo apoio, ensinamentos, dedicação e confiança ao longo de mais uma etapa de minha formação técnica, que além de coorientar do meu trabalho, é um amigo em muitos momentos de conversa, e com quem pude aprender muito sobre a experiência de docência.

Aos professores avaliadores do exame de qualificação e de defesa da dissertação, pelas contribuições apresentadas, e em especial ao Prof. Dr. José Marques Filho, a quem tenho grande respeito e admiração, agradeço por terem feito parte dessa história.

À minha família, pelo apoio, compreensão e amor, pelos diversos sacrifícios suportados, e por sempre acreditarem em minha capacidade e torcerem pelo alcance dos meus objetivos.

Ao meu marido Tiago Clementin de Andrade pelo carinho, compreensão e por ser o grande propulsor do meu ingresso ao mestrado, agradeço pelo estímulo e confiança no meu potencial.

Ao meu bem maior, minha filha Helena Soares de Andrade, a quem dedico esta dissertação, de maneira muito especial, pois ela me acompanhou de dentro do ventre em várias etapas, inclusive durante grande parte da campanha experimental, foi minha força e meu estímulo em momentos difíceis e minha maior alegria na vida.

Meu agradecimento aos colegas do mestrado, pela convivência e aprendizado e agradeço também aos amigos pessoais, pelo incentivo e amizade.

Aos técnicos de laboratório da UTFPR, Gustavo e Felipe, da UFPR, Ricardo e Douglas, e à equipe do LAMIR pela contribuição na execução dos ensaios e pela obtenção das curvas granulométricas dos cimentos e adições minerais.

A empresa Companhia de Cimentos Itambé que gentilmente forneceu todo o cimento utilizado nesta pesquisa.

Aos meus alunos do CEEP, SENAI e FACEAR pelo respeito ao meu trabalho, convivência e experiência adquirida como coordenadora de curso e docente.

ANDRADE, T. C. S. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

## RESUMO

Os concretos de pós reativos (CPR) têm como característica a baixa porosidade e mínimos defeitos microestruturais, de forma que apresentam elevadas resistências mecânicas e durabilidade. A composição do CPR, assim como a escolha do tipo de cura, são de suma importância para que as características desejadas para o material sejam alcançadas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a influência de três diferentes tipos de cura nas propriedades de CPRs, em estado fresco e endurecido. Os CPRs estudados foram produzidos com dois tipos de cimento Portland (cimento CP IV e CP V-ARI), com e sem a adição de fibras plásticas. As curas estudadas foram: cura úmida, cura térmica a 90 °C e cura em autoclave sob temperatura de 150 °C e pressão de 150 kPa (tendo sido utilizadas três variações nos tempos de aplicação de pressão e aumento de temperatura). As propriedades do concreto avaliadas foram: massa específica, consistência, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e permeabilidade ao ar. A dosagem dos concretos foi feita com base em técnicas de empacotamento de partículas. A partir dos resultados obtidos, observou-se que a cura térmica à 90 °C foi a que resultou nas maiores resistências à compressão, superando os 115 MPa, aos 7 dias. Estes valores são ainda baixos, considerando resistências tipicamente encontradas para CPR. Quanto à cura autoclave, os valores foram inferiores aos apresentados pelos demais tipos de cura, o que mostrou-se inesperado. A justificativa para o fato centra-se nas limitações do equipamento utilizado, assim como no próprio processo de autoclave adotado no estudo, em que os corpos de prova foram submetidos à cura ainda em estado fresco. Isso pode ter colaborado para a penetração de água em excesso no interior da massa de concreto, gerando, conseqüentemente, aumento de porosidade. Os concretos estudados apresentaram resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão elevadas, de modo que os resultados obtidos foram todos superiores, ou muito próximos, a 15 MPa. Por fim, verificou-se que os CPRs apresentaram baixa permeabilidade ao ar, o que ressalta a elevada compacidade do material. Isto responde ao elevado consumo de cimento adotado, ao uso de adições minerais, assim como à aplicação de técnicas de empacotamento de partículas na dosagem.

**Palavras-chave:** Concreto de pós reativos. CPR. Cura térmica. Cura autoclave. Empacotamento de partículas.

ANDRADE, T. C. S. **Evaluation of the type of cure in the reactive powder concrete properties.** Dissertation (Master degree in Construction Engineering), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

### ABSTRACT

The reactive powder concretes (RPC) have the characteristic of low porosity and minimal microstructural defects. As a result, they present high mechanical strength and durability. The composition of the RPC, as well as the type of curing used, are very important in order to achieve the desired characteristics for the material. Therefore, the aim of this study is to analyse the influence of three different types of curing in the properties of RPCs, at the fresh and hardened states. The RPCs studied were produced with two types of Portland cement (cement CP IV and CP V-ARI), with and without the incorporation of plastic fibres. The curing types studied were: wet curing, thermal curing at 90 °C and autoclave curing at a temperature of 150 °C and pressure of 150 kPa (three methods have been used for increasing pressure and temperature). The concrete properties evaluated were: density, consistency, compressive strength, Brazilian tensile strength, bending tensile strength and air permeability. The concrete mix-design was based on particle packing techniques. The results showed that the thermal curing at 90 °C resulted in higher compressive strengths, surpassing 115 MPa after 7 days. These values are still low considering the strengths typically found for RPC. The mechanical strength from the concretes that underwent the autoclave curing were lower than those presented by the other types of curing, which proved to be unexpected. This is justified by limitations of the equipment used, as well as by the process adopted itself, in which the samples were subjected to curing still at the fresh state. This may have contributed to the penetration of excess water in the concrete mass; thus, increasing porosity. The concretes studied presented high tensile strength, measured by both the Brazilian test and the bending test. The results obtained were all higher than, or very close to 15 MPa. Lastly, it was verified that the RPCs have low air permeability, which emphasizes the high compactness of the material. This responds to the high cement consumption adopted, the use of mineral admixtures, as well as the use of particle packing techniques.

**Keywords:** Reactive powder concrete. RPC. Thermal curing. Autoclave curing. Packing of particles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Passarela de Sherbrooke, Canadá .....	18
Figura 2.2 - Ponte Creek Road, Austrália.....	20
Figura 2.3 - Ponte pré-fabricada em CPR, Wapello .....	21
Figura 2.4 - Vista aérea da construção da estrutura do aeroporto de Haneda, Japão.....	21
Figura 2.5 - Comparação da homogeneidade entre: (a) CAR e (b) CPR.....	23
Figura 2.6 - Gráfico típico obtido no ensaio de densidade de empacotamento de finos .....	30
Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia natural .....	40
Figura 3.2 - Procedimento de mistura: (a) materiais utilizados, (b) aspecto inicial da mistura na argamassadeira e (c) aspecto final da mistura.....	43
Figura 3.3 - Procedimento de compactação da mistura .....	44
Figura 3.4 – Equipamento de autoclave utilizada no ensaio .....	48
Figura 3.5 – Ensaio em estado fresco: (a) massa específica e (b) índice de consistência .	50
Figura 3.6 - Prensa utilizada na realização dos ensaios mecânicos.....	51
Figura 3.7 - Equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade .....	51
Figura 3.8 - Detalhe do ensaio de permeabilidade ao ar: (a) equipamento acoplado ao corpo de prova, e (b) superfície do corpo de prova com silicone, somente nas bordas .....	52
Figura 4.1 - Densidade de empacotamento dos cimentos CP IV e CP V-ARI .....	53
Figura 4.2 - Densidade de empacotamento do pó de quartzo e da sílica ativa .....	55
Figura 4.3 - Densidades de empacotamento: combinações de pó de quartzo e sílica ativa .	57
Figura 4.4 - Densidades de empacotamento: combinações de adições minerais e cimentos .....	58
Figura 4.5 - Massa específica dos concretos .....	61
Figura 4.6 - Índices de consistência dos concretos.....	62
Figura 4.7 - Resistência à compressão axial dos concretos com CP IV sem fibras.....	63
Figura 4.8 - Resistência à compressão axial dos concretos com CP IV com fibras.....	63
Figura 4.9 - Aspecto do topo do corpo de prova curado em autoclave, método 1 .....	65
Figura 4.10 - Aspecto dos corpos de prova curados à autoclave pelo método 1, (a) com adição de fibras e (b) sem adição de fibras .....	66
Figura 4.11 - Resistência a compressão axial de concretos com CP V-ARI sem fibras .....	67
Figura 4.12 - Resistência a compressão axial de concretos com CP V-ARI com fibras .....	68
Figura 4.13 - Resistência à tração de concretos com CP IV .....	70
Figura 4.14 - Resistência à tração de concretos com CP V-ARI .....	72
Figura 4.15 - Resultados da permeabilidade dos concretos com CP IV .....	73
Figura 4.16 - Aspecto dos corpos de prova curados com autoclave método 1 e 2.....	74
Figura 4.17 - Resultados da permeabilidade dos concretos com CP V-ARI.....	74



Figura 4.18 – Relação entre resistência à compressão e permeabilidade ao ar, com fibras	75
Figura 4.19 - Curva de tendência: resistência à compressão axial e permeabilidade ao ar..	76
Figura 4.20 - Curva de tendência: resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão e permeabilidade ao ar.....	77
Figura 4.21 - Curva de tendência: resistências mecânicas e permeabilidade ao ar .....	78
Figura 4.22 - Relação entre resistência à tração e compressão, concretos sem fibras .....	79
Figura 4.23- Relação entre resistência à tração e compressão, concretos com fibras .....	79

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Propriedades do CPR .....	23
Tabela 2.2 - Variação das propriedades do concreto com o aumento do teor de fibras .....	25
Tabela 3.1 - Composição granulométrica da areia natural .....	39
Tabela 3.2 - Especificações do cimento CP IV e CP V-ARI .....	40
Tabela 3.3 - Especificações do pó de quartzo.....	41
Tabela 3.4 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa.....	41
Tabela 3.5 – Diâmetros médios das partículas dos materiais .....	41
Tabela 3.6 - Procedimento de mistura das pastas produzidas .....	42
Tabela 3.7 - Dados técnicos do aditivo .....	44
Tabela 3.8 - Procedimento da mistura do concreto .....	46
Tabela 3.9 - Quantitativo da produção de corpos de prova (CPs).....	47
Tabela 3.10 - Classificação dos concretos pela permeabilidade ao ar .....	52
Tabela 4.1 –Resumo da densidade de empacotamento .....	56
Tabela 4.2 - Dados de entrada para o modelo de Toufar <i>et al.</i> (1976) e Toufar modificado .	56
Tabela 4.3 - Traço do CPR com cimento CP IV .....	60
Tabela 4.4 - Traço do CPR com cimento CP V-ARI.....	60

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2	OBJETIVO.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	CONCRETOS DE PÓS REATIVOS (CPR).....	18
2.1.1	Aplicações.....	18
2.1.2	Composição, características e propriedades.....	22
2.1.3	Dosagem.....	28
2.2	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	29
2.2.1	Determinação da densidade de empacotamento de partículas finas.....	29
2.2.2	Modelos de empacotamento de partículas.....	31
2.3	CURA.....	34
2.3.1	Cura úmida.....	34
2.3.2	Cura térmica.....	35
2.3.3	Cura em autoclave.....	36
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
3.1	MATERIAIS.....	39
3.1.1	Agregado miúdo.....	39
3.1.2	Cimento Portland e adições minerais.....	40
3.1.3	Aditivo superplastificante.....	44
3.1.4	Fibras.....	45
3.2	DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	45
3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	46
3.3.1	Procedimentos de mistura.....	46
3.3.2	Moldagem e adensamento dos corpos de prova.....	46
3.3.3	Cura dos corpos de prova.....	47
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO.....	49
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO.....	50
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
4.1	DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS MATERIAIS FINOS.....	53
4.2	DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	56
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	60
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	62

4.4.1	Resistência à compressão axial .....	62
4.4.2	Resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão .....	70
4.4.3	Permeabilidade ao ar .....	73
4.4.4	Análise das correlações existentes entre as propriedades .....	75
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	81
5.2	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS .....	82
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os concretos de alto desempenho possuem maior densidade devido à redução na quantidade de água de mistura, possibilitada pelo uso de aditivos superplastificantes. Além disso, componentes finos e ultrafinos, como as adições minerais, têm sido adicionados às misturas para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos, aumentando ainda mais a densidade desses materiais e resultando em uma geração de concretos de ultra alto desempenho (SARI e PRAT, 1999).

A especificação deste tipo de concreto em relação aos concretos convencionais está relacionada ao seu desempenho mecânico e durabilidade, assim como à possibilidade de reduzir o peso próprio das estruturas em função da diminuição das seções, principalmente em elementos trabalhando a compressão (TORALLES-CARBONARI *et al.*, 2003).

Nesta classe de concretos, observa-se que a obtenção de maiores resistências mecânicas, e também maior durabilidade, tem como base fatores como a redução da relação água/cimento ( $a/c$ ), que é possível pela utilização de aditivo superplastificante. A adequada distribuição granulométrica dos materiais componentes colabora também para a redução da relação  $a/c$ , já que o aumento da compactação diminui os espaços vazios disponíveis para serem ocupados pela água. A sílica ativa é um exemplo de adição mineral usada em concretos de ultra alto desempenho. Esta adição atua para o aumento da compactação da mistura, preenchendo os espaços deixados pelas partículas de cimento, e apresenta atividade pozolânica, gerando C-S-H secundário, o qual confere maior resistência mecânica ao material (MIRANDA, 2008).

O concreto de pós reativos (CPR) está entre os concretos de ultra alto desempenho. Ele surge na década de 90, inicialmente no cenário internacional, por ser um material extremamente versátil, podendo ser utilizado para substituir estruturas onde o concreto armado tradicional é inviável. Este tipo de tecnologia tem sido utilizada por exemplo, na construção de estruturas leves, cujos elementos são delgados, tabuleiros para pontes, vigas, colunas, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimento de fachada e passarelas. O CPR tem se mostrado, ainda, como uma possibilidade para diversas outras aplicações na construção civil, como: obras hidráulicas e de saneamento, construções para armazenamento de rejeitos radioativos, peças para indústrias mecânicas, ou seja, elementos de concreto que necessitam de elevada resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade (MIRANDA, 2008).

No desenvolvimento de CPRs, as características microestruturais do material são ressaltadas. Ou seja, os valores de resistência à compressão são elevados e verifica-se um aumento notável da durabilidade, o que se deve à sua microestrutura densa. Este fato advém de um elevado consumo de cimento Portland, uma baixa relação a/c, inclusão de sílica ativa como adição mineral, ajuste da granulometria dos finos pela incorporação de fillers e a incorporação de microfibras de aço na composição do concreto (RICHARD e CHEYREZY, 1995; CHAN e CHU, 2004). Desse modo, o uso de técnicas de empacotamento das partículas na dosagem é de fundamental importância para a redução do volume de vazios, gerando uma alta densidade de empacotamento (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Além disso, destaca-se que para que sejam alcançadas resistências à compressão elevadas, acima de 150 MPa, é necessário que seja dada atenção especial à cura do concreto. A cura é definida por Mehta (1999) como o procedimento destinado a permitir que a hidratação do cimento aconteça, consistindo do controle do tempo, temperatura e condições de umidade do concreto, imediatamente após a colocação deste nas formas. Este processo tem como objetivo evitar a perda de água de amassamento da mistura. Os elementos que provocam a evaporação são a temperatura ambiente, o vento e a umidade relativa do ar. Conseqüentemente, a influência é maior quando existe uma combinação destes fatores (BATTAGIN *et al.*, 2010).

Aïtcin (2000) apresenta a cura como o conjunto de medidas que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água da massa de concreto, necessária para a hidratação do cimento. Quando bem realizada, a água é mantida no interior do concreto até que os espaços inicialmente ocupados por esta sejam ocupados pelos produtos da hidratação do cimento, colaborando para a redução da porosidade do concreto e, conseqüentemente, para o aumento da resistência mecânica e durabilidade do material.

Existem diferentes tipos de curas que podem ser aplicadas aos concretos. A mais comum é a cura úmida, que consiste em manter o concreto em ambiente cuja umidade é superior aos 95%, à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C, conforme NBR 5738 (ABNT, 1994). Associado à umidade, pode-se também promover o aumento da temperatura, o que caracteriza a cura térmica, feita em câmaras que mantêm o concreto em temperaturas que variam, normalmente a partir de 30 °C, com atmosfera saturada de vapor. Isto impede a perda de água e acelera a velocidade de ganho de resistência pelo aquecimento, já que a temperatura funciona como um catalisador das reações de hidratação do cimento Portland (LIMA, 2006).

Há também a cura em autoclave, que consiste em manter o concreto confinado, elevando-se tanto a temperatura como a pressão. Este é um processo hidrotérmico, isto é, em que se utiliza-se do vapor d'água para saturar um ambiente hermeticamente fechado, elevando a temperatura interna mediante o aumento de pressão. O endurecimento e desenvolvimento da resistência de concretos, argamassas e outros materiais à base de silicatos de cálcio pode ser acelerado através da cura à vapor sob alta pressão, a cura em autoclave, que acelera o desenvolvimento das reações químicas de hidratação do cimento e atividade pozolânica (MUELLER *et al.*, 2008).

Por fim, ressalta-se que a escolha do tipo de cura empregada em concretos e os cuidados com esta, influenciam a estabilidade volumétrica do material, melhorando seu desempenho mecânico e durabilidade (TERZIAN, 2007).

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito de três diferentes tipos de cura nas propriedades de concretos de pós reativos, em estado fresco e endurecido. Os três tipos de cura estudados consistem em: cura úmida, cura térmica a 90 °C e cura em autoclave sob temperatura de 150 °C e pressão de 150 kPa, tendo sido utilizado três variações nos tempos de aplicação de pressão e aumento de temperatura. Os concretos serão dosados com base em técnicas de empacotamento de partículas e serão utilizados dois tipos de cimento Portland (cimento CP IV e CP V-ARI). Além disso, serão produzidos concretos com e sem a adição de fibras poliméricas.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O uso de CPR vêm sempre associado a um elevado consumo de cimento Portland, que em alguns casos supera os 700 kg/m<sup>3</sup> (WALRAVEN, 1999). Isto apresenta-se como um aspecto negativo no uso deste material, tanto em termos de custo como de sustentabilidade.

No entanto, é importante ressaltar que este problema é contrabalanceado quando se analisam os volumes de concreto necessários ao se desenhar uma estrutura com CPR. A utilização deste tipo de concreto permite executar peças esbeltas e leves, de seções reduzidas, se comparadas ao concreto convencional. Ou seja, o volume de concreto consumido para a produção da estrutura é menor. Dessa maneira, tanto o custo do metro cúbico do CPR, como seu consumo de cimento Portland, não podem ser comparado ao de

concretos convencionais, sem que nesta análise sejam considerados também os volumes necessários para a produção da estrutura (CHRIST, 2011).

Além da redução no volume de concreto consumido para produção das estruturas em CPR, este material apresenta ainda elevada durabilidade, resultado de sua baixíssima porosidade. O baixo custo de manutenção e a elevada vida útil dos elementos estruturais produzidos com este tipo de concreto podem ser apontados, também, como vantagens do uso de CPR em estruturas.

A durabilidade de uma estrutura deve ser avaliada com tanta atenção quanto as propriedades mecânicas e o custo. Estima-se que em países industrialmente desenvolvidos, cerca de 40% do total dos recursos da indústria da construção estão sendo aplicados em reparos e manutenção de estruturas existentes e apenas 60% em novas instalações (METHA e MONTEIRO, 2008). Isso indica a necessidade de se aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas, o que impactará na redução dos custos de manutenção das mesmas.

O fato de o concreto de pós reativos ter uma microestrutura densa, com um sistema de poros descontínuos, colabora para o aumento da durabilidade das estruturas por meio de uma elevada resistência ao ataque de agentes externos. Como exemplo deste fato, pode-se citar que o CPR apresenta comportamento de maior durabilidade quando exposto a ciclos de gelo e degelo, em comparação ao concreto convencional. Além disso, a taxa de carbonatação e resistência à abrasão deste concreto são também superiores às do concreto convencional e até mesmo às de alguns concretos de alto desempenho (VANDERLEI, 2004).

Diante disso, o estudo de CPR se justifica, tanto no que concerne à composição do material, quanto aos processos de cura associados à produção. Ressalta-se, ainda, que o CPR apresenta elevado consumo de cimento e adições minerais, de modo que este concreto está muito suscetível aos efeitos da retração. Este fato reforça a importância de estudos de cura deste material.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao tema de estudo, o objetivo e as justificativas, que ressaltam a importância do tema escolhido.



O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos dos concretos de pós reativos, sobre a influência dos diferentes tipos de cura nas propriedades dos concretos e sobre as técnicas de empacotamento de partículas.

Na sequência, o programa experimental é apresentado no capítulo 3, abrangendo as variáveis do estudo, a descrição dos materiais utilizados, o processo de dosagem e produção dos concretos e a descrição dos tipos de cura empregadas. Os métodos de ensaio para a caracterização dos concretos em estado fresco e endurecido também são apresentados.

Os resultados obtidos durante a pesquisa são mostrados no capítulo 4, acompanhado das devidas análises e discussões.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as considerações finais e conclusões obtidas. Apresenta-se, também, algumas recomendações para trabalhos futuros, a serem desenvolvidos na linha de estudos do presente trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo descreve alguns aspectos dos concretos de pós reativos, tais como características e propriedades, composição, dosagem e durabilidade. Apresenta-se, ainda, os diferentes tipos de cura e seus efeitos em concretos, assim como a base teórica para as técnicas de empacotamento de partículas.

### 2.1 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS (CPR)

O primeiro concreto a usar pós reativos em sua composição foi desenvolvido em meados de 1990 no Canadá, na Universidade de Sherbrooke, pelo professor Pierre-Claude Aïtcin. Em vez de ser feito com agregados miúdos e graúdos, como um concreto convencional, ele foi composto somente por agregados miúdos e pós ultrafinos, daí a definição “pós”, plural de “pó” (CORSINI, 2006).

#### 2.1.1 Aplicações

O CPR tem diversas aplicações na construção, estando, em geral, associado à construção de estruturas leves, cujos elementos são delgados, como tabuleiros para pontes e passarelas, por exemplo. Um exemplo importante da aplicação do CPR é a passarela de Sherbrooke, no Canadá, construída em 1997, com vão de 56 m. Esta é constituída de elementos pré-fabricados de apenas 15 cm de altura, conforme mostra a Figura 2.1. A revitalização de uma ponte rodoviária, também no Canadá, em que o tabuleiro e pavimentação originais foram substituídos por laje com apenas 5 cm de espessura, reduzindo a carga permanente em quase 500 kgf/m<sup>2</sup> também é um exemplo da aplicação de CPR (VANDERLEI, 2004).



Figura 2.1 - Passarela de Sherbrooke, Canadá  
Fonte: Revista de Ciência e Tecnologia (2006)

O CPR vem sendo ainda aplicado em diversos países. São exemplos da utilização de CPR, as Torres Petronas (Malásia), a Ponte de Tsing Ma (Hong Kong), o Trump World Tower (EUA) e a passarela de Seonyu (Coreia do Sul), segundo apresentado por Voo e Foster (2009).

O material tem se mostrado como uma possibilidade, também, para diversas outras aplicações na construção civil, como: obras hidráulicas e de saneamento, construções para armazenamento de rejeitos radioativos, peças para indústrias mecânicas, ou seja, elementos de concreto que necessitam de elevada resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade (MIRANDA, 2008).

Dowd e O'Neil (1996) estudaram bueiros e tubos de esgoto de CPR e algumas vantagens foram observadas, tais como a produção de peças leves, reduzindo o custo com transporte, agilidade na produção dos tubos, menor permeabilidade à água e maior resistência ao ataque de sulfatos e outros produtos químicos. A leveza das peças se deve ao fato de que a espessura da parede dos tubos pode ser significativamente reduzida ao se utilizar CPR, podendo variar de acordo com o diâmetro do tubo, sua finalidade e ambiente de utilização. Isto gera, como consequência, economia no custo do material final. Além disso, as peças leves são de fácil manipulação e de transporte mais barato.

Segundo Torrenti *et al.* (1996), atualmente o armazenamento de rejeitos radioativos é feito em contêiner de aço ou com múltiplas paredes à base de cimento, nos quais os rejeitos são imobilizados pela injeção de concreto ou graute. O autor iniciou um estudo desenvolvendo Contêiner de Alta Integridade (CAI), onde este assume sozinho o papel de barreira de confinamento. O CAI requer o uso de material que exibe excelentes propriedades mecânicas, de confinamento e durabilidade. Estudos utilizando o CPR na preparação do CAI mostraram que o CPR é um bom material para este propósito, pois ele apresenta baixa porosidade, excelentes propriedades mecânicas e agilidade no processo de fabricação do contêiner. O CPR usado no estudo apresentou resultados satisfatórios quanto à permeabilidade de gás e difusão de íons radioativos.

Em 2001, a fabricante Lafarge, na França, adquiriu uma patente do concreto de pós reativos, chamando-o de Ductal. Nele, foram adicionadas fibras e superplastificantes. Conforme demonstrado em estudos, o Ductal tem resistência à compressão de seis a oito vezes maior que o concreto convencional, resistência à flexão dez vezes maior e até cem vezes mais durabilidade (VANDERLEI, 2004).

Aplicações e estudos sobre o concreto Ductal na Austrália e Nova Zelândia foram relatadas por Rebstrost e Wight (2008). Na Austrália, encontra-se a ponte Creek Road, mostrada na Figura 2.2, sendo esta uma ponte que liga estradas secundárias de transporte. É composta por quatro faixas de tráfego e uma de passeio, com extensão de 15 m, composta por 16 vigas pré-moldadas de concreto Ductal, pré-tensionadas. A laje

do tabuleiro tem 170 mm de espessura. Esta ponte foi monitorada durante um ano e os resultados indicaram que o comportamento da ponte quanto a ação das cargas atuantes é adequado. Em 2005, foi emitido uma declaração pelos órgãos responsáveis australianos, dizendo que o concreto Ductal pode ser usado em pontes e estruturas de transporte na Austrália. Posteriormente, foi realizado pela Universidade de NSW (New South Wales, em Sydney), um guia de design e aplicações para o concreto Ductal.



Figura 2.2 - Ponte Creek Road, Austrália

Fonte: Rebentrost e Wight (2008)

Graybeal (2006) descreve a utilização de CPR em um programa de desenvolvimento de pré-fabricados modulares para super estruturas de concreto protendido, para aplicação em pontes rodoviárias nos Estados Unidos. A intenção da utilização desse concreto consiste em combinar maior resistência e durabilidade em pontes pré-fabricadas, que serão posteriormente montadas de forma rápida e eficiente. No sistema de transporte rodoviário americano a maioria das pontes atuais possuem de 20 a 35 m e são compostas de superestruturas e plataformas que estão com design muito antigo e estruturas beirando ao colapso. A substituição destas pontes, provavelmente agravaria o congestionamento do tráfego nas rodovias. Desta forma, o desenvolvimento de componentes modulares pré-fabricados permite a substituição da superestrutura de maneira ágil. Alguns protótipos estão sendo projetados e testados desde 2004, por exemplo, conforme mostra a Figura 2.3.



Figura 2.3 - Ponte pré-fabricada em CPR, Wapello  
Fonte: Graybeal (2006)

Além das estruturas viárias, uma importante aplicação de CPR foi iniciada no ano de 2007 na cidade de Tóquio, no Japão. Trata-se de uma das etapas de ampliação do Aeroporto Internacional de Haneda, conforme apresenta a Figura 2.4. A construção da quarta pista para pouso e aterrissagem de vôos internacionais conta com uma área total de 520 mil m<sup>2</sup>, onde 192 mil m<sup>2</sup> foram confeccionados em forma de placas de CPR que se apoiam sobre pilares de aço. Estes distribuem o carregamento previsto em projeto a uma camada resistente do solo, encontrada a 70 m de profundidade. O projeto precisou de dois anos de estudos preliminares para ser viabilizado e as investigações iniciais consistiram basicamente no entendimento do processo de mistura dos materiais, muito diferente neste tipo de material do que nos concretos convencionais. No totalidade do projeto foram confeccionadas 6.139 placas de (7,8 x 3,6) m, com espessura de 135 mm. A produção média mensal foi de 1.100 m<sup>3</sup> de concreto, totalizando ao final dos serviços pouco mais de 23 mil m<sup>3</sup> de concreto de ultra-alta resistência (RESPLENDINO, 2012).

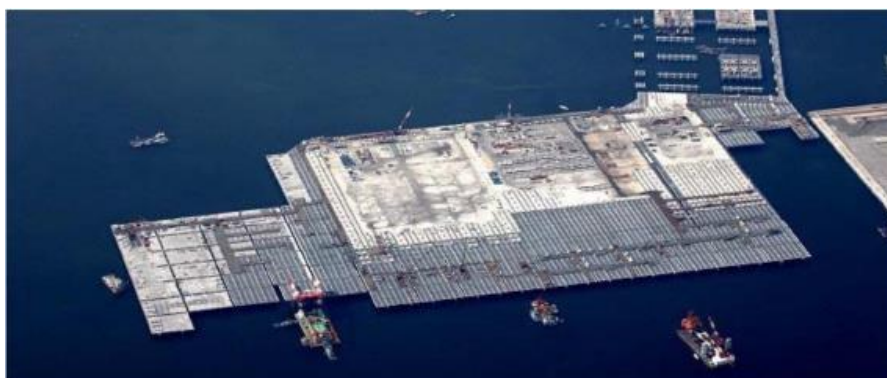


Figura 2.4 - Vista aérea da construção da estrutura do aeroporto de Haneda, Japão  
Fonte: Resplendino (2012)

Segundo Resplendino (2012), a utilização destas placas em concreto possibilitou a redução dos custos da obra, pois reduziu a estrutura metálica de suporte. Além disso, o

alto desempenho alcançado pelo material (capacidade de carga de 600 kN para cada eixo de uma aeronave, quase o dobro da resistência de cálculo de projeto), a baixa taxa de carbonatação, permeabilidade e absorção e uma boa resistência aos danos causados pela cristalização de sais nos poros do concreto, possibilitarão a utilização da estrutura por, no mínimo, 100 anos.

Um último exemplo da aplicação de CPR foi na Escola de Administração de Rotman, Universidade de Toronto, Canadá. Em processo de expansão, a universidade utilizou nas fachadas de um novo edifício, de 150.000 m<sup>2</sup>, elementos em CPR. As paredes externas da construção foram parcialmente revestidas com 350 painéis de concreto Ductal, cinza escuro, de apenas 30 mm de espessura (variando de 0,5 a 1 m de largura por 3,5 a 5,3 m de altura). Em outra face do edifício, mais de 100 painéis de 19 mm de espessura vedam a fachada (RESPLENDINO, 2012).

### 2.1.2 Composição, características e propriedades

Os concretos de pós reativos apresentam microestrutura densa, de modo que este tipo de concreto caracteriza-se por apresentar o mínimo de defeitos, como fissuras ou poros capilares, o que se consegue aumentando a compacidade e a resistência dos materiais constituintes (MING *et al.*, 2007). O aumento da compacidade do CPR é alcançado através de um elevado consumo de cimento, uma baixa relação a/c e o uso de sílica ativa como adição mineral altamente reativa. A granulometria dos materiais finos componentes é ainda ajustada através do uso de fillers, o que colabora ainda mais para a densificação da matriz (RICHARD e CHEYREZY, 1995; CHAN e CHU, 2004).

A eliminação do agregado graúdo do CPR colabora, também, para a homogeneidade e aumento da compacidade do concreto. O uso de um agregado com dimensões menores, o agregado miúdo, produz o aumento da superfície específica do esqueleto granular. Com isso as tensões aplicadas sobre a estrutura são melhores distribuídas, evitando-se uma falha da microestrutura, o que aumenta a resistência mecânica final do material (ISAIA *et al.*, 2011). Na Figura 2.5 é possível observar a diferença de homogeneidade entre um concreto de alto desempenho (CAD) e um CPR, resultado da granulometria dos agregados empregados na produção de tais concretos. Ressalta-se que a eliminação do agregado graúdo do CPR faz com que a zona de transição agregado graúdo/pasta seja suprimida e a relação agregado/matriz seja reduzida.

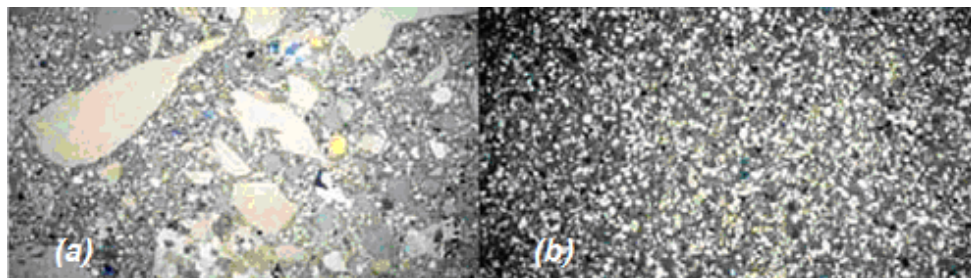


Figura 2.5 - Comparação da homogeneidade entre: (a) CAR e (b) CPR

Fonte: Resplendino (2011)

### Resistência à compressão:

Todos estes aspectos referentes à composição dos CPRs favorecem a resistência mecânica do material, especialmente a resistência à compressão. Ressalta-se que esta é a propriedade mecânica que serve de parâmetro para análise de outras propriedades e qualidade do concreto. Para qualquer desempenho que se deseje obter em um concreto, ocorre um reflexo direto na resistência à compressão, por isso pode-se utilizar esta propriedade para classificar o concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Baseado nisso, o CPR pode ser classificado de acordo com a resistência à compressão. Segundo Richard (1996), o CPR divide-se em CPR200, para aqueles concretos que apresentam a resistência à compressão entre 150 e 230 MPa, e CPR800, para concretos com resistência à compressão entre 500 e 800 MPa. Na Tabela 2.1 são apresentadas as propriedades do CPR, conforme suas classes.

Tabela 2.1 - Propriedades do CPR

Propriedades	CPR200	CPR 800
Resistência à compressão (MPa)	170 a 230	500 a 800
Resistência à tração por flexão (MPa)	30 a 60	45 a 140
Energia de fratura (J/m <sup>2</sup> )	20.000 a 40.000	1.200 a 20.000
Módulo de Elasticidade (GPa)	50 a 60	65 a 75

Fonte: Richard (1996)

Existem vários exemplos na literatura de concretos com resistências à compressão na faixa esperada para o CPR.

Na Alemanha, devido a uma exigência de que alguns postes de comunicação utilizem concretos de resistências elevadas, utilizou-se CPR e foram alcançadas resistências médias em torno de 155 MPa, sob cura térmica a 200°C. O material se mostrou como alternativa à utilização de postes de aço, caros e de difícil manutenção (ADAM e MA, 2012). Segundo os autores, os primeiros resultados satisfatórios foram obtidos após dois anos de pesquisas, com protótipos de tamanho reduzido em colunas de diferentes

diâmetros. Em um segundo momento, os pesquisadores decidiram moldar grandes postes de comunicação, com 26 metros de comprimento, em CPR. A conclusão após os testes realizados foi de que o CPR pode ser usado para confecção deste tipo de elemento pré-moldado em escala industrial, já que foi possível atingir valores de resistência à compressão da ordem de 200 MPa, aplicando-se tratamento térmico e fibras metálicas.

Outra aplicação de CPR desenvolvida na Alemanha trata da utilização deste concreto em equipamentos para a engenharia de fundações especiais, mais especificamente brocas de CPR, substituindo as brocas de aço, comumente utilizado para tal fim. As pontas das brocas, quando feitas de CPR, podem competir com o aço visto que exemplares já foram colocadas em uso, passaram pelos testes de laboratório na solicitação de cisalhamento e também pela utilização real. Trata-se de concretos com resistência superior a 200 MPa, curados em cura térmica à 200°C. Eles avaliam que as brocas de CPR podem ser competitivas no mercado pela sua vantagem econômica, pois são mais baratas de produzir do que brocas de aço (IBUK e BECKHAUS, 2012).

Richard e Cheyreyz (1995) conseguiram obter um CPR de altíssima resistência à compressão, alcançando o valor de 810 MPa, com a aplicação de pressão durante o endurecimento do concreto, cura térmica de 250 °C e incorporação de fibras e agregados de aço ao concreto.

Ressalta-se que para se alcançar estas resistências tão elevadas, os consumos de cimento no concreto são bastante elevados. Em alguns casos, supera-se os 700 kg/m<sup>3</sup> (WALRAVEN, 1999).

Strunge e Deuse (2008) utilizaram o consumo de 609 kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II / A-S 52,5 R. Essa dosagem foi utilizada para a construção do Centro de Aviação Lufthansa, que é caracterizado por colunas, que são cobertas por grandes janelas de vidro. Para efeitos arquitetônicos a exigência foi que todas as colunas deveriam ter seção reduzidas, ou seja, peças mais esbeltas. As resistências mecânicas desse concreto foi de 200 MPa, aos 28 dias.

Scheydt *et al.* (2008) criaram duas dosagens de CPR, com os cimentos CEM II / A-S 52,5 R e CEM I / A-S 42,5, com o consumo de cimento igual a 772 kg/m<sup>3</sup> e 582 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Utilizou-se, também, sílica ativa nas misturas de CPR, em diferentes porcentagens. As misturas foram caracterizadas como auto-adensáveis, com a contribuição do uso de aditivos superplastificantes em ambos os traços. As resistências à compressão aos 28 dias foram próximas aos 210 MPa.

Nas experiências de Lohaus e Ramge (2008) com CPR, foi utilizado o cimento CEM I / A-S 42,5, com consumo de 670 kg/m<sup>3</sup>. Foram feitos testes para a aplicação deste concreto na pavimentação de autopistas na Alemanha. Os valores de resistência à compressão foram próximos a 260 MPa, aos 28 dias.



Resistência à tração e ductilidade:

Apesar da elevada resistência à compressão do CPR, a ductilidade deste concreto apresenta-se baixa se considerado apenas o compósito cerâmico. Para que esta ductilidade seja melhorada são utilizadas fibras de aço na composição do concreto, de módulo de elasticidade elevado. Estas conferem, também, resistência à tração ao CPR. A dosagem das fibras é feita de modo experimental e são utilizadas em percentuais que variam de 1,5 a 5% em relação a massa de cimento (RICHARD e CHEYREZY, 1995; BEHLOUL *et al.*, 1996). Na Tabela 2.2 pode-se observar o aumento da resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão do concreto, conforme aumenta-se o percentual de fibras de aço no CPR.

Tabela 2.2 - Variação das propriedades do concreto com o aumento do teor de fibras

Fibras (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
0,0	208,0	5,1	11,3	40,6
1,0	216,0	7,5	24,0	39,6
2,4	225,0	7,8	36,8	43,0
4,0	225,0	11,4	58,0	43,0

Fonte: Behloul *et al.* (1996)

Outros autores também demonstraram a melhoria da resistência à tração e aumento da ductilidade do CPR devido ao uso de fibras.

Voo *et al.* (2006) comentam que a resistência à tração das fibras de aço utilizadas em concreto convencional é de até 1000 MPa em relação a fratura das fibras, enquanto que as micros fibras de aço usadas em concretos de pós reativos tem resistência à tração em relação a sua fratura acima dos 2000 MPa. Isso garante a alta ductilidade do CPR. Como resultados, têm-se melhores propriedades mecânicas e melhores comportamentos durante as tensões de tração.

Randl *et al.* (2012) demonstram o excelente desempenho do CPR com a adição de fibras metálicas em revestimentos de túneis como, por exemplo, no Túnel Chain Perschling, que liga as cidades austríacas de Sazburg a Viena. Um trecho desta rota foi escolhido como projeto piloto para estudar a viabilidade da utilização do CPR na fabricação dos segmentos pré-moldados, onde normalmente utiliza-se elementos de concreto de 40 a 50 MPa, com 30 cm de espessura. A conclusão do estudo foi de que houve redução na espessura dos segmentos de 30 para 22 cm, ou seja, redução de 25% no volume de concreto a ser utilizado, com uso do CPR. Esta redução se deu devido principalmente ao alto módulo de

elasticidade do concreto estudado. Os autores argumentam ainda, que a taxa de 2,5% de fibras metálicas utilizadas dispensa a utilização de tela de armadura para o combate das diferentes solicitações geradas nas paredes destes túneis. As fibras diminuiriam ainda o efeito *spalling* gerado por um eventual incêndio ocorrido no interior do túnel.

Os autores Ibuk e Beckhaus (2012) criaram pontas de brocas para operações de fundação de obras em CPR e, como ressalva, os pesquisadores afirmam que neste tipo de aplicação as fibras de aço são imprescindíveis para o sucesso da substituição do aço. Segundo eles as fibras impedem o cisalhamento total da broca depois desta atingir seu estado limite, limitando a largura das fissuras.

Vanderlei (2004) mostra que as fibras permitem duplicar a resistência à tração por compressão diametral com a aplicação de até 5% de fibras em relação a massa do cimento. Além disso, as fibras dão maior ductilidade ao material, favorecendo o comportamento pós-pico.

#### Durabilidade:

Os problemas comumente associados à durabilidade de estruturas de concreto estão diretamente ligados à porosidade do material e aos mecanismos de penetração de agentes agressivos no interior dos elementos estruturais. Em geral, quanto maiores forem os fatores que facilitem o ingresso de agentes agressivos, maior e mais rápida será a deterioração do material. Assim, a porosidade (tamanho e distribuição dos poros) é um fator que muito influi na capacidade dos materiais, como o concreto, de suportarem o efeito destrutivo de agentes agressivos (água, oxigênio, dióxido de carbono, cloretos e outros agentes agressivos) (VILELA *et al.*, 1999).

O fato de o concreto de pós reativos apresentar uma microestrutura particularmente densa, com um sistema de poros descontínuos, conduz a uma baixa permeabilidade no material e possibilita que se alcance alta resistência ao ataque de agentes externos (HALIT *et al.*, 2009). A elevada densidade da microestrutura da pasta de cimento hidratada se deve ao elevado consumo de cimento e à incorporação de adições minerais, como a sílica ativa e fillers.

Concretos e argamassas com adições minerais, como a sílica ativa, apresentam maiores resistência e melhores desempenho frente aos ataques agressivos em função de uma menor permeabilidade. De acordo com Wolf (1991), o refinamento da estrutura porosa de concretos e argamassas com sílica ativa e a consequente redução da taxa de transferência de íons agressivos a esses materiais, a redução do teor de hidróxido de cálcio e a menor relação  $\text{CaO/SiO}_2$  dos produtos da reação pozolânica (o que elevaria a incorporação de íons agressivos) são fatores determinantes do melhor desempenho quanto à durabilidade dos concretos e argamassas com sílica ativa.

Alguns estudos podem ser encontrados na literatura, que demonstram o bom desempenho de durabilidade do CPR. De acordo com Graybeal e Tanesi (2006), o tratamento de cura usado em CPRs e a matriz densa, com poucos e pequenos poros descontínuos, leva a maior durabilidade deste em comparação à concretos convencionais. A cura à vapor aumenta o grau de hidratação do cimento, melhora a microestrutura do concreto, e reduz a sua permeabilidade e, desse modo, isso pode aumentar consideravelmente as propriedades de durabilidade do CPR. Como exemplo, tem-se um aumento considerável da resistência à abrasão e diminuição da capacidade penetração de cloretos no concreto.

As brocas feitas de CPR com adição de fibras de aço, desenvolvidas por Ibuk e Beckhaus (2012), podem ser caracterizadas por sua elevada resistência à corrosão. Para os pesquisadores, este aspecto de durabilidade representa uma enorme vantagem para a fabricação dessas brocas. Testes iniciais em campo, na Itália e na Suíça, foram realizados com grande sucesso. Foram feitas estacas escavadas em condições de terreno difícil para perfuração, contendo inclusive alteração de rocha, com um diâmetro de até 620 mm usando brocas em CPR. Após o processo de perfuração, as brocas de concreto ainda estavam funcionais e livres de quaisquer fissuras, devido à resistência do concreto aos agentes agressivos, entre eles os íons cloreto.

O CPR também foi escolhido para ser o material de reparo em um complexo de piscinas cobertas e aquecidas em Amiens, França. Devido ao ataque dos agentes agressivos, as bases de ancoragem dos pilares metálicos que suportam toda a cobertura de vidro do complexo estavam muito deterioradas. Elas foram reforçadas com a proteção proporcionada pelo CPR, apicoando-se os blocos antigos e aumentando-se a seção dos mesmos em 20 cm em todas suas faces. Segundo León (2011), a escolha deste material se deu pela preocupação dos proprietários do clube em não intervir novamente no complexo por um longo período de tempo. Ele foi escolhido, pois a taxa de ataque dos íons cloreto a este tipo de material é muito menor do que a taxa para concretos convencionais.

Quanto ao risco da reação álcali-sílica, pode-se esperar que o CPR seja particularmente resistente em virtude da baixa permeabilidade que limita a mobilidade dos íons, bem como o baixo teor de água, lembrando-se que a presença de água é fundamental para a reação álcali-sílica (VANDERLEI, 2004)

Quanto à resistência ao congelamento e ao degelo, a estrutura da pasta de cimento é tal que há pouquíssima água congelável presente. A porosidade do CPR é identificada pelo baixo volume de poros na pasta hidratada e diâmetro dos poros, menores que 5 nanômetros (DUGAT, 1996).

Alkaysi *et al.* (2016) realizaram testes em corpos de prova de CPR para avaliar a resistência deste material aos ciclos de gelo e degelo, assim como à penetração de íons

cloretos. As principais variáveis experimentais são o cimento e a quantidade de pó de sílica, que varia de 0 a 25% do peso de cimento. Todas as misturas apresentaram ação desprezível quanto a penetração de íons de cloreto e de alta resistência ao gelo e degelo. Acker e Behloul (2004) realizaram estudos semelhantes em CPR e relataram que após 300 ciclos de gelo e degelo, o CPR não demonstrou degradação. Por fim, Pierard *et al.* (2012) relatam que as amostras de CPR, além de alcançarem resistências médias à compressão entre 140 e 260 MPa, também não demonstram degradação após 112 ciclos de gelo e degelo.

O CPR apresenta bons resultados de desempenho em ambientes agressivos quando comparado com o concreto convencional, frente à ação de ciclos de gelo e degelo e quanto à taxa de carbonatação. Além disso, a resistência à abrasão também compara-se favoravelmente com concreto convencional e CAD (DUGAT, 1996).

### 2.1.3 Dosagem

A dosagem é o procedimento através do qual são determinadas as proporções dos materiais constituintes necessários para a produção de concretos, os quais devem atender a determinadas propriedades pré-estabelecidas. Estas propriedades estão, em geral, associadas à trabalhabilidade e consistência do concreto fresco e, em estado endurecido, respondem a requisitos de resistência mecânica e durabilidade.

Constam na literatura, diversos métodos de dosagem para concretos de alta resistência (CAR), destacando-se pela maior difusão no meio acadêmico e profissional o método de Metha e Aitcin (1990). Porém, não foi encontrado na literatura um método específico e bem consolidado para a dosagem dos concretos de pós reativos. Há, no entanto, diretrizes para a composição do material, como já exposto nos itens anteriores.

Alguns princípios para a dosagem de CPR centram-se em: eliminar os agregados graúdos na composição do concreto, otimizar a distribuição granulométrica, através do uso de fillers e incorporar fibras de aço para melhorar a ductilidade do material. Além disso, a dosagem do CPR conta também com um elevado consumo de cimento, uso de sílica ativa, uma baixa relação a/c e aditivo superplastificante à base de policarboxilatos (RICHARD e CHEYREZY, 1995; CHAN e CHU, 2004).

Diante das características e propriedades necessárias ao CPR, devido à sua demanda por uma microestrutura densa e com pouquíssimos defeitos, é possível que o emprego de técnicas de empacotamento de partículas possam ser utilizadas na dosagem deste material. Busca-se fazer uso destas técnicas no presente trabalho para dosar os CPRs estudados. Por isso, no item que segue são apresentadas algumas informações acerca do empacotamento de partículas.

## 2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O empacotamento e partículas consiste em preencher os espaços vazios entre partículas de maior tamanho por partículas de menor tamanho. O espaço entre estas é, então, preenchido por partículas ainda menores e assim sucessivamente (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). Os principais fatores que influenciam o empacotamento de partículas são a distribuição granulométrica das partículas, a forma ou morfologia dos grãos e o método de compactação utilizado (DE LARRARD, 1999).

### 2.2.1 Determinação da densidade de empacotamento de partículas finas

A densidade de empacotamento de um conjunto granular é definida como o volume de sólidos em uma unidade de volume total (DE LARRARD, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2000; FENNIS, 2011). Para os agregados, a densidade de empacotamento é comumente determinada pelo ensaio de massa unitária, segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006), sendo esta igual à diferença entre a unidade e o índice de vazios dos agregados.

No caso das partículas finas, a determinação da densidade de empacotamento não é adequada de se realizar pelo método de empacotamento por via seca, sem a presença de água (método da massa unitária), pois para estas partículas a densidade de empacotamento determinada experimentalmente é muito sensível à compactação aplicada, aos efeitos da água e dos aditivos químicos, os quais não são considerados em métodos por via seca (LI e KWAN, 2014a).

Partículas finas tendem a aglomerar devido à presença das forças de atração de Van der Waals (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Por isso, a presença de água e aditivos químicos influi fortemente na condição de ocupação de espaços destas partículas. Desse modo, é mais adequado o uso de um método de empacotamento por via úmida para a determinação do empacotamento dos finos. Este permite medir a influência da água e utilizar os mesmos aditivos químicos e métodos de compactação que serão usados na produção de concretos, representando a condição real da mistura a que os materiais componentes estarão submetidos durante a produção (LI e KWAN, 2014b).

O método experimental para determinação da densidade de empacotamento de partículas finas, método na condição úmida, foi proposto por Wong e Kwan (2008). Este está baseado na produção de pastas com relações água/sólidos (a/s) variadas, sendo então determinada a massa de um volume conhecido da pasta produzida. Para isso, comumente se utiliza o recipiente para determinação da massa específica de argamassas. Então, através das Equações 2.1 a 2.3 são determinadas a relação de vazios e a concentração de sólidos de cada mistura.

$$V_S = \frac{M}{\rho_w u_w + \sum_{i=1}^n \rho_i R_i} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$u = \frac{V - V_S}{V_S} \quad \text{Equação 2.2}$$

$$\phi = \frac{V_S}{V} \quad \text{Equação 2.3}$$

Em que:

$V_S$ : volume de sólidos;

$M$ : massa de pasta que preenche o molde;

$V$ : volume do molde;

$\rho_w$ : massa específica da água;

$u_w$ : relação a/s, em volume;

$\rho_i$ : massa específica do material  $i$ ;

$R_i$ : volume do material  $i$  em relação ao volume total de sólidos;

$u$ : relação de vazios;

$\phi$ : concentração de sólidos.

A Figura 2.6 mostra um gráfico típico obtido pela realização deste experimento.

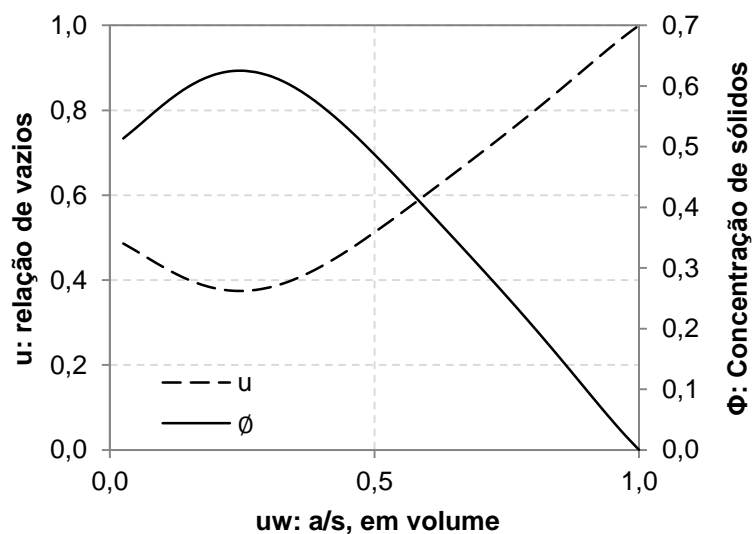


Figura 2.6 - Gráfico típico obtido no ensaio de densidade de empacotamento de finos  
Fonte: Adaptado de Wong e Kwan (2008)

Observa-se pela Figura 2.6 que, quando a relação a/s é elevada, a relação de vazios é também alta, pois as partículas sólidas estão afastadas umas das outras em razão de estarem envoltas por água. Consequentemente, a concentração de sólidos é baixa. Ao diminuir-se a relação a/s, as partículas são aproximadas umas das outras, de modo que a relação de vazios vai diminuindo e a concentração de sólidos vai aumentando progressivamente. Isso ocorre até que se alcance um ponto crítico, onde a relação de vazios é mínima e a concentração de sólidos é máxima. Nesta situação, as partículas estão completamente envoltas por água, porém há já ar entre estas. A partir deste ponto, se a relação a/s for novamente diminuída, não haverá água suficiente para envolver completamente as partículas e estas estarão conectadas por pontes de ligação de água em seus pontos de contato. Devido à tensão superficial da água, as partículas voltam então a se afastar umas das outras, diminuindo a concentração de sólidos e aumentando a relação de vazios da mistura (KLEIN, 2012; LI e KWAN, 2014b).

Através da Figura 2.3, verifica-se que a máxima concentração de sólidos obtida pode ser relacionada à densidade de empacotamento de partículas na condição úmida. Além disso, neste ponto de concentração de sólidos máxima pode-se determinar qual a quantidade mínima de água necessária à mistura para que ocorra a formação de uma pasta homogênea.

### 2.2.2 Modelos de empacotamento de partículas

Os modelos de empacotamento de partículas se dividem em três grupos. Inicialmente, tem-se os modelos que geram como resposta uma distribuição granulométrica otimizada de partículas. Estes foram os primeiros modelos de empacotamento desenvolvidos (FENNIS, 2011). Entre os mais conhecidos estão os modelos de Füller e Thompson, de 1907, Andreasen e Andersen, de 1930, ambos descritos por Fennis (2011). Tem-se também o modelo de Furnas (1931) e Funk e Dinger (1980), este último conhecido como modelo de Alfred.

Todos estes modelos apresentam como ponto em comum o uso de uma equação analítica para se alcançar uma distribuição granulométrica ideal, a qual irá produzir um baixo teor de vazios e, consequentemente, maior compacidade. Inicialmente, considerava-se apenas o diâmetro máximo das partículas como parâmetro para uso do modelo, como mostra a Equação 2.4, para o modelo de Füller e Thompson e Andreasen e Andersen. A diferença na equação para estes dois modelos centra-se no valor do expoente da equação, o valor de  $q$ , que é igual a 0,5 na equação de Füller e Thompson. Andreasen e Andersen não especificaram um valor para o expoente  $q$ , de modo que diferentes valores poderiam ser usados, resultando em variações nas curvas granulométricas obtidas (CASTRO e

PANDOLFELLI, 2009; FENNIS, 2011). Mais tarde, simulações computacionais demonstraram que quando o coeficiente  $q$  assume o valor de 0,37, é possível de se obter a máxima densidade de empacotamento do conjunto granular (FUNK e DINGER, 1980).

Ao longo dos anos, porém, a equação foi sendo modificada, de modo que o diâmetro mínimo do conjunto e a relação entre os diâmetros das classes de grãos foram incorporado às equações, como mostram a Equação 2.5 e 2.6 para os modelos de Furnas (1931) e Funk e Dinger (1980), respectivamente.

$$\frac{\%passa \#}{100} = \left( \frac{d}{D_{Máx}} \right)^q \quad \text{Equação 2.4}$$

$$\frac{\%passa \#}{100} = \frac{r^{\log(d)} - r^{\log(D_{Min})}}{r^{\log(D_{Máx})} - r^{\log(D_{Min})}} \quad \text{Equação 2.5}$$

$$\frac{\%passa \#}{100} = \frac{d^q - D_{Min}^q}{D_{Máx}^q - D_{Min}^q} \quad \text{Equação 2.6}$$

Em que:

$d$ : diâmetro da partícula, igual a abertura da peneira (mm);

$D_{Min}$ : diâmetro mínimo das partículas do conjunto (mm);

$D_{Máx}$ : diâmetro máximo das partículas do conjunto (mm);

$q$ : módulo de distribuição (fator de ajuste);

$r$ : razão entre as quantidades de partículas retidas em 2 peneiras consecutivas.

Comparando-se as densidades de empacotamento obtidas experimentalmente a partir desses primeiros modelos de empacotamento, a eficiência de empacotamento resultante das diversas distribuições de máxima densidade é dada conforme a sequência: Alfred > Andreasen > Furnas (VANDERLEI, 2004).

O segundo grupo de modelos de empacotamento de partículas consiste em modelos analíticos, que geram como resultado um valor de densidade de empacotamento para uma distribuição granulométrica pré-estabelecida. Ou seja, são modelos de empacotamento de partículas baseados em equações matemáticas que prescrevem como as partículas de tamanhos diferentes interagem geometricamente. Esses modelos são usados para calcular a densidade de empacotamento de misturas polidispersas, com base



na distribuição granulométrica do conjunto e na densidade de empacotamento de cada classe individual de tamanho de partículas (FENNIS, 2011).

Neste grupo, estão os modelos propostos por Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado, De Larrard (1999) e Fennis (2011). Como no presente trabalho se utilizará o modelo proposto por Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado para a dosagem do CPR, este modelo será detalhado na sequência.

No modelo de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado são consideradas duas classes de partículas constituídas por esferas de um mesmo diâmetro, monodispersas. A densidade de empacotamento é calculada conforme as Equações 2.7 a 2.11. Para a aplicação do modelo, as misturas contendo n classes de tamanhos de grãos, ou misturas polidispersas, consideram-se as n classes combinadas duas a duas. É importante ressaltar que os procedimentos de cálculo propostos por Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado não são adequados a um número elevado de classes de tamanhos de grãos (FENNIS, 2011).

$$\gamma = \frac{1}{\frac{y_1}{\beta_1} + \frac{y_2}{\beta_2} - y_2 \left( \frac{1}{\beta_2} - 1 \right) k_d k_s} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$k_d = \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753} \quad \text{Para } x < 0,4753 \quad \text{Equação 2.9}$$

$$k_s = 1 - \frac{1 + 4x}{(1 + x)^4} \quad \text{Para } x \geq 0,4753 \quad \text{Equação 2.10}$$

$$x = \frac{y_1 \beta_2}{y_2 \beta_1 (1 - \beta_2)} \quad \text{Equação 2.11}$$

Em que:

$\gamma$ : densidade de empacotamento do conjunto;

$y_i$ : volume relativo das partículas de classe i;

$\beta_i$ : densidade de empacotamento da classe i;

$k_d$ : fator de empacotamento da relação de diâmetros das duas classes de partículas;

$k_s$ : fator de correção de empacotamento sugerido por Toufar modificado;

$d_i$ : diâmetro das partículas de classe i (mm).

## 2.3 CURA

A cura é o conjunto de procedimentos que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento (NEVILLE, 1982). O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição, até que os espaços inicialmente ocupados pela água, sejam ocupados por produtos da hidratação do cimento (ACI 363 R-92, 2001).

Segundo Metha e Monteiro (2008), o termo cura envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, como: tempo, temperatura e umidade. Para Battagin *et al.* (2010) os elementos que provocam a evaporação da água são, a temperatura ambiente, o vento e a umidade relativa do ar., conseqüentemente, a influência é maior, quando existe uma combinação crítica destes fatores.

A perda de água é evitada através da saturação do ambiente, eliminando-se a migração de água do concreto para o meio. Uma vez perdida parte desta água, já há comprometimento da qualidade do produto. A cura influencia no ganho de resistência, diminuição da porosidade, absorção de água e redução da fissuração. Para a eficiência do sistema é necessário que haja homogeneidade da condição de cura no concreto (BATTAGIN *et al.*, 2010).

As condições de cura são extremamente importantes nos produtos com adição de materiais pozolânicos, pois fatores como tempo e temperatura, que são intrínsecos ao processo de cura, quando variam, podem modificar o comportamento mecânico dos materiais (Mallmann, 1996).

### 2.3.1 Cura úmida

A cura pode ser feita de diferentes formas. A cura úmida, mais comumente utilizada, consiste em manter a superfície do concreto coberto com água ou totalmente imersa em água para evitar que ocorra evaporação da água presente no interior do material. De acordo com a NBR 9479 (ABNT, 1994), a câmara úmida é um compartimento isolado e hermeticamente fechado, de dimensões adequadas para estocagem ao ar dos elementos para cura. A câmara deve ser construída de material resistente, não corrosivo, a atmosfera deve ser saturada de água, com umidade não inferior a 95%, de modo a assegurar que as superfícies expostas dos elementos mantenham-se úmidos. A temperatura deve ser mantida constante entre 23 e 25°C.

Paillere *et al.* (1991) destacaram o uso de sílica ativa em concretos e argamassas, principalmente para reduzir sua porosidade. No entanto, esses materiais precisam ser cuidadosamente curados para alcançarem de forma eficaz suas capacidades. Os

concretos com sílica ativa, após cura úmida, obtiveram redução da porosidade total, com relação ao concreto de controle, de 25% a 45%.

### 2.3.2 Cura térmica

A cura térmica, menos comum que a cura úmida, mas também utilizada com frequência, tem como objetivo principal acelerar o processo de cura e obter a resistência mecânica mínima desejada em um curto período de tempo. A cura térmica é muito utilizada, por exemplo, em empresas que trabalham com peças pré-fabricadas, pois a redução do tempo de cura permite acelerar a reutilização das fôrmas, de leitos de protensão e de equipamentos de cura. Isso colabora para a redução das áreas de estocagem e permite colocar peças em serviço em um período de tempo menor ao que se teria se esse utilizasse a cura convencional (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Bardella *et al.* (2006), em estudos com concretos produzidos com sílica ativa, observaram que a substituição do cimento em 10% por sílica ativa, melhorou a resistência à compressão, tanto na cura térmica à 60°C, quanto na cura ao ar. Na cura térmica, as resistências à compressão nas idades iniciais foram maiores e a utilização da sílica ativa aumentou ainda mais esses valores. Foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, sendo observado que o índice de vazios do concreto de referência (sem sílica ativa) foi menor na cura térmica. Porém, nos concretos com sílica ativa, os valores foram similares tanto na cura térmica, quanto ao ar.

Segundo Richard e Cheyrezy (1995), a cura térmica geralmente é benéfica para concretos e argamassas, pois melhora suas propriedades mecânicas. Os autores apontam que a duração do tratamento térmico é também muito importante na hidratação do cimento e na atividade pozolânica. Estes verificaram que sob temperatura de 20 °C, mesmo após 28 dias, a cadeia de hidratos C-S-H é ainda muito pequena e a reação pozolânica se apresenta fraca e lenta. Sob cura térmica a 90 °C, há aumento da atividade pozolânica da sílica ativa e mesmo do pó de quartzo, que é considerado inerte à temperatura ambiente. Acima de 90 °C, observou-se microfissuração nos concretos e argamassas, por compostos semicristalinos muito próximos ou até mesmo pela formação de etringita secundária, tornando assim esses materiais mais frágeis à resistência a compressão.

Foi verificado por Barnett *et al.* (2006) que o desenvolvimento da resistência à compressão, em concretos com escórias de alto-forno ou sílica ativa curados em idades diferentes, estava relacionado com a temperatura de cura. Em idades precoces, a resistência à compressão foi superior a temperaturas mais elevadas, uma vez que a velocidade de reação foi maior. Já nas idades posteriores, a resistência foi menor em alta temperatura de cura. Esse comportamento pode ser explicado devido à formação de fases

hidratadas densas em torno das partículas de cimento que não reagiram, impedindo a hidratação.

### 2.3.3 Cura em autoclave

A cura em autoclave consiste em um processo hidrotérmico, isto é, utiliza-se do vapor d'água para saturar um ambiente hermeticamente fechado, elevando a temperatura interna mediante o aumento de pressão. O endurecimento e desenvolvimento da resistência de concretos, argamassas e outros materiais à base de silicatos de cálcio pode ser acelerado através da cura à vapor sob alta pressão, a cura em autoclave (Mueller *et al.*, 2008).

Para Wang (2014), a finalidade de se autoclavar o corpo de prova é acelerar as reações pozolânicas entre as adições minerais e o hidróxido de cálcio, fazendo com que apareçam novos grupos de silicatos de cálcio hidratado, que forneçam ganhos de resistência.

Walker e Purpon (1973), estudaram os efeitos de cura por autoclavagem em corpos de prova de tijolos sílico-calcários. Através de uma janela fixa na autoclave eles observaram as amostras, com uma proporção de 85% de areia fina e 15% de cal hidratada e cuja objetivo foi verificar a variação da umidade, durante o ciclo de autoclavagem. Ganhos e perdas no peso dos corpos de prova foram observados, devido à condensação e evaporação da água na superfície e interior do corpo de prova, respectivamente. Os autores relataram que houve variação de umidade de um corpo de prova com o tempo de autoclavagem. Levou-se 45 minutos para alcançar a pressão máxima de 16 atm; nesse período houve um ganho de umidade, pois a amostra encontrava-se em uma temperatura menor do que o vapor dentro da autoclave. Ocorrendo a condensação na superfície do corpo de prova, a água penetra no material pelo efeito da capilaridade. Após isso, há um equilíbrio em que a umidade permanece constante mesmo após a descompressão no tempo de 75 minutos, sendo que, no final, a umidade pode alcançar valores menores do que a inicial. A umidade de moldagem variou entre 4 a 14% com intervalos de 1% e as peças foram moldadas com uma pressão de 35 MPa, sendo que o tempo e pressão de autoclavagem foram de 30 minutos e 16 atm, respectivamente.

Nesta mesma linha de pesquisa, Sabbatine (1982) demonstrou que pode-se obter corpos de prova de resistência à compressão aproximadamente iguais, submetendo-os a uma pressão de 1,2 N/mm<sup>2</sup> por 6 horas ou 2 N/mm<sup>2</sup> por 3,6 horas. Já Mallmann (1996) aponta em sua pesquisa com o uso cinzas volantes para fabricação de blocos maciços de concreto celular, curados mediante o processo de autoclave com pressão de 9 atm e tempo de cura de 12 horas, que as resistências médias à compressão foram de 20 MPa e 40 MPa

sob temperaturas entre 150 e 250 °C. Em seus estudos Alhozaimya *et al.* (2013) descrevem a utilização de um aparelho de autoclave para cura de concretos, com pressão de 1000 kPa e 180 °C, permanecendo em funcionamento por quase 3 horas, chegando-se a uma resistência de até 700 MPa. Esta resistência é elevada, o que responde a uma pressão aplicada também bastante elevada.

Yazici *et al.* (2013) relatam em seus estudos com CPR, que as amostras autoclavadas que continham em sua composição apenas cimento Portland tipo I, sem adição mineral, tiveram baixas resistências à compressão. Eles verificaram que as adições minerais, como a sílica ativa, têm suas reações aceleradas sob as condições de autoclavagem. Logo, concretos com adições minerais respondem melhor ao processo de autoclave que concretos produzidos unicamente com cimento Portland. Os autores analisaram um grupo de amostras de CPR, que foram mantidas em água a 20° C, e outro grupo de amostra, que passou pelo processo de autoclave sob diferentes condições de pressão e temperatura: 1 MPa e 180 °C, 2 MPa e 210 °C, e 3 MPa e 235 °C, por períodos de 4, 6, 10, 12 e 24 horas.

Como resultado, Yazici *et al.* (2013) verificaram que o uso de sílica ativa nos CPRs produzidos melhorou os valores de resistência à compressão em até 43% em comparação com o concreto de referência. Esse concreto, com um dia de idade, obteve resistência à compressão de todas as misturas maior do que 60 MPa, chegando a 176 MPa, em 28 dias. Similarmente, o aumento da pressão e temperatura resultou no aumento dos valores de resistência à compressão para todos períodos de exposição. Os valores máximos de resistência à compressão foram obtidos após cerca de 10 h de duração do tempo de cura autoclavada, para todas as misturas. Após isso, houve um decréscimo nas resistências à compressão dos concretos. O efeito negativo de longos períodos de cura autoclave nos CPRs deve-se à possível cristalização excessiva do aglomerante. Houve redução de valores das resistências à compressão dos concretos curados à autoclave, especialmente quando a cura ocorreu por períodos iguais a 24 h de duração.

Nenhuma melhoria significativa foi registrada por Yazici *et al.* (2013) com aumento de pressão do aparelho de autoclave. Por outro lado, a porosidade total dos concretos aumentou com o aumento da pressão da autoclave, especialmente acima de 2 MPa, em todas as misturas. Mesmo assim esses concretos se mostraram menos porosos se comparados com um concreto convencional. Este comportamento também foi relatado na literatura por Mueller *et al.* (2008).

Quanto ao momento de aplicação da pressão e elevação da temperatura, ressalta-se que a aplicação de pressão antes e depois da pega favorecem a eliminação de vazios nos materiais (CHEYREZY, 1999). Richard e Cheyrezy (1995) mencionam a aplicação de pressão no concreto fresco. Esse procedimento diminui o ar incorporado e remove o

excesso de água, podendo chegar a uma diminuição entre 20 a 25% de água, se for aplicada uma pressão de 50 MPa durante 30 minutos.

Por fim, Mallmann (1996) ressalta que a cura em autoclave é pouco utilizado em pesquisas devido aos altos custos de implantação e consumo que este processo exige. As condições de uso são determinadas na prática por considerações econômicas, como por exemplo, a quantidade de energia consumida pelo equipamento, valor deste equipamento e disponibilidade, período de utilização das autoclaves (sem tempo ocioso, por horas consecutivas, por exemplo), picos de produção, entre outros.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente capítulo será apresentado o programa experimental, sendo apresentados os materiais utilizados na pesquisa, com sua devida caracterização, assim como do método usado para a dosagem, produção, cura e caracterização dos concretos de pós reativos.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Agregado miúdo

Foi utilizada para a produção dos concretos, areia quartzosa, encontrada na região de Curitiba-PR, cuja massa específica é igual  $2.550 \text{ kg/m}^3$ , determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Sua massa unitária é igual  $1.363 \text{ kg/m}^3$  e seu índice de vazios é igual a 46,7%, determinados segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 3.1 e a Figura 3.1 apresentam respectivamente a composição granulométrica e a curva granulométrica da areia estudada, determinadas segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A areia natural se localiza dentro da zona utilizável prescrita pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 3.1 - Composição granulométrica da areia natural

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
4,8	4,83	1,6	1,6
2,39	15,45	5,15	6,75
1,19	20,43	6,81	13,56
0,590	61,76	20,58	34,14
0,297	120,47	40,2	74,3
0,149	70,13	23,2	97,68
Fundo	6,93	2,46	100
Total	300	100	---
<b>Módulo de Finura</b>			<b>2,28</b>

Fonte: Autoria própria (2013)

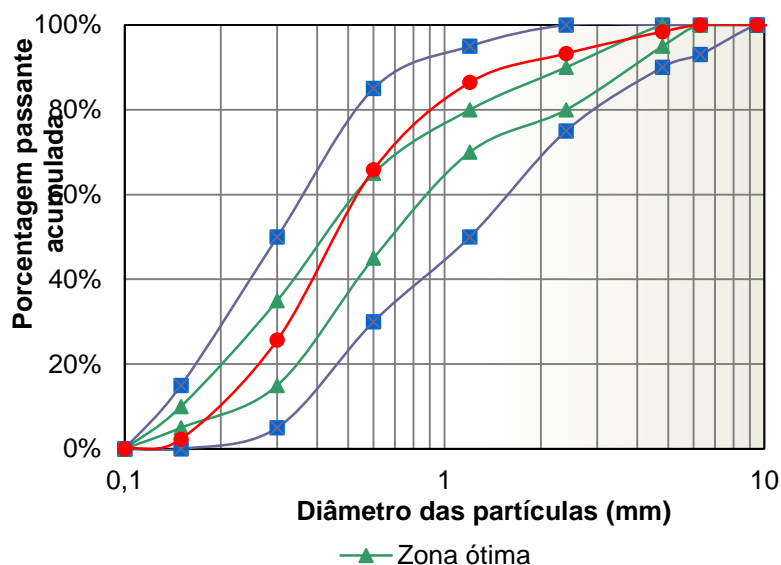


Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia natural  
Fonte: Autoria própria (2013)

### 3.1.2 Cimento Portland e adições minerais

Foram utilizados dois tipos de cimento Portland: CP IV e CP V-ARI. O cimento Portland CP IV tem baixo calor de hidratação devido ao alto teor de pozolanas em sua composição, que varia de 15 a 50%, segundo a norma NBR 5736 (ABNT, 1991). Sua massa específica é de 2.830 kg/m<sup>3</sup>, superfície específica de 4.290 m<sup>2</sup>/kg e resistência à compressão de 45,6 MPa aos 28 dias (valores fornecidos pelo fabricante). O cimento CP V-ARI é um cimento de alta resistência inicial. Sua massa específica é igual a 3.100 kg/m<sup>3</sup>, superfície específica de 4.078 m<sup>2</sup>/kg resistência a compressão de 51,2 MPa aos 28 dias (valores fornecidos pelo fabricante).

Segundo o fabricante do produto, estes cimentos obedecem às normas NBR 5736 (ABNT, 1999) e NBR 5733 (ABNT, 1991) quanto à composição química, para o cimento CP IV e CP V-ARI, respectivamente, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Especificações do cimento CP IV e CP V-ARI

Parâmetros	CP IV	CP V-ARI
Tempo de início de pega (horas: min.)	3:40	02:37
MgO (%)	3,18	4,74
Perda ao fogo (%)	3,34	2,89
Resíduo insolúvel (%)	25,25	0,72
SO <sub>3</sub> (%)	2,49	2,86

Fonte: Fabricante (2013)



Utilizou-se o pó de quartzo e a sílica ativa como adições minerais aos concretos estudados. O pó de quartzo é originário de Araguari-SP e sua massa específica é igual a 2.500 kg/m<sup>3</sup>. As especificações químicas são apresentadas na Tabela 3.3 (valores fornecidos pelo fabricante). A sílica ativa apresenta diâmetro médio da ordem de 0,2 µm e massa específica de 2.222 m<sup>3</sup>/kg (valores fornecidos pelo fabricante). As características físicas e químicas da sílica ativa são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 - Especificações do pó de quartzo

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultado</b>
Umidade (%)	0,020
Perda ao fogo (%)	0,130
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	> 99,000
Teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	< 0,050
Teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	< 0,300
Teor de TiO <sub>2</sub> (%)	< 0,035

Fonte: Fabricante (2013)

Tabela 3.4 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Superfície específica (B.E.T) m <sup>2</sup> /kg	~19000
Formato da partícula	Esférico
Teor de SiO <sub>2</sub> %	> 90

Fonte: Fabricante (2013)

Através da Tabela 3.5 verifica-se os valores correspondentes aos diâmetros médios das partículas de CP V-ARI, sílica ativa e pó de quartzo, os quais foram determinados por granulometria a laser. O valor do diâmetro médio das partículas do cimento CP IV foi obtido diretamente no site do fabricante, visto que não houve tempo hábil para a realização do ensaio de granulometria a laser. Este valor também é apresentado na mesma tabela.

Tabela 3.5 – Diâmetros médios das partículas dos materiais

<b>Material</b>	<b>Diâmetro médio (µm)</b>
Cimento CP IV	6,66
Cimento CP V-ARI	7,97
Pó de quartzo	14,4
Sílica ativa	0,2

Fonte: Autoria própria (2013)

Pode-se observar através da Tabela 3.5 que o diâmetro médio das partículas do CP IV é menor que o diâmetro das partículas do CP V-ARI, o que não era esperado, mesmo sabendo que o cimento CP IV é também bastante fino. Acredita-se que isto justifica-se pelo fato de os diâmetros terem sido obtidos através de fontes diferentes, ou seja, terem sido determinados por equipamentos diferentes, o que pode levar a tais resultados.

Além da caracterização aqui apresentada para os materiais finos, que é comumente realizada em trabalhos de pesquisa, foi feita ainda a caracterização destes materiais quanto à densidade de empacotamento na condição úmida. Para isso, utilizou-se o método experimental proposto por Wong e Kwan (2008), previamente descrito no item 2.2.1. Esse dado é necessário para aplicação do modelo de empacotamento de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado, que será utilizado na dosagem dos traços dos concretos desta pesquisa. Por serem utilizados na dosagem do CPR, os resultados desta caracterização serão apresentados no capítulo 4.

Para a aplicação do método experimental, então, foram produzidas pastas com cada um dos materiais finos e a água, variando-se a relação a/s, buscando reproduzir o gráfico apresentado previamente na Figura 2.3, capítulo 2. Foram construídas, então, quatro curvas, uma para cada material (cimentos CP IV e CP V-ARI, sílica ativa e pó de quartzo). Para a construção de cada curva, foram produzidas cerca de 10 a 15 pastas, com diferentes relações a/s. Os consumos de materiais utilizados na produção de cada uma das pastas são apresentados, em detalhes, no Apêndice A.

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira foi mantida constante para todas as pastas produzidas, conforme Tabela 3.6. Esse procedimento de mistura baseou-se em recomendações dos próprios autores do método. Inicialmente, adicionou-se à argamassadeira 80% da água de amassamento, 50% do cimento e adições (adições minerais e aditivo químico), sendo estes materiais misturados por 3 minutos na velocidade lenta. O material restante foi dividido em quatro partes iguais, sendo adicionados a cada 3 minutos, misturando-se sempre à velocidade lenta.

Tabela 3.6 - Procedimento de mistura das pastas produzidas

<b>Materiais</b>	<b>Tempo</b>	<b>Velocidade</b>
80% Água + 50% Cimento + 50% Adições	3 min	Lenta
12,5% Cimento + 12,5% Adições + (aprox.) 5% Água	3 min	Lenta
12,5% Cimento + 12,5% Adições + (aprox.) 5% Água	3 min	Lenta
12,5% Cimento + 12,5% Adições + (aprox.) 5% Água	3 min	Lenta
12,5% Cimento + 12,5% Adições + (aprox.) 5% Água	3 min	Lenta

Fonte: Adaptado de Wong e Kwan (2008)

A escolha deste método de mistura deve-se ao fato de que, em seus estudos, Wong e Kwan (2008) observaram que ao se adicionar o cimento e a água em uma única vez na argamassadeira, os tempos necessários para mistura e formação de uma pasta homogênea se tornavam muito grandes, especialmente para as pastas com baixas relações *a/s*. Iveson *et al.* (2001) explica que quando o teor de água é baixo, a coesão das partículas dependerá principalmente do processo de expulsão da água de dentro dos poros dos aglomerados, que é em geral, muito lenta. Isso conduz a um maior tempo de mistura necessário para formar a pasta. Por essa razão, quando temos uma mistura de materiais muito finos e água, demora-se mais tempo para expulsar a água que está dentro dos aglomerados, requerendo assim mais energia de mistura e tempo. Para superar este problema, os autores Wong e Kwan (2008) adotaram a estratégia de manter a mistura saturada na maior parte do tempo. A Figura 3.2 ilustra o procedimento de mistura utilizada.

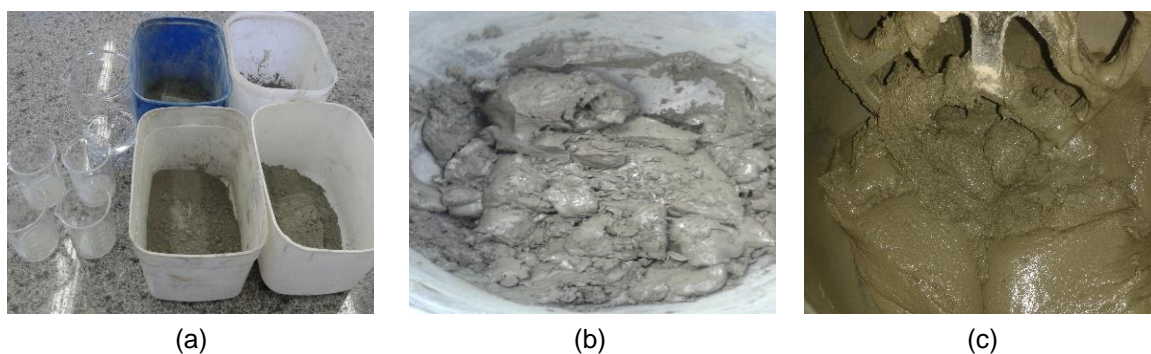


Figura 3.2 - Procedimento de mistura: (a) materiais utilizados, (b) aspecto inicial da mistura na argamassadeira e (c) aspecto final da mistura.

Fonte: Autoria própria (2014)

Conforme a sequência de fotos apresentadas, pode-se observar os materiais fracionados a serem adicionados à argamassadeira, Figura 3.2(a), e a pasta produzida com baixo teor de água, Figura 3.2(b), observa-se que neste último caso, a mistura se encontra bastante seca. A medida que os pós são adicionados e o aditivo químico passa a atuar, a pasta se torna mais fluida, Figura 3.2(c). Conforme se diminui a relação *a/s*, há maior dificuldade da mistura se homogeneizar.

Após a produção, a mistura foi compactada a fim de ser medida a sua densidade. A mistura foi colocada em um recipiente cilíndrico metálico, de volume  $0,942 \text{ dm}^3$ , sendo este preenchido em 3 camadas de alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi compactada com 20 golpes na mesa de espalhamento. Na sequência, nivelou-se, retirando o excesso de material, sendo o conjunto (recipiente + pasta) pesado com auxílio de uma balança eletrônica, como mostra a Figura 3.3.

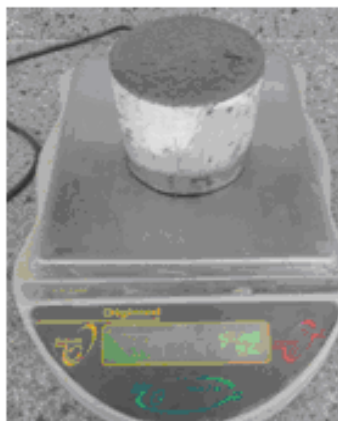


Figura 3.3 - Procedimento de compactação da mistura  
Fonte: Autoria própria (2014)

### 3.1.3 Aditivo superplastificante

Devido à baixa relação água/materiais finos ( $a/finos$ ) necessária à produção dos concretos, utilizou-se um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, o aditivo MC PowerFlow 1110, da MC Bauchemie. Este mesmo aditivo foi utilizado tanto para a determinação da densidade de empacotamento dos materiais finos, como na produção dos CPRs. A Tabela 3.7 apresenta dados técnicos do aditivo (valores fornecidos pelo fabricante).

Tabela 3.7 - Dados técnicos do aditivo

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Densidade kg/m <sup>3</sup>	1.060
Dosagem recomendada (% m. c.)	0,2 a 5
Teor de cloretos %	<0,1
Teor de álcalis %	<1,0

Fonte: Fabricante (2013)

O ponto de saturação do aditivo foi obtido através do ensaio de funil de Marsh, que é baseado na medida do tempo necessário para que um volume fixo de pasta (cimento + água + aditivo químico) escoe através do funil. O ensaio é realizado em pastas produzidas com diferentes teores do aditivo químico. Quanto menor o tempo de escoamento, maior a fluidez do material. A medida que o tempo de escoamento torna-se constante, o ponto de saturação do aditivo foi encontrado. Como resultado do ensaio, obteve-se que o ponto de saturação do aditivo superplastificante é igual a 5%, em relação a massa de cimento.

### 3.1.4 Fibras

Foram utilizadas fibras de polipropileno multifilamentos do tipo Crackstop, da Fitesa, na produção dos CPRs. As fibras apresentam pequeno diâmetro (na ordem de 18  $\mu\text{m}$ ), comprimento de 12 mm, densidade de 0,91 g/cm<sup>3</sup>, módulo de elasticidade de 3.000 MPa (valores fornecidos pelo fabricante).

Conforme foi apresentado no capítulo 2, o CPR é normalmente produzido com microfibras de aço, que têm o objetivo de melhorar a ductilidade do material. Neste trabalho, optou-se por usar microfibras poliméricas que, apesar de apresentarem módulo de elasticidade inferior ao das fibras de aço e contribuírem pouco para melhorar a ductilidade e a resistência à tração dos concretos, poderiam colaborar para minimizar efeitos de retração, que estão presentes em concretos com consumos de cimento elevados, como é o caso do CPR.

## 3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Para a dosagem dos concretos de pós reativos foi utilizado o modelo de empacotamento de partículas proposto por Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado na determinação da composição da matriz cimentícia dos concretos. Esta matriz é composta pelo cimento e duas adições minerais, a sílica ativa e o pó de quartzo, consistindo em uma mistura ternária. Logo, o modelo de empacotamento foi adaptado para considerar 3 classes de tamanhos de grãos, sendo estas combinadas duas a duas. Cada material fino representa uma classe de tamanhos de grãos, sendo cada classe representada pelo valor de seu diâmetro médio.

As equações propostas pelo modelo de empacotamento de partículas foram apresentadas previamente no capítulo 2, Equações 2.7 a 2.11. Como estas equações consideram as combinações de apenas duas classes de tamanho de grãos, primeiramente, foram combinadas as adições minerais, a sílica ativa e o pó de quartzo. O resultado desta combinação indica qual a proporção ideal entre estas matérias, segundo recomendações do modelo. Após obtido este resultado, então, considerou-se a combinação entre as adições minerais na proporção indicada como uma única classe de tamanho de grãos, sendo esta, então, combinada com o cimento.

Os parâmetros de entrada para a aplicação do modelo foram determinados a partir da distribuição granulométrica dos materiais componentes, conforme Tabela 3.5, e da densidade de empacotamento dos materiais finos na condição úmida (cujo procedimento foi descrito no item 3.1.2 e os resultados serão apresentados no item 4.1).

Tendo sido estabelecida a composição da matriz cimentícia, os consumos do aditivo superplastificante e das fibras poliméricas foram estabelecidos com base no ponto de saturação e em recomendações da literatura, respectivamente. Ressalta-se que, para a produção dos concretos, considerou-se o ponto de saturação do aditivo superplastificante em relação à massa total de finos na mistura (cimento + sílica ativa + pó de quartzo). Esta escolha fez-se com base no fato de que as adições minerais também sofrem aglomeração, devido ao sua elevada finura, sendo necessário promover a quebra destes aglomerados. Finalmente, considerou-se que a matriz cimentícia deve ocupar os espaços vazios entre os agregados miúdos, sendo necessário prever um excesso de pasta para produzir a fluidez a mistura.

### 3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

#### 3.3.1 Procedimentos de mistura

A mistura dos materiais componentes para a produção dos CPRs foi feita em argamassadeira, já que não há presença de agregados graúdos nos concretos. A mistura segue a ordem apresentada na Tabela 3.8. A colocação destes materiais na argamassadeira foi feita após a pré-mistura manual dos materiais secos e a diluição do aditivo superplastificante na água de amassamento. O procedimento de mistura foi adaptado de estudos de Feylessoufi *et al.* (1996). Nos traços com fibras, estas foram previamente misturadas aos materiais secos.

Tabela 3.8 - Procedimento da mistura do concreto

<b>Materiais</b>	<b>Tempo</b>	<b>Velocidade</b>
20% dos materiais secos +50% da água + 100% aditivo	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Rápida

Fonte: Autoria própria (2014)

#### 3.3.2 Moldagem e adensamento dos corpos de prova

No presente trabalho produziu-se um total de 780 corpos de prova, conforme mostra a Tabela 3.9. Para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por

compressão diametral e permeabilidade ao ar, foram produzidos corpos de prova cilíndricos de (50 x 100) mm. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram produzidos corpos de prova prismáticos de (40 x 40 x 160) mm.

Tabela 3.9 - Quantitativo da produção de corpos de prova (CPs)

Ensaio Realizados	CPs / idade	Dimensões (mm)	Idade (dias)	Tipo de Cimento	Fibras	Cura	Total
Resistência a compressão	6	50x100	3, 7, 14 e 28				480
Resistência à tração por compressão diametral	6	50x100	28	CP IV e CP V-ARI	Com e sem fibras	Úmida, térmica e autoclave (através de 3 métodos)	120
Resistência à tração na flexão	6	40x40x160	28				120
Permeabilidade ao ar	3	50x100	28				60
<b>Total</b>							<b>780</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

O método de adensamento dos corpos de prova cilíndricos foi o mesmo utilizado por Damas e Soares (2011), que consiste em preencher um terço da forma com concreto, aplicando 20 golpes pela queda livre da forma de uma altura de aproximadamente 15 cm sobre uma superfície que absorve impacto. O procedimento é repetido na segunda e terceira camada de preenchimento. A última camada é preenchida em excesso, sendo colocada sobre o CP uma placa de acrílico para acabamento, com aplicação de pressão sobre o concreto fresco a fim de dar acabamento à superfície e retirar o ar aprisionado excedente do topo do corpo de prova. A desforma dos corpos de prova realiza-se 24 horas após a moldagem.

Os corpos de prova prismáticos e cúbicos também foram moldados em três camadas. A primeira e segunda camadas são preenchidas com concreto até que se atinja um e dois terços da forma metálica, respectivamente, sendo dados 20 golpes por camada, com a ajuda de um soquete metálico. Após preenchimento da última camada de concreto, leva-se o molde até a *flow table* e são dados 20 golpes. A desforma dos corpos de prova realiza-se 24 horas após a moldagem.

### 3.3.3 Cura dos corpos de prova

Para avaliação da influência da cura nas propriedades e características dos CPRs, foram estabelecidos três procedimentos de cura, sendo estes: cura úmida; cura térmica a

90 °C; e cura em autoclave sob temperatura de 150 °C e sob pressão de 150 kPa. Os corpos de prova submetidos à cura úmida foram desmoldados depois de 24 horas e ficaram submersos em água por períodos de 3, 7, 14 e 28 dias, à temperatura ambiente.

Os corpos de prova submetidos à cura térmica, foram desmoldados depois de 24 horas, ficando 3 dias submersos em água à temperatura ambiente. Após isso, foram levados à cura térmica com elevação gradual de temperatura, levou-se em torno de 1 hora até atingir 90 °C, permanecendo assim até completarem 7 dias de idade. Na sequência, o aparelho de banho-maria foi desligado, fazendo com que a temperatura fosse reduzida gradualmente, levando em torno de 3 horas até atingir novamente a temperatura ambiente. Após isso, os corpos de prova ficaram submersos em água à temperatura ambiente até a idade de ensaio (7, 14 e 28 dias), procedimento este já realizado em seus estudos por Soto (2013), onde foi atingido um aumento de resistência à compressão se comparado com pesquisas já realizadas com este tipo de concreto sob a ação da cura térmica. Para os ensaios realizados na idade de 3 dias, o processo sofreu uma pequena alteração, tendo sido os corpos de prova levados à cura térmica logo após a desmoldagem, passadas 24 horas da produção. Estes corpos de prova permaneceram até a ruptura em cura térmica, à 90 °C.

O procedimento de cura em autoclave foi feito sob temperatura de 150 °C e sob pressão de 150 kPa. Os valores de temperatura e pressão iguais a 150 °C e 150 kPa foram estabelecidos com base nas limitações do equipamento disponível para realização dos ensaios, mostrado na Figura 3.4. Foram utilizados três diferentes métodos para submeter o concreto às condições de cura em autoclave.



Figura 3.4 – Equipamento de autoclave utilizada no ensaio

Fonte: Autoria própria (2015)

No primeiro método utilizado (método 1), os corpos de prova foram levados imediatamente após a moldagem para o equipamento de autoclave. Ou seja, o concreto estava ainda em estado fresco e dentro dos moldes. Os corpos de prova foram totalmente



submersos por água. O aparelho foi ligado e, gradualmente, sua temperatura e pressão alcançaram os valores de 150 °C e 150 kPa, levando em torno de 30 minutos para se chegar a esses valores. A temperatura e pressão foram mantidos por 20 minutos. Depois disso, o equipamento foi desligado, levando cerca de 30 minutos para seu resfriamento. Após isso, os corpos de prova foram retirados do equipamento e mantidos à temperatura ambiente. Depois de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e levados à cura submersa até a idade de ensaio. Essa mesma prática foi realizada por Soto (2013).

O segundo método utilizado (método 2) é muito parecido ao primeiro. A diferença, porém, centra-se no fato de que, nesta segunda situação, os corpos de prova (ainda em estado fresco e dentro dos moldes) foram parcialmente cobertos com água, de modo que aproximadamente 1/3 de sua altura ficou sem contato com a água. Ou seja, os corpos de prova não foram totalmente submersos, como no primeiro método. Optou-se por esta variação de procedimento, para verificar se o fato de o concreto estar submerso colabora para a penetração de água no interior do material, sob pressão, já que o concreto está ainda em estado fresco.

No terceiro método estudado (método 3), baseados nas pesquisas de Abdulrahman (2013), os corpos de prova ficaram nos moldes por 24 horas. Depois disso, já no estado endurecido, eles foram levados ao equipamento de autoclave, onde foram totalmente submersos por água. O aparelho foi ligado e gradualmente sua temperatura e pressão alcançaram os valores de 150 °C e 150 kPa, levando em torno de 30 minutos para se chegar a esses valores. A temperatura e pressão foram mantidas por 2 horas. Depois disso, o equipamento foi desligado, levando cerca de 30 minutos para seu resfriamento. Após isso, os corpos de prova foram retirados do equipamento e levados à cura submersa até a idade de ensaio.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO

Os ensaios de caracterização dos CPRs em estado fresco são indicados a continuação. A Figura 3.5 ilustra os ensaios realizados.

- Massa específica, segundo a norma NBR 13278 (ABNT, 2005);
- Índice de consistência, segundo a norma NBR 13276 (ABNT, 2005).

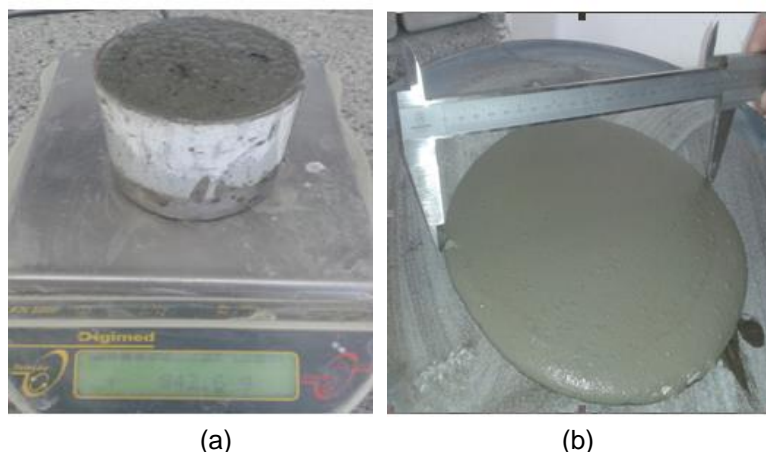


Figura 3.5 – Ensaio em estado fresco: (a) massa específica e (b) índice de consistência  
Fonte: Autoria própria (2015)

Observa-se que para ambos os ensaios de caracterização em estado fresco, foram utilizadas como referência do procedimento experimental adotado normas técnicas de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Isso foi feito, pois o CPR produzido se assemelha a uma argamassa, em termos de composição, já que não apresenta o agregado graúdo. Desse modo, as dimensões dos equipamentos comumente utilizados em ensaios de argamassas são compatíveis com o uso para a caracterização dos CPRs.

Diferentemente do que preconiza a norma NBR 13278 (ABNT, 2005), no presente trabalho, em cada uma das três camadas de preenchimento do molde para o ensaio de massa específica foram aplicados 20 golpes na *flow table*. Após a última camada, o recipiente foi rasado e pesado, sendo registrada sua massa. A norma, por sua vez, preconiza o adensamento com espátula, a qual não foi usada no presente trabalho.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios de caracterização dos CPRs em estado endurecido são indicados a continuação. A Figura 3.6 mostra a prensa utilizada na realização dos ensaios mecânicos. Todo o controle de ensaio, assim como a captação de dados, foi feito com auxílio de um computador.

- Resistência à compressão, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Resistência à tração por compressão diametral, segundo a norma NBR 7222 (ABNT, 2011);
- Resistência à tração na flexão, segundo a norma NBR 12142 (ABNT, 2010);
- Permeabilidade ao ar, segundo Cather *et al.* (1984).



Figura 3.6 - Prensa utilizada na realização dos ensaios mecânicos  
Fonte: Autoria própria (2015)

Devido ao fato de o ensaio de permeabilidade ao ar não ser tão comum quanto os demais ensaios realizados, maiores detalhes deste são apresentados à continuação.

A permeabilidade ao ar foi determinada utilizando o equipamento mostrado na Figura 3.7, o Poroscope™, que utiliza a técnica de sucção de ar superficial sob pressão para determinar a permeabilidade dos concretos.



Figura 3.7 - Equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade  
Fonte: Autoria própria (2015)

O ensaio consiste em conectar ao medidor superficial uma mangueira. Através desta, o ar existente no corpo de prova é succionado, para que se tenha vácuo nos corpos de prova, cuja pressão é de 50 KPa. Com o tempo, esta pressão negativa vai sendo aliviada, pela entrada de ar pelos poros dos corpos de prova, e então é medido o tempo necessário para que a pressão se reduza para 10 KPa. A Figura 3.8 mostra um detalhe da fixação do medidor ao corpo de prova, sendo necessária a aplicação de silicone nas bordas da superfície dos corpos de prova, para evitar perdas de ar.

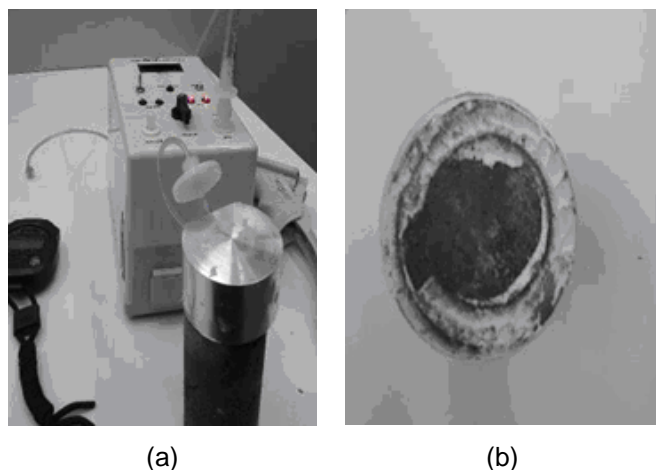


Figura 3.8 - Detalhe do ensaio de permeabilidade ao ar: (a) equipamento acoplado ao corpo de prova, e (b) superfície do corpo de prova com silicone, somente nas bordas

Fonte: Autoria própria (2015)

A Tabela 3.10 mostra os tempos referentes à redução da pressão no interior dos corpos de prova, sendo estes valores recomendados pelo fabricante do equipamento.

Tabela 3.10 - Classificação dos concretos pela permeabilidade ao ar

<b>Categoria</b>	<b>Qualidade</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Tipo do material</b>
0	Indesejável	<30	Poroso
1	Ruim	30-100	Com resistência à compressão de 20 MPa
2	Regular	100-300	Com resistência à compressão de 50 MPa
3	Bom	300-1000	Bem adensado e bem curado
4	Excelente	>1000	Com polímeros

Fonte: Cather *et al.* (1984)

Os valores apresentados na Tabela 3.11 classificam os concretos quanto à qualidade, em relação a permeabilidade ao ar do corpo de prova ensaiado. Segundo Cather *et al.* (1984), a análise é feita de forma que, quando demora-se pouco tempo para o ar sair do corpo de prova, ou seja, sai rapidamente, o concreto possui uma qualidade indesejável (categoria 0, por exemplo). Quando demora-se mais tempo para o ar sair do corpo de prova, tem-se um material com melhor qualidade (categoria 4, por exemplo).

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de densidade de empacotamento dos materiais finos, a dosagem dos concretos estudados, assim como os resultados obtidos na caracterização dos concretos de pós reativos, tanto em estado fresco e como em estado endurecido. As análises e discussões dos resultados obtidos são também apresentadas neste capítulo.

### 4.1 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS MATERIAIS FINOS

A densidade de empacotamento dos materiais finos utilizados neste trabalho foi determinada na condição úmida, segundo método proposto por Wong e Kwan (2008). Detalhes deste método foram previamente apresentados nos itens 2.2.1 e 3.1.2. Ressalta-se que os valores de densidade de empacotamento dos materiais finos são essenciais para a dosagem dos concretos através do modelo de empacotamento de partículas, apresentado no próximo item 4.2.

Os resultados obtidos pela realização dos ensaios com os cimentos CP IV e CP V-ARI são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.1**. Os resultados uméricos para cada pasta produzida (cada ponto apresentado na composição das curvas) são dados no Apêndice A.

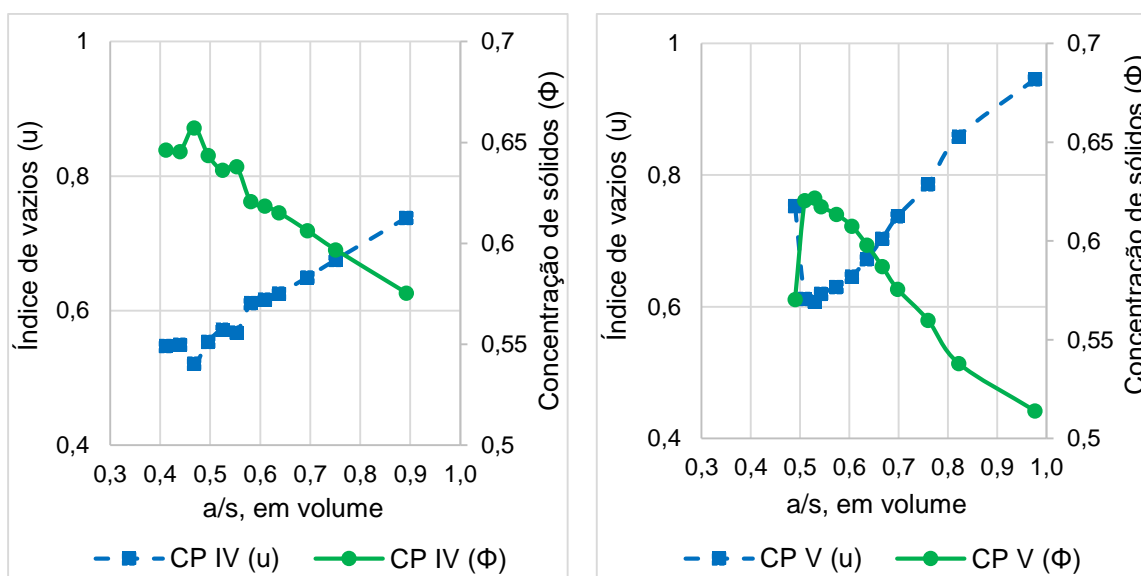


Figura 4.1 - Densidade de empacotamento dos cimentos CP IV e CP V-ARI

Fonte: Autoria própria (2014)

Observa-se pela Figura 4.1 que, nas misturas feitas com os cimentos CP IV e CP V-ARI, as densidades de empacotamento encontradas são iguais a 0,657, Figura 4.1 (a), e 0,625, Figura 4.1 (b). As relações de vazios correspondentes são iguais a 0,521 e 0,603. Para se alcançar esses valores de densidade de empacotamento e relação de vazios, foi necessária uma determinada quantidade de água, que corresponde às relações a/s de 0,47 e 0,51, em volume, respectivamente. Em massa, esse valores de relação a/s correspondem aos valores de 0,15 e 0,14, respectivamente.

Desse modo, verifica-se que o cimento CP IV apresenta densidade de empacotamento levemente superior à do cimento CP V-ARI. Consequentemente, sua relação de vazios é menor. Além disso, o cimento CP V-ARI necessita de mais água para atingir a condição de máxima concentração de sólidos, a qual se associa à densidade de empacotamento na condição úmida. Se analisarmos a demanda de água em termos de relação a/s, em massa, verifica-se que os valores são muito próximos. Esses resultados todos estão associados à finura dos cimentos. Em geral, quanto mais fino o cimento maior a demanda de água e menores os valores de densidade de empacotamento encontrados. Isso, pois há uma maior superfície específica a ser envolta por água, aumentando a demanda desta. Além disso, materiais mais finos sofrem mais fortemente o efeito das forças de atração de van der Waals, de modo que sofrem mais aglomeração. Os espaços vazios entre os aglomerados, então, colaboram para diminuir a densidade de empacotamento.

Assim, os resultados de densidade de empacotamento na condição úmida indicam que o cimento CP V-ARI é levemente mais fino que o cimento CP IV, o que já se espera dos cimentos. Esse resultado não está de acordo com os valores encontrados para os diâmetros médios de cada cimento, conforme apresentado previamente na Tabela 3.5. De qualquer modo, os valores dos diâmetros foram obtidos pelo uso de diferentes equipamentos, o que pode justificar os resultados e as pequenas diferenças obtidas.

A figura 4.2 mostra os mesmos resultados de densidade de empacotamento para as adições minerais estudadas, o pó de quartzo e a sílica ativa. Os resultados numéricos para cada pasta produzida (cada ponto apresentado na composição das curvas) são dados no Apêndice A.

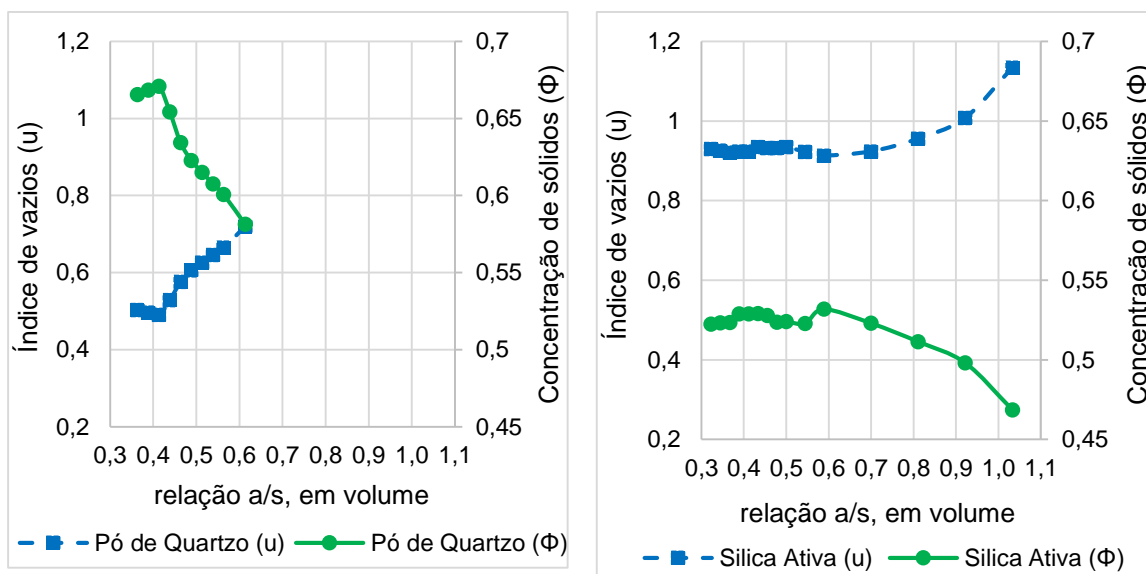


Figura 4.2 - Densidade de empacotamento do pó de quartzo e da sílica ativa  
 Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 4.2 mostra que as densidades de empacotamento encontradas para o pó de quartzo e a sílica ativa são iguais a 0,671, Figura 4.2 (a), e 0,532, Figura 4.2 (b). As relações de vazios correspondentes são iguais a 0,491 e 0,913. Para se alcançar esses valores de densidade de empacotamento e relação de vazios, foi necessária uma determinada quantidade de água, que corresponde às relações a/s de 0,41 e 0,59, em volume, respectivamente. Em massa, esse valores de relação a/s correspondem aos valores de 0,15 e 0,25, respectivamente.

Em uma análise similar à realizada para a Figura 4.1, verifica-se pela Figura 4.2 que a densidade de empacotamento do pó de quartzo é maior que a obtida para a sílica ativa. Como consequência, a relação de vazios da sílica ativa é bem maior que a obtida para o pó de quartzo. Esse fato justifica-se, pois a sílica ativa é muito mais fina que o pó de quartzo, sendo seu diâmetro médio igual a 0,2  $\mu\text{m}$ . O pó de quartzo, por sua vez, apresenta diâmetro médio igual a 14,4  $\mu\text{m}$ , sendo este inclusive maior que os diâmetros apresentados pelos dois cimentos estudados. Naturalmente, então, a densidade de empacotamento do pó de quartzo é maior que a da sílica ativa, e também maior que a dos cimentos, se observados os resultados apresentados na Figura 4.1. Ressalta-se novamente que a finura está associada à densidade de empacotamento, pois quanto mais finos os grãos, maior é a importância das forças de atração de van der Waals, que contribuem para uma maior formação de aglomerados, os quais apresentam vazios em seu interior.

Para finalizar, verifica-se que a sílica ativa demanda uma maior quantidade de água para alcançar a máxima concentração de sólidos, tida como densidade de empacotamento. A demanda de água da sílica ativa é maior que a do pó de quartzo e também maior que a

dos dois cimentos estudados. Isso se deve à sua elevada finura, comparativamente aos demais materiais finos. Logo, sua elevada superfície específica exige um grande volume de água para envolver os grãos.

Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos na determinação da densidade de empacotamento dos materiais finos, na condição úmida.

Tabela 4.1 –Resumo da densidade de empacotamento

<b>Material</b>	<b>Densidade de empacotamento</b>	<b>Relação de vazios</b>	<b>a/s, em volume</b>	<b>a/s, em massa</b>
Cimento CP IV	0,657	0,521	0,47	0,15
Cimento CP V	0,625	0,603	0,51	0,14
Pó de quartzo	0,671	0,491	0,41	0,15
Sílica ativa	0,532	0,913	0,59	0,25

Fonte: Autoria própria (2014)

## 4.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem dos CPRs estudados foi feita com base em técnicas de empacotamento de partículas, sendo usado o modelo de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado para estabelecer as proporções ideais entre os materiais componentes da pasta de cimento. Para a aplicação deste modelo de empacotamento, são necessários alguns dados de entrada, os quais são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados de entrada para o modelo de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado

<b>Material</b>	<b>Diâmetro médio, <math>d_i</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Densidade de empacotamento, <math>\beta_i</math> (-)</b>	<b>Volume relativo da classe de grão, <math>y_i</math> (-)</b>
Cimento CP IV	6,66	0,657	Entre 0,1 e 0,99
Cimento CP V	7,97	0,625	Entre 0,1 e 0,99
Pó de quartzo	14,4	0,671	Entre 0,1 e 0,99
Sílica ativa	0,2	0,532	Entre 0,1 e 0,99

Fonte: Autoria própria (2014)

Observa-se a partir da Tabela 4.2, que o volume relativo de cada classe de grãos varia entre 0,1 e 0,99. Isto responde às variações adotadas para as porcentagens de cada material na mistura, ressaltando que cada material fino é considerado como uma classe individual de tamanho de grãos. Para cada combinação de materiais, então, foram realizadas tentativas de combinação destes em porcentagens que variam de 1 a 99%. A



cada combinação testada, calculava-se a densidade de empacotamento segundo modelo de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado, conforme Equações 2.7 a 2.11, previamente apresentadas. Esta ação tem como finalidade verificar qual a porcentagem de combinação entre materiais que apresenta a maior densidade de empacotamento.

A matriz cimentícia dos concretos a serem estudados é composta pelo cimento (CP IV ou CP V-ARI) e as adições minerais, pó de quartzo e sílica ativa. Logo, iniciou-se as combinações de materiais pelas adições minerais, combinando-se o pó de quartzo e a sílica ativa primeiramente. Os resultados obtidos para a combinação destas duas adições, foram, então, utilizados na combinação com cada um dos tipos de cimento Portland, formando uma pasta ternária.

Os resultados obtidos pelas combinações do pó de quartzo com a sílica ativa, em proporções que variam de 1 a 99%, são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.3**.

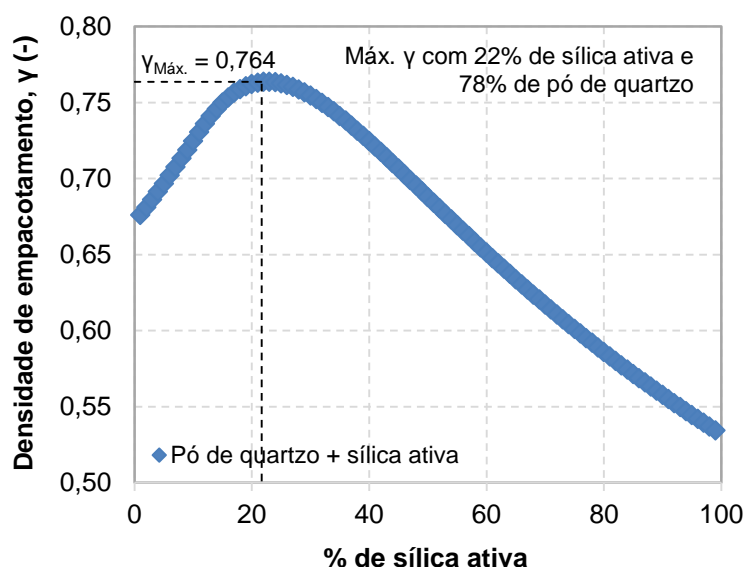


Figura 4.3 - Densidades de empacotamento: combinações de pó de quartzo e sílica ativa

Fonte: Autoria própria (2014)

Através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.3**, verifica-se que a máxima densidade de empacotamento é igual a 0,764, para a mistura contendo 22% de sílica ativa e 78% de pó de quartzo. Logo, estas proporções foram fixadas entre as adições minerais. Após isto, os resultados desta mistura binária de máxima densidade de empacotamento foram combinados com os dois cimentos estudados, separadamente. As proporções estudadas variam, novamente, de 1 a 99%, tornando-se então uma mistura ternária. O objetivo centra-se, uma vez mais, na escolha da combinação que produz a maior densidade de empacotamento.

A combinação de 22% de sílica ativa e 78% de pó de quartzo é considerada como um único material, para possibilitar a aplicação do modelo de empacotamento de partículas, o qual permite combinar materiais dois a dois. Logo, os dados de entrada referente à combinação das adições consistem em diâmetro médio igual a 11,3  $\mu\text{m}$  (média ponderada dos diâmetros do pó de quartzo e da sílica ativa, considerando as proporções de uso dos materiais apresentadas na Figura 4.3, sendo 22% de sílica ativa e 78% de pó de quartzo) e densidade de empacotamento igual a 0,764 (valor máximo obtido pela aplicação do modelo, mostrado na Figura 4.3).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4 mostra as densidades de empacotamento obtidas pela aplicação do modelo de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado à combinação de pó de quartzo, sílica ativa (nas proporções previamente estabelecidas de 22% de sílica ativa e 78% de pó de quartzo) e os cimentos estudados. A Figura 4.4 (a) se refere ao cimento CP IV e a Figura 4.4 (b) se refere ao cimento CP V-ARI.

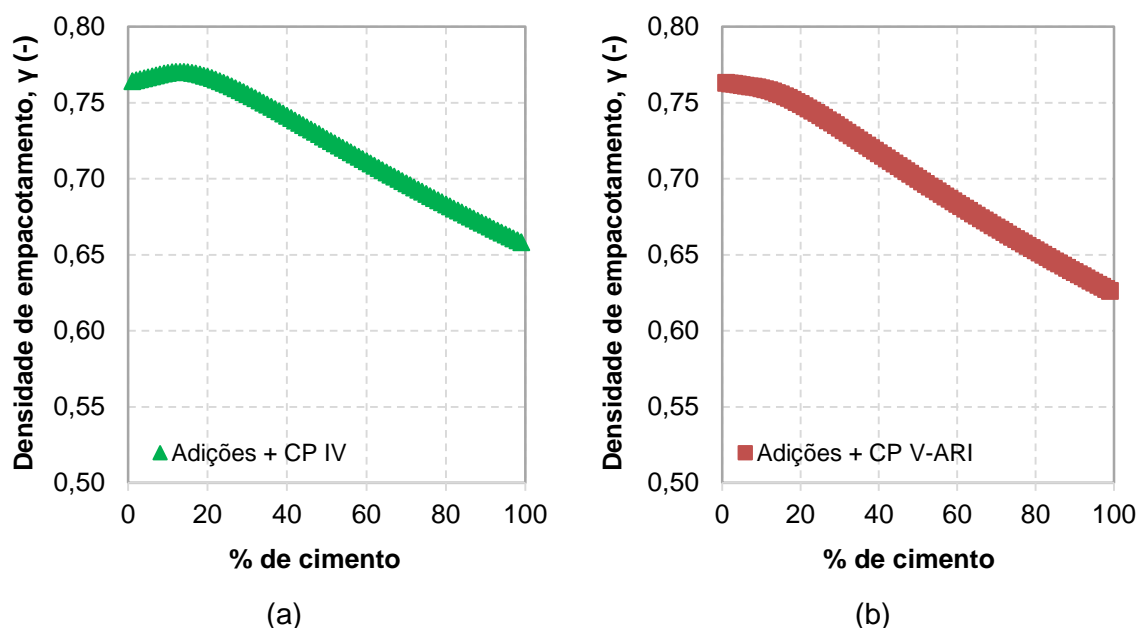


Figura 4.4 - Densidades de empacotamento: combinações de adições minerais e cimentos  
Fonte: Autoria própria (2014)

Observa-se a partir da Figura 4.4 que a densidade de empacotamento aumenta conforme a proporção de cimento nas composições diminui, em ambos os casos de uso do cimento CP IV e CP V-ARI. É importante ressaltar aqui uma limitação do modelo de Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado, que diz que quando a relação entre os diâmetros das partículas dos conjuntos é maior que 0,22, as partículas pequenas serão, em realidade, muito grandes para se encaixarem nos espaços vazios deixados pelas partículas maiores. Logo, a densidade de empacotamento depende da razão entre os diâmetros das partículas

das duas classes envolvidas no cálculo, o que se expressa através do fator  $k_d$ , conforme já apresentado no capítulo 2.

Para o caso da combinação das adições com o cimento CP IV, o valor do coeficiente  $k_d$  é igual a 0,26, estando dentro do intervalo indicado,  $0,22 < k_d < 1,0$ . Dessa forma, encontra-se um valor de densidade de empacotamento máxima quando a porcentagem de cimento na mistura é igual a 10%, como mostra a Figura 4.4 (a). Já para o caso do cimento CP V-ARI, o valor de  $k_d$  é igual a 0,17, estando fora do intervalo indicado como válido para aplicação do modelo. Assim, a combinação dos dois conjuntos de partículas (adições + cimento CP V-ARI) não é feita de forma eficiente pelo modelo, resultando em uma máxima densidade de empacotamento quando o cimento não está presente na mistura, ou teor igual a 0% de cimento, conforme mostra a Figura 4.4 (b).

Esse fato limita a aplicação do modelo de empacotamento de partículas em questão à dosagem dos concretos de pós reativos, já que não é viável a produção destes concretos sem a presença de cimento Portland. Mesmo o uso de 10% de cimento em relação às adições minerais é um valor muito baixo, se considerada as elevadas resistências mecânicas buscadas. É importante, então, ressaltar que o modelo de empacotamento de partículas considera apenas aspectos físicos na determinação do teor ideal de materiais para compor os conjuntos granulares, na busca da máxima densidade de empacotamento de partículas. Porém, ao se trabalhar com matrizes cimentícias, os aspectos químicos associados à hidratação do cimento Portland e à atividade pozolânica das adições minerais, cumprem também um papel fundamental nas misturas. Logo, estes aspectos não podem ser negligenciados. Por isso, pode-se concluir que ao se aplicar um modelo de empacotamento de partículas na busca de uma composição ideal de materiais finos, que serão usados na produção de pastas para concretos, é importante que os modelos considerem, não apenas aspectos físicos do conjunto granular, mas também aspectos associados à química do cimento e das adições minerais.

Desse modo, os consumos de cimento Portland nos CPRs estudados foram estabelecidos com base em valores recomendados pela literatura. Optou-se por consumos entre 550 e 650 kg/m<sup>3</sup>, para que se conseguisse alcançar as resistências elevadas associadas ao CPR e, ao mesmo tempo, houvesse um limite superior para a quantidade de cimento usado, evitando consumos excessivamente elevados. Quanto às proporções das adições minerais, optou-se por manter os valores estabelecidos com base no modelo de empacotamento de partículas, sendo 22% de sílica ativa e 78% de pó de quartzo, em volume, o que equivale a 20% de sílica ativa e 80% de pó de quartzo, em massa.

Além disso, foram adotadas as diretrizes de dosagem que seguem: o aditivo superplastificante e as fibras foram utilizados na proporção de 5% e 0,15% em relação a massa de cimento, respectivamente; considerou-se o índice de vazios do agregado miúdo

e ainda a necessidade de um excesso de pasta para se obter trabalhabilidade adequada do concreto fresco; as relações a/c foram de 0,26 para o traço com CP IV e 0,29 para o traço com CP V-ARI, valores obtidos através da determinação da densidade de empacotamento de materiais na condição úmida, proposto por Wong e Kwan (2008).

Os traços que deram origem aos concretos da campanha experimental são apresentados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Traço do CPR com cimento CP IV

<b>Materiais</b>	<b>Traço unitário, em massa</b>	<b>Consumo de materiais, em massa (kg/m<sup>3</sup>)</b>
CPIV	1	626
Pó de Quartzo	0,56	353
Sílica Ativa	0,13	82
Água	0,26	163
Aditivo	0,05	31
Fibras	0,0015	0,94
Areia Fina	1,74	1088
Total	-	2343,94

Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 4.4 - Traço do CPR com cimento CP V-ARI

<b>Materiais</b>	<b>Traço unitário, em massa</b>	<b>Consumo de materiais, em massa (kg/m<sup>3</sup>)</b>
CPV-ARI	1	561
Pó de Quartzo	0,69	385
Sílica Ativa	0,18	100
Água	0,29	162
Aditivo	0,05	28
Fibras	0,0015	0,84
Areia Fina	1,96	1098
Total	-	2334,84

Fonte: Autoria própria (2014)

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

No estado fresco, foram avaliadas a massa específica e a consistência dos concretos estudados. Na Figura 4.5 são apresentados os resultados referentes à massa específica das misturas produzidas.

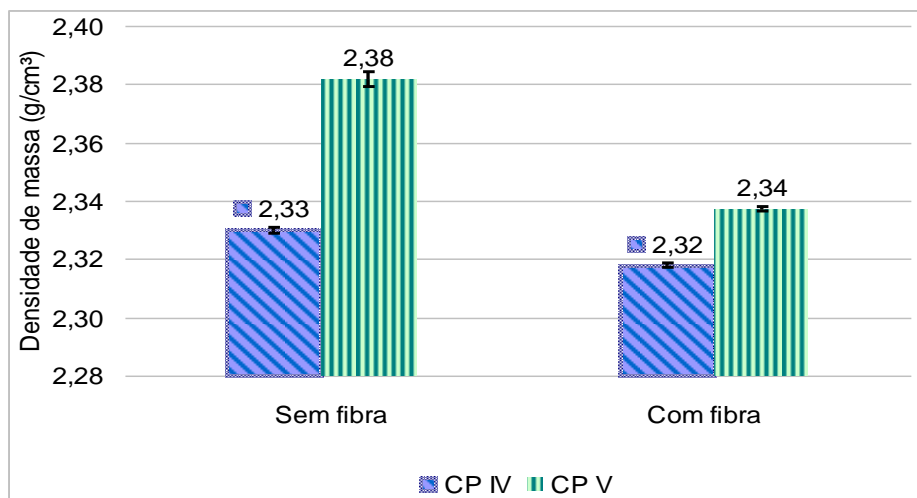


Figura 4.5 - Massa específica dos concretos  
 Fonte: Autoria própria (2014)

Através dos resultados apresentados na Figura 4.5, observa-se que a adição de fibras de polipropileno causou uma pequena redução na massa específica dos concretos confeccionados com CP IV e CP V-ARI, o que se explica pelo fato de as fibras serem produzidas a partir de um material leve. O uso de fibras em concretos pode aumentar a porosidade do material, e reduzindo a massa específica. Nos concretos produzidos com CP IV, houve uma redução de 0,4%, enquanto os concretos produzidos com CP V-ARI apresentaram uma redução de 1,7%. Observa-se também que os concretos produzidos com CP V-ARI apresentam densidades levemente superiores aos produzidos com CP IV. Porém, este aumento é pequeno, sendo igual a 2,1% para os concretos sem fibras e 0,9% para os concretos com fibras de polipropileno.

Ressalta-se, também, que as massas específicas de ambos os concretos produzidos são elevadas, aproximando-se de valores típicos encontrados para concretos dessa categoria. É importante para a produção de concretos de pós reativos que a massa específica das misturas seja elevada, contribuindo dessa maneira para a diminuição de poros e vazios no material, aumentando, assim, a resistência mecânica.

A Figura 4.6 demonstra os resultados de consistência obtidos para os concretos produzidos.

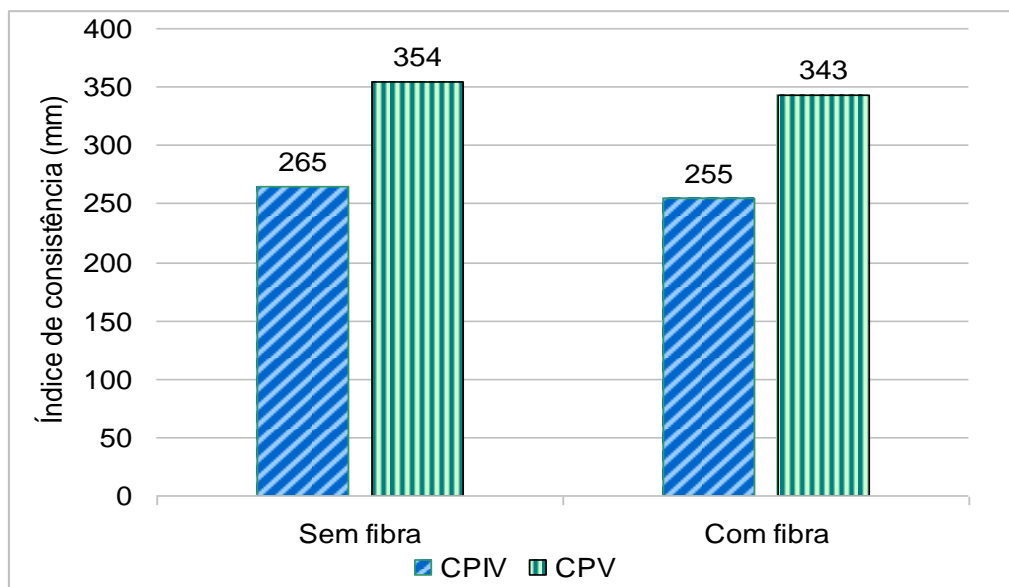


Figura 4.6 - Índices de consistência dos concretos

Fonte: Autoria própria (2015)

Conforme Figura 4.6 pode-se observar que a presença das fibras de polipropileno na mistura diminui levemente a consistência dos concretos, o que é esperado, já que as fibras se travam umas às outras, formando redes que impedem, ou diminuem, o fluxo. Observa-se, porém, que a redução no diâmetro de espalhamento obtido é pequena, igual a 3,8% para os concretos produzidos com o cimento CP IV e 3,1% para os concretos produzidos com cimento CP V-ARI.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

##### 4.4.1 Resistência à compressão axial

###### Concretos produzidos com cimento CP IV:

Os resultados individuais de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com CP IV são apresentados no Apêndice B deste trabalho. A seguir, na Figura 4.7 e Figura 4.8, apresentam-se os resultados médios e o desvio padrão de 6 corpos de prova, obtidos para a resistência à compressão dos concretos produzidos com CP IV, sem e com a adição de fibras, sob cura úmida, térmica e autoclavada, nas idades correspondentes.

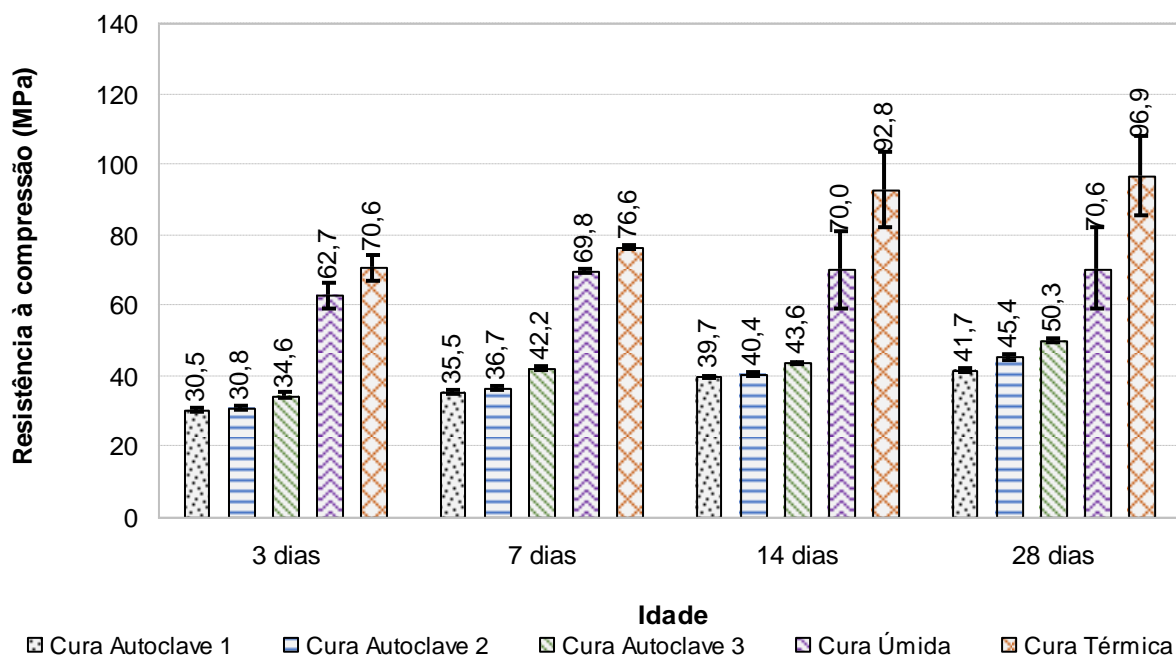


Figura 4.7 - Resistência à compressão axial dos concretos com CP IV sem fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

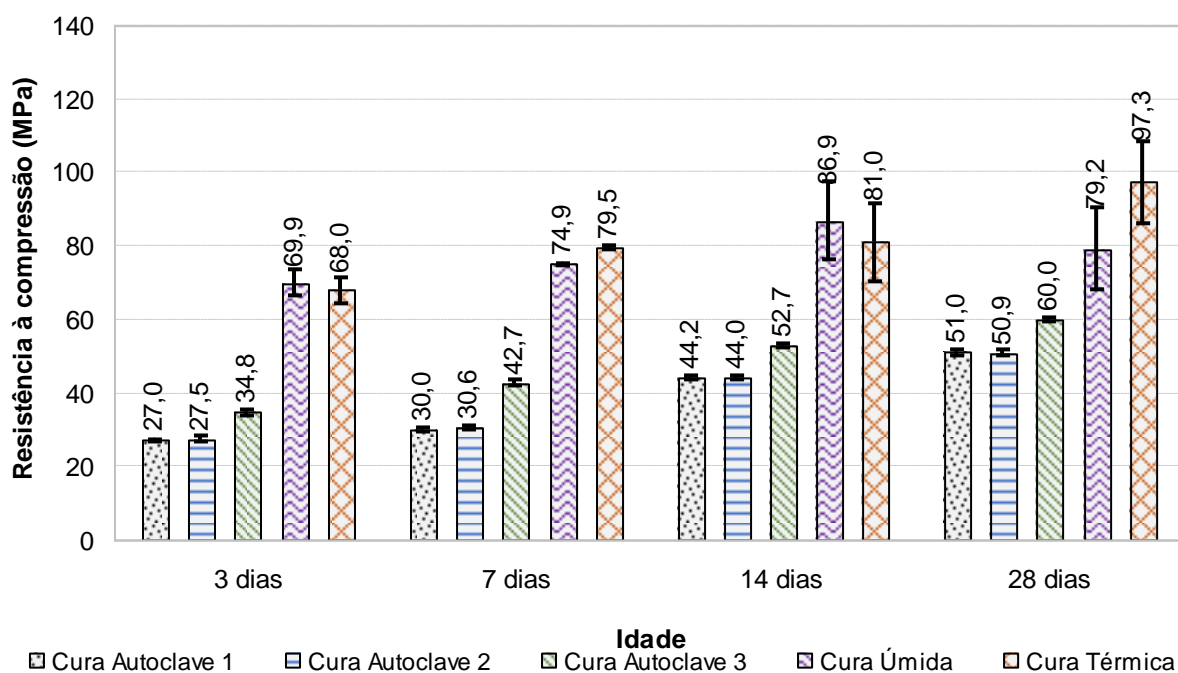


Figura 4.8 - Resistência à compressão axial dos concretos com CP IV com fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

Conforme mostrado na Figura 4.7, pode-se observar que ocorreu um aumento de resistência à compressão com a evolução das idades dos concretos, em todos os tipos de cura estudados. Em alguns casos, porém, se nota que as barras que representam o desvio padrão dos resultados se sobrepõem, indicando que estatisticamente os resultados podem

ser considerados iguais. Este é o caso dos concretos submetidos à cura úmida, nas idades de 7 a 14 e 28 dias, e dos concretos submetidos à cura térmica, nas idades de 14 a 28 dias.

Da mesma forma, os concretos produzidos com a adição de fibras de polipropileno, cujos resultados são mostrados na Figura 4.9 e Figura 4.8, também demonstraram aumento de resistência à compressão com o avanço da idade. Em duas situações observou-se, também, sobreposição das barras de desvio padrão dos resultados. No primeiro caso, para as argamassas submetidas à cura úmida, nota-se que a média dos resultados de 28 dias se apresenta inferior ao obtido aos 14 dias, sendo 8,9% inferior à resistência à compressão aos 14 dias. Porém, este comportamento está acompanhado de um desvio padrão elevado, igual a 18,13 MPa, o que faz com haja sobreposição das barras que representam o desvio padrão nas idades de 7 e 14 dias. Dessa forma, os resultados podem ser considerados estatisticamente iguais. Na segunda situação, observa-se novamente sobreposição das barras de desvio padrão para os corpos de prova submetidos à cura térmica, nas idades de 7 e 14 dias, sendo os resultados estatisticamente iguais. Estes comportamentos observados devem-se, provavelmente, a ruídos ocorridos durante a moldagem ou retífica dos corpos de prova utilizados nas referidas idades.

Em ambas as situações, sem e com a adição de fibras de polipropileno (Figura 4.7 e Figura 4.8), verifica-se que as maiores resistências são obtidas para as argamassas submetidas à cura térmica, provavelmente devido ao fato de que o aumento de temperatura até 90 °C funcionou como catalizador das reações de hidratação do cimento, fato este mencionado no capítulo 2. Na sequência, observa-se que as argamassas submetidas à cura úmida apresentaram resultados maiores que as argamassas submetidas à cura em autoclave. Dessa forma, é importante ressaltar que as argamassas curadas em autoclave apresentaram os menores resultados de resistência à compressão, contrariando as expectativas do estudo e as indicações da literatura técnico-científica. As explicações para este fato centram-se, provavelmente, nos procedimentos da cura em autoclave utilizados no presente estudo.

Nos métodos 1 e 2 de cura em autoclave utilizados, os corpos de prova foram colocados na autoclave imediatamente após a produção, ainda em estado fresco e dentro das formas. A diferença entre os dois métodos está em que, no método 1 os corpos de prova foram totalmente submersos em água, enquanto no método 2 os corpos de prova foram parcialmente submersos, ficando o terço superior fora do contato com a água. Observa-se que em ambas as situações, os corpos de prova ficaram expostos diretamente à água e a pressão, sem nenhum tipo de vedação. Isso pode ter facilitado a penetração da água que estava dentro da autoclave no interior dos corpos de prova, causando poros e fissuras no material. Deve-se ressaltar que os corpos de prova produzidos segundo estes



dois métodos de cura apresentaram perda de massa ao serem retirados da autoclave, a qual foi verificada visualmente, pois houve concentração de resíduos de argamassa no fundo do equipamento, além disso, observou-se a diminuição da altura dos corpos de prova, em média igual a 2 cm, assim como a formação de fissuras nas superfícies dos corpos de prova, conforme se mostra na Figura 4.9.



Figura 4.9 - Aspecto do topo do corpo de prova curado em autoclave, método 1  
Fonte: Autoria própria (2015)

Todos esses fatores colaboraram para a diminuição da resistência à compressão dos concretos produzidos com cura em autoclave pelos procedimentos 1 e 2, de modo que não foi possível atingir resistências elevadas através destes dois métodos de cura em autoclave.

O método 3 de cura em autoclave consistiu em colocar os corpos de prova no equipamento depois de endurecidos, tendo sido estes desmoldados e submetidos à autoclave 24 horas após a produção. Observa-se pelas Figuras 4.7 e 4.8 que, no caso dos concretos produzidos sem fibras, este procedimento produziu um aumento de 20,6% da resistência à compressão com relação ao método 1 e 10,8% com relação ao método 2, aos 28 dias. Já para os concretos produzidos com a adição de fibras, o aumento de resistência aos 28 dias foi de aproximadamente 17,9% com relação a ambos os métodos 1 e 2. Contudo, ainda assim os valores de resistência à compressão obtidos não satisfazem às expectativas quanto à melhora de resistência com a utilização de autoclave, tendo sido atingida resistência à compressão máxima igual a 60 MPa (cura autoclave pelo método 3, aos 28 dias, com adição de fibras), estando este valor muito abaixo do esperado e do relatado por outros autores que já efetuaram esse tipo de cura, conforme apresentado no capítulo 2. Acredita-se que isto pode ter ocorrido, pois ao colocar-se os corpos de prova na autoclave após o endurecimento, a hidratação inicial do cimento já havia sido iniciada, o que prejudicou o efeito benéfico da temperatura e pressão na velocidade de hidratação do cimento e ocupação dos espaços vazios pelos cristais.

Outro fator que pode ter contribuído para reduzir as resistências à compressão máximas alcançadas está associado ao equipamento de autoclave utilizado nesta pesquisa, o qual se restringia a uma pressão e temperatura máximas de 150 kPa e 150 °C, respectivamente,

sendo ainda recomendada a sua utilização por períodos contínuos de no máximo 3 horas, conforme manual técnico do fabricante do equipamento (PHOENIX LUFERCO, 2009.). Os resultados de resistências à compressão elevados, indicados na literatura, estão associados ao uso de equipamentos que podem permanecer ligados por um maior período de tempo, a maiores temperaturas e pressões. Ressalta-se que, mesmo sabendo das limitações do equipamento em questão, optou-se por utilizá-lo, pois era o único equipamento de autoclave disponível, e o que condizia com a realidade do presente trabalho.

Finalmente, pode-se verificar pelas Figuras 4.7 e 4.8 que a adição das fibras de polipropileno não contribuiu para aumento significativo da resistência em todos os tipos de cura, conforme esperado. O aumento máximo de resistência foi abaixo de 10%. As fibras poliméricas são adicionadas aos concretos com o objetivo de auxiliar no combate ou na redução das fissuras resultantes da retração plástica, não apresentando efeitos significativos na resistência à compressão. Ressalta-se ainda que nos 3 métodos de cura em autoclave, a adição de fibras produziu o aumento de volume dos corpos de prova, quando retirados da cura, de modo que o topo destes se apresentou estufado. Uma possível justificativa para tal fato, seria que as fibras podem ter dificultado o desprendimento do material (pasta/concreto) e sob calor e pressão dentro do equipamento, os mesmos tiveram seus topos estufados, conforme mostrado na Figura 4.10.

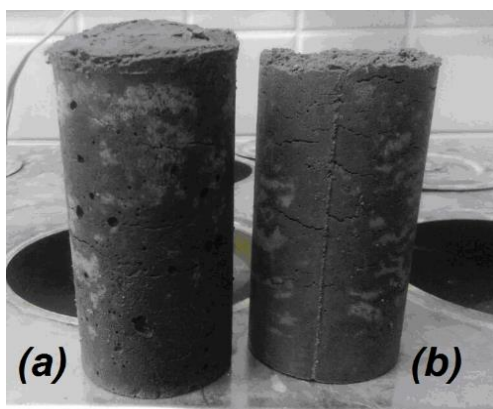


Figura 4.10 - Aspecto dos corpos de prova curados à autoclave pelo método 1, (a) com adição de fibras e (b) sem adição de fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

Ressalta-se, ainda, que foi atingido o valor máximo de resistência à compressão igual a 97,3 MPa, sob cura térmica, aos 28 dias, com a incorporação de fibras no concreto. Este valor é inferior às resistências tipicamente encontradas para CPR na literatura, onde são mencionados valores superiores a 150 MPa.

Concretos produzidos com cimento CP V-ARI:

Os resultados individuais de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com CP V -ARI são apresentados no Apêndice B deste trabalho. A Figura 4.11 e Figura 4.12 apresentam os resultados médios e o desvio padrão de 6 corpos de prova, obtidos para a resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento CP V-ARI, sem e com a adição de fibras, sob cura úmida, térmica e autoclavada, nas idades correspondentes.

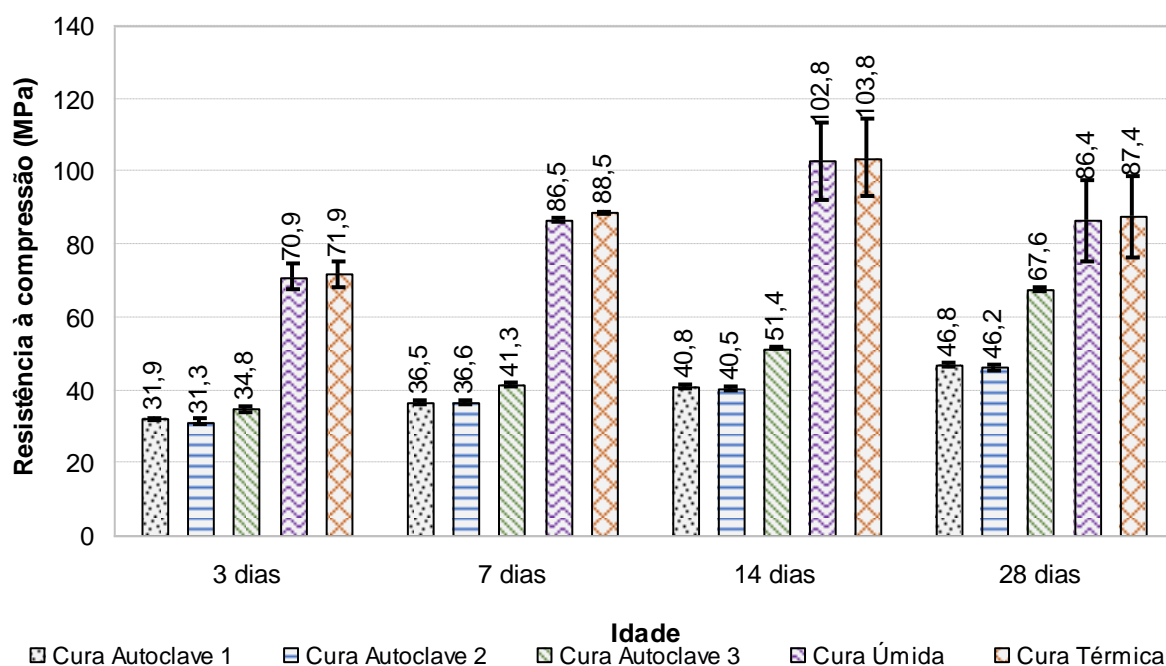


Figura 4.11 - Resistência a compressão axial de concretos com CP V-ARI sem fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

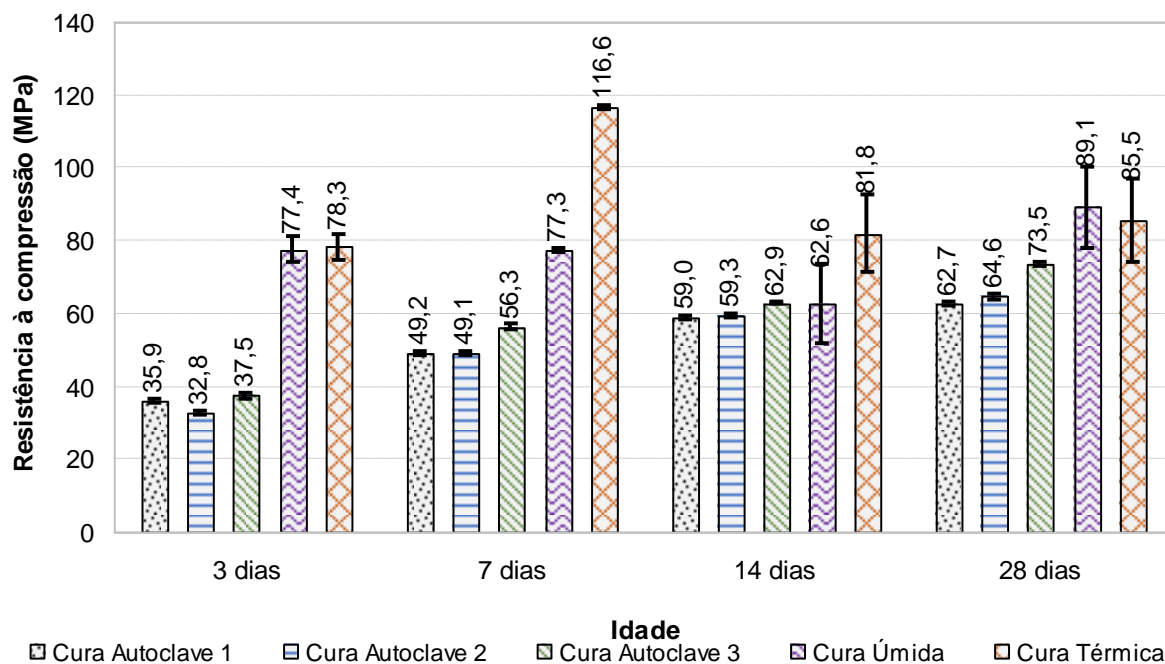


Figura 4.12 - Resistência a compressão axial de concretos com CP V-ARI com fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

Pode-se observar pelas Figura 4.11 e Figura 4.12 que ocorreu aumento de resistência à compressão com a idade na maioria dos casos apresentados. Em algumas situações, porém, se nota que as barras que representam o desvio padrão dos resultados se sobrepõem, indicando que estatisticamente os resultados podem ser considerados iguais. Esta situação é semelhante à que ocorreu para os concretos produzidos com o cimento CP IV.

Este é o caso dos concretos produzidos sem fibra nas idades de 14 e 28 dias para as curas úmida e térmica, tal como mostra a Figura 4.11. Observa-se para estes concretos, que as maiores resistências à compressão foram obtidas na idade de 14 dias, com valores de aproximadamente 104 MPa. Isto representa 44% de aumento com relação aos resultados obtidos na idade de 3 dias, analisando resultados para os mesmos tipos de cura. Devido ao elevado desvio padrão encontrado, as resistências à compressão apresentadas na idade de 28 dias são inferiores às obtidas aos 14 dias, o que pode dever-se a ruídos durante os processos de moldagem e desforma dos corpos de prova para esses traços. De qualquer forma, a sobreposição das barras de desvio padrão indica resultados estatisticamente iguais nestas situações (concretos sem fibras, submetidos a cura úmida e térmica, nas idades de 14 e 28 dias).

Para os concretos produzidos com a adição de fibras de polipropileno, cujos resultados são mostrados na Figura 4.12, novamente verifica-se o aumento de resistência à compressão com o avanço da idade, na maioria dos casos. Em algumas situações, observa-se sobreposição das barras de desvio padrão dos resultados, o que indica a obtenção de

resultados estatisticamente iguais. Isso ocorre para os concretos submetidos a cura úmida, nas idades de 3, 7 e 28 dias, e para os concretos submetidos a cura térmica, nas idades de 14 e 28 dias. Em ambos os tipos de cura, no entanto, observa-se redução da resistência à compressão quando se passa dos 7 aos 14 dias. Este é um resultado bastante inesperado, que se justifica muito provavelmente por erros no armazenamento e/ou procedimento de ensaio dos corpos de provas na referida idade de 14 dias.

Quanto a influência do tipo de cura, observa-se que, assim como nos concretos produzidos com o cimento CP IV, os concretos submetidos a cura úmida e térmica com o CP V-ARI apresentaram os maiores valores de resistência a compressão axial. Isso ocorreu para os concretos produzidos sem e com a adição de fibras. As razões para os baixos resultados obtidos para os concretos curados em autoclave justificam-se, muito provavelmente, pelos métodos de utilização da autoclave, conforme já comentado para os concretos produzidos com cimento CP IV. Acredita-se que a colocação dos corpos de prova na autoclave no estado fresco, sem vedação (métodos 1 e 2 de autoclave) colaborou para a penetração de água nos concretos, aumentando a porosidade destas e, conseqüentemente, reduzindo a resistência à compressão. No caso do método 3, em que os corpos de prova foram colocados após 24 horas no equipamento de autoclave, já em estado endurecido, acredita-se que a baixa resistência se deve a baixa efetividade da autoclave em colaborar para o processo de hidratação do cimento, já que os primeiros cristais de hidratação já estavam formados e ocupavam posições definidas na matriz cimentícia. Além disso, a elevada temperatura e pressão colaboraram para a fissuração dos corpos de prova, reduzindo sua resistência mecânica.

Ressalta-se que a máxima resistência à compressão obtida no presente trabalho, igual a 116,6 MPa, refere-se ao concreto produzido com cimento CP V-ARI, com a adição de fibras, submetida à cura térmica, aos 7 dias de idade. Os concretos de pós reativos estudados têm a composição diferente dos concretos comuns, apresentando elevado consumo de cimento e adições minerais. Assim, quando submetidos à cura térmica, os corpos de prova com CP V-ARI, aliados a alta temperatura, apresentam aceleração das reações pozolânicas ainda nas primeiras idades (PANDOLFELLI, 2011). É possível que aos 7 dias, sob a temperatura de 90°C utilizada durante o processo térmico, tenha sido suficiente para a hidratação de grande parte do cimento. Ainda assim, este resultado de máxima resistência à compressão é inferior aos valores tipicamente encontrados para CPR, superiores a 150 MPa.

Por fim, pode-se verificar pelas Figura 4.11 e Figura 4.12 que a adição das fibras de polipropileno não contribuiu para aumento significativo da resistência à compressão dos concretos. Conforme já mencionado, as fibras poliméricas são adicionadas aos concretos com o objetivo de auxiliar no combate ou redução das fissuras resultantes da retração

plástica, não apresentando efeitos significativos na resistência à compressão. Observa-se também, assim como os concretos produzidos com CP IV, que nos 3 métodos de cura à autoclave, a adição de fibras produziu o aumento de volume dos corpos de prova, quando retirados da cura, de modo que o topo destes se apresentou estufado, conforme mostrado na Figura 4.10, apresentada anteriormente.

#### 4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão

##### Concretos produzidos com cimento CP IV:

A Figura 4.13 apresenta os resultados médios e desvio padrão para 6 corpos de prova, obtidos para a resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão dos concretos produzidos com CP IV, com e sem a adição de fibras, sob cura úmida, térmica e autoclavada, na idade de 28 dias. Os resultados individuais para cada corpo de prova ensaiado são apresentados no Apêndice B.

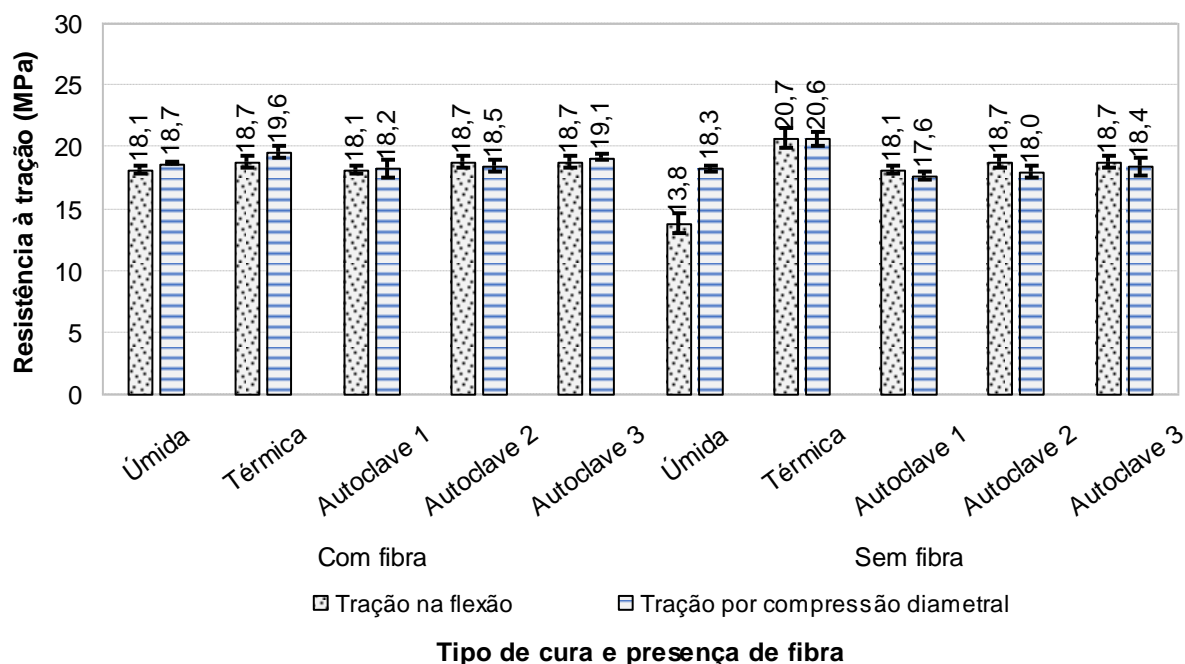


Figura 4.13 - Resistência à tração de concretos com CP IV

Fonte: Autoria própria (2015)

Através da Figura 4.13 pode-se observar que os concretos sem adição de fibras, apresentaram valores de resistência a tração na flexão e de resistência à tração por compressão diametral, muito próximos entre todos os tipos de cura empregados, porém o pico de resistência foi de 20,7 e 20,6 MPa obtido com a cura térmica, para ambos os casos, respectivamente.

Nos concretos com adição de fibras de polipropileno os valores de resistência à tração na flexão e de resistência à tração por compressão diametral são também muito semelhantes entre os tipos de cura empregadas. Os valores máximos obtidos foram de 18,7 MPa para tração na flexão e 19,6 MPa para resistência à tração por compressão diametral, o tipo de cura mais eficiente foi novamente a térmica. Os concretos produzidos com CP IV apresentaram resistência a tração por compressão diametral e tração na flexão em média 33% da resistência a compressão axial para os concretos sem fibras e 30% em média para os concretos com fibras. Em média as fibras provocam perda de 10% da resistência à tração.

É interessante observar que apesar dos resultados de resistência à compressão para cura à autoclave terem sido inferiores aos demais tipos de cura, como já mencionado anteriormente, os resultados de resistência à tração por compressão diametral e tração à flexão, são mais próximos, este fato pode estar interligado com a média de desvio padrão dos corpos de prova, que apresentaram valores extremamente baixos, menores que 2,0 MPa, descartando a possibilidade de falhas na moldagem ou adensamento., reforçando a hipótese de que a fibra de polipropileno, utilizada nesta pesquisa, não contribuiu para melhora das propriedades mecânicas dos concretos de pós reativos. Os resultados de ensaios desenvolvidos por Mirza, (2009), indicam efeitos contraditórios da adição de fibra de polipropileno sobre as resistências à compressão e à tração do concreto, sendo essas diferenças atribuídas às variações na composição da matriz, no tipo e na quantidade de fibra adicionada, nas condições de produção do material e nos métodos de ensaio adotados.

#### Concretos produzidos com cimento CP V-ARI:

Figura 4.14 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração diametral e tração na flexão de concretos produzidos com CPV-ARI, com e sem a adição de fibras, sob cura úmida, térmica e autoclavada, nas idades correspondentes. Os resultados individuais para cada corpo de prova ensaiado são apresentados no Apêndice B.

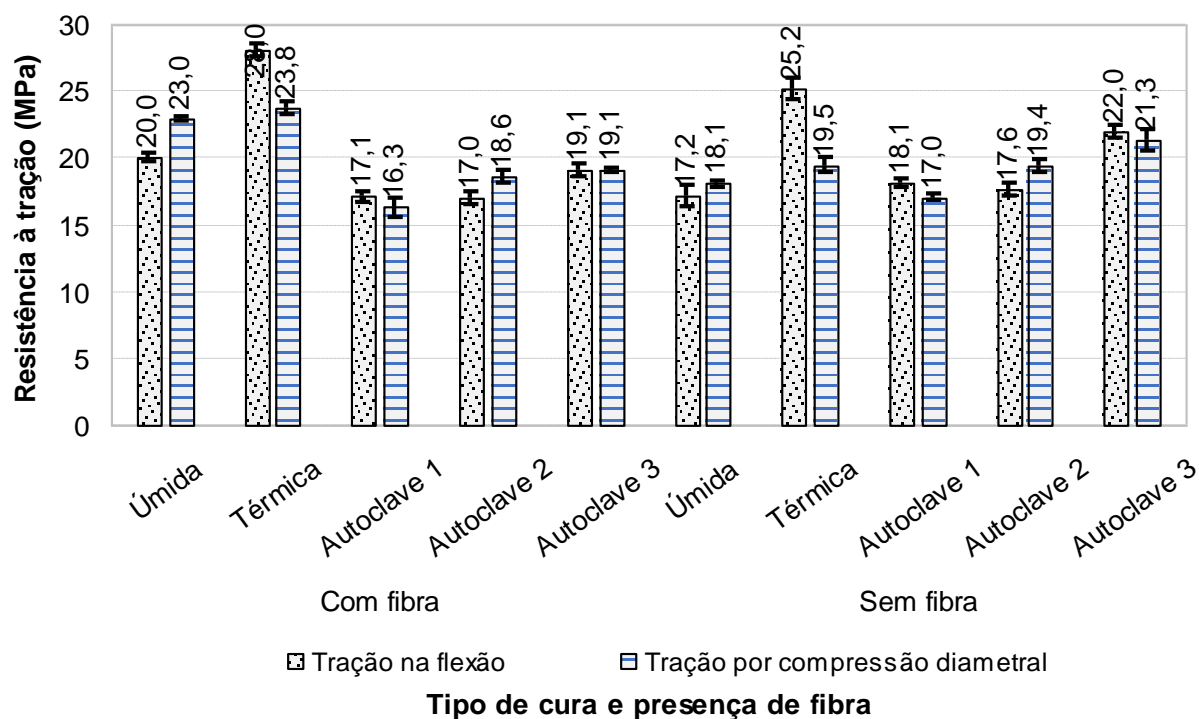


Figura 4.14 - Resistência à tração de concretos com CP V-ARI

Fonte: Autoria própria (2015)

Conforme apresentado através da Figura 4.14, pode-se observar que os concretos sem a adição de fibras, apresentaram maiores resistências quanto ao ensaio de tração na flexão, com a cura térmica, alcançando o valor de 25,2 MPa, e quanto ao ensaio de tração por compressão diametral, as maiores resistências foram com a cura autoclave 3, muito próximos aos da cura úmida, maiores que 20 MPa. Nos concretos com adição de fibras de polipropileno os maiores valores de resistência à tração na flexão e tração por compressão diametral foram obtidos ambos por cura térmica, de 28 MPa na tração na flexão e 23,8 MPa quanto à tração por compressão diametral.

Comparando-se os concretos, verifica-se um aumento médio de 11% na resistência à tração na flexão e 10% de aumento médio quanto a resistência a tração por compressão diametral nos concretos produzidos com a adição de fibras de polipropileno.

Esses concretos produzidos com CP V-ARI apresentaram resistência a tração por compressão diametral e tração na flexão em média 30% da resistência a compressão axial para os concretos sem fibras e 27% em média para os concretos com fibras. As fibras levaram em média a perda de 10% na resistência a tração por compressão em todos concretos.



#### 4.4.3 Permeabilidade ao ar

##### Concretos produzidos com cimento CP IV:

A Figura 4.15, apresenta os resultados obtidos quanto a permeabilidade a ar de concretos produzidos com CP IV, com e sem a adição de fibras, sob cura úmida, térmica e auto clavada na idade de 28 dias.

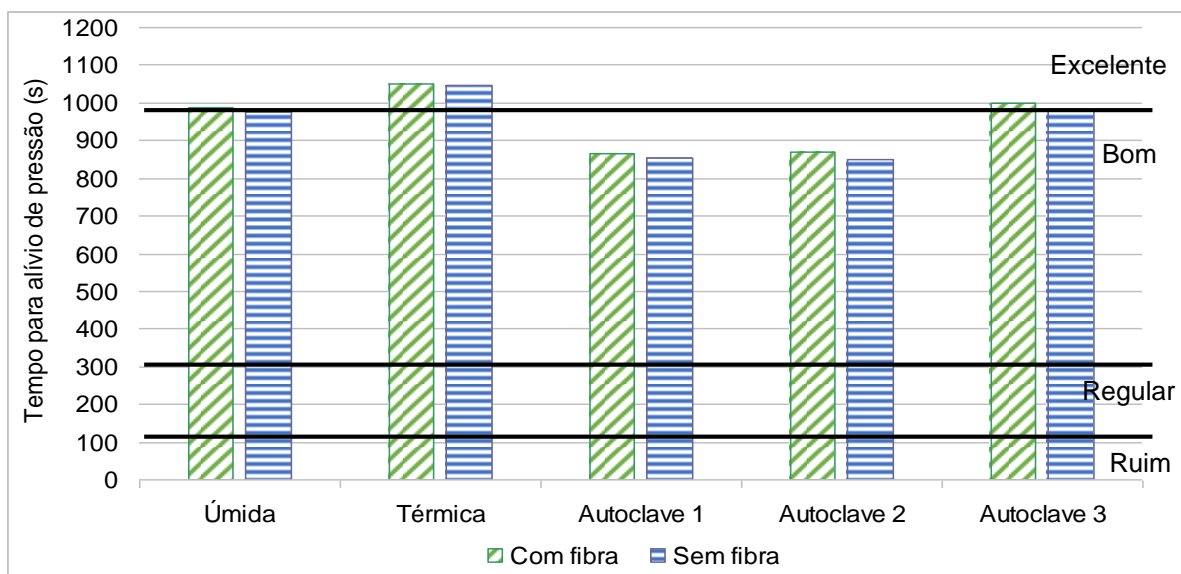


Figura 4.15 - Resultados da permeabilidade dos concretos com CP IV

Fonte: Autoria própria (2015)

Utilizando como referência as recomendações do próprio fabricante do equipamento utilizado, conforme já citado no capítulo 3, pode-se verificar que todos os concretos produzidos apresentaram boa ou excelente resistência à permeabilidade, levando-se mais de 300 segundos para que o ar injetado saísse pelos poros. Segundo o fabricante, esse tempo é utilizado como parâmetro para medir a permeabilidade do concreto (CATHER *et al.*, 1984).

É possível observar-se que se leva mais tempo para o ar sair dos poros dos corpos de prova dos concretos submetidos à cura térmica, o que representa um concreto menos permeável. Entre os métodos de cura à autoclave, o método 3 é o mais eficiente, possivelmente pela questão de que os corpos de prova foram curados após 24 horas e não colocados na autoclave no estado fresco, como nos demais métodos. Os corpos de prova referentes a cura pelo método 1 e 2, visualmente apresentaram mais fissuras e mais poros aparentes. Uma hipótese do que ocorreu, é que após as 24 horas, houve maior hidratação dos grãos, formando assim uma mistura mais coesa e quando colocados à autoclave, esses corpos de prova responderam melhor a questão da pressão e temperatura. Já nos

concretos que foram submetidas à cura autoclavada ainda no estado fresco (método 1 e 2), estas iniciaram sua hidratação dentro no equipamento, submetidas de imediato a calor e pressão constantes e submersas em água. Estes fatores podem ter contribuído para que a água penetrasse rapidamente nos poros dos corpos de prova, ocasionando excessiva fissuração, porosidade e perda de massa aparente, conforme Figura 4.16.



Figura 4.16 - Aspecto dos corpos de prova curados com autoclave método 1 e 2  
Fonte: Autoria própria (2015)

Concretos produzidos com cimento CP V-ARI:

A Figura 4.17 apresenta os resultados obtidos para a permeabilidade ao ar dos concretos produzidos com CP V-ARI, com e sem a adição de fibras, sob cura úmida, térmica e auto clavada aos 28 dias.

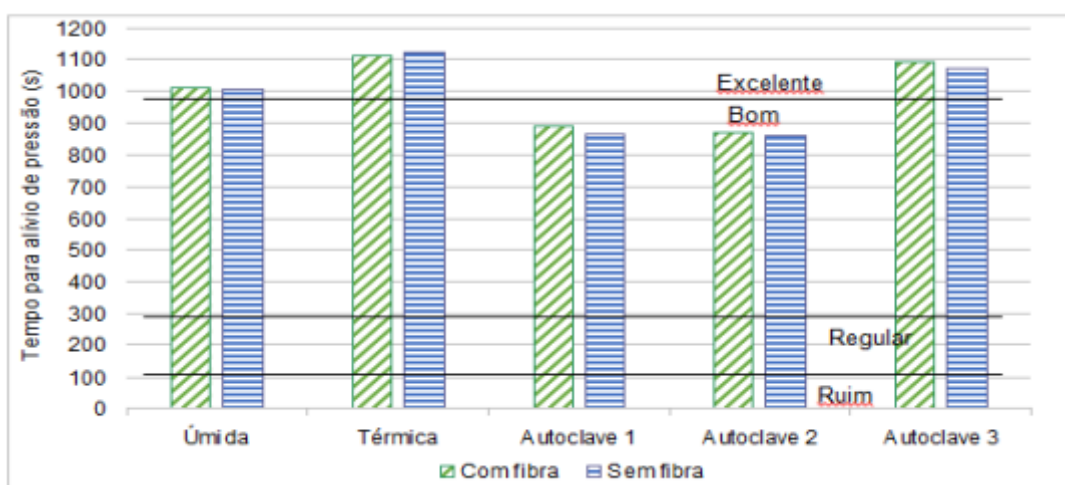


Figura 4.17 - Resultados da permeabilidade dos concretos com CP V-ARI  
Fonte: Autoria própria (2015)

Os concretos produzidos com CP V-ARI, com e sem a adição de fibras submetidas à cura térmica e úmida apresentaram valores muito semelhantes de resistência, porém a cura térmica foi a que apresentou resultado superior. Dentre os tipos de cura executadas, eles foram os que se apresentaram como menos permeáveis, pois foi necessário maior tempo para dissipação do ar pelos poros. Os concretos submetidos à cura autoclavada pelo método 3 obtiveram resultados semelhantes a cura térmica, com diferença de apenas 3% em relação ao tempo necessário para que o ar injetado se dissipasse do corpo de prova.

De maneira geral pode-se dizer que todos os concretos produzidos, foram considerados boas ou excelentes quanto a resistência a permeabilidade ao ar, segundo os parâmetros do fabricante.

#### 4.4.4 Análise das correlações existentes entre as propriedades

Na Figura 4.18 são relacionados os resultados de compressão axial dos concretos produzidos com CP IV e CP V-ARI, aos valores de permeabilidade ao ar, na idade de 28 dias com a adição de fibras.

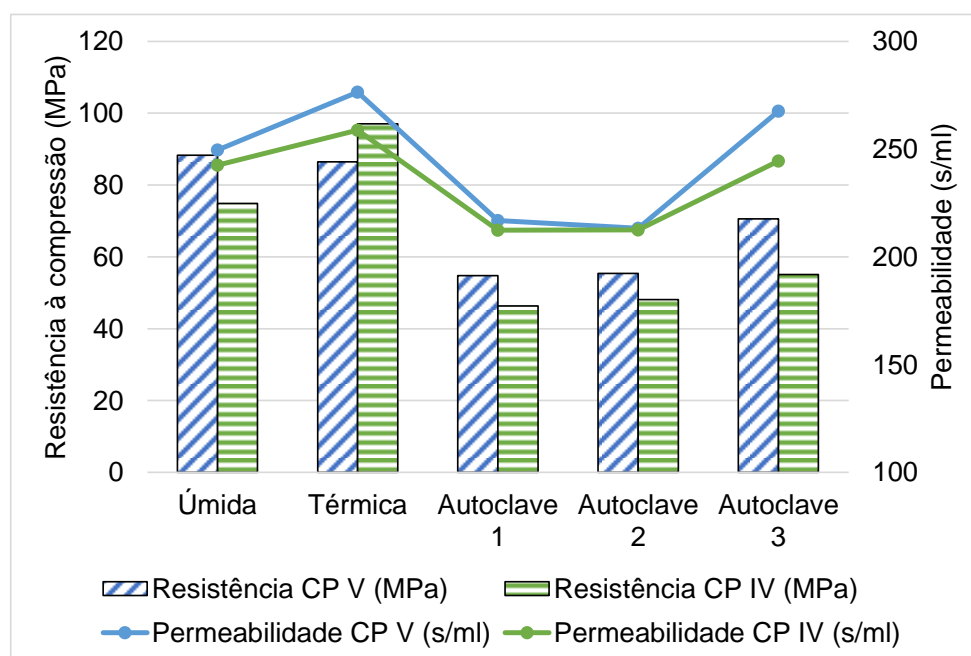


Figura 4.18 – Relação entre resistência à compressão e permeabilidade ao ar, com fibras  
Fonte: Autoria própria (2015)

Verifica-se pela Figura 4.18 que as curvas de permeabilidade dos concretos acompanham os resultados de resistência a compressão axial obtidos, desta forma percebe-se que a redução das resistências está associada ao aumento da permeabilidade

nos concretos. Os valores correspondentes às curas autoclavadas, método 1 e 2, foram os que apresentaram maiores valores de permeabilidade e menores valores de resistência a compressão, esse fato pode ser relacionado com a condição dos corpos de prova serem levados à cura ainda no estado fresco, o que pode ter os tornado mais permeáveis, pelo grande número de poros aparentes e fissuras.

Correlacionando os resultados quanto à compressão axial e permeabilidade dos concretos produzidos com CP IV, têm-se que, o método 1 com relação ao método 3 apresentou 13% de redução de resistência, para os concretos produzidos com CP V-ARI, a média foi de 19% de redução.

Com relação a cura autoclavada pelo método 3 e a cura térmica, observa-se que para os concretos produzidos com CP IV, houve aumento de 6% de resistência em média para os concretos sem fibras e 4% com fibras, para os concretos com CP V-ARI o valor médio foi de 4% de aumento de resistência para os concretos sem fibras e 2% para os concretos com fibras.

Através da Figura 4.19 pode-se observar o coeficiente de determinação da equação da curva de tendência ( $R^2$ ) para os valores médios das resistências à compressão axial de todos os concretos e permeabilidade ao ar.

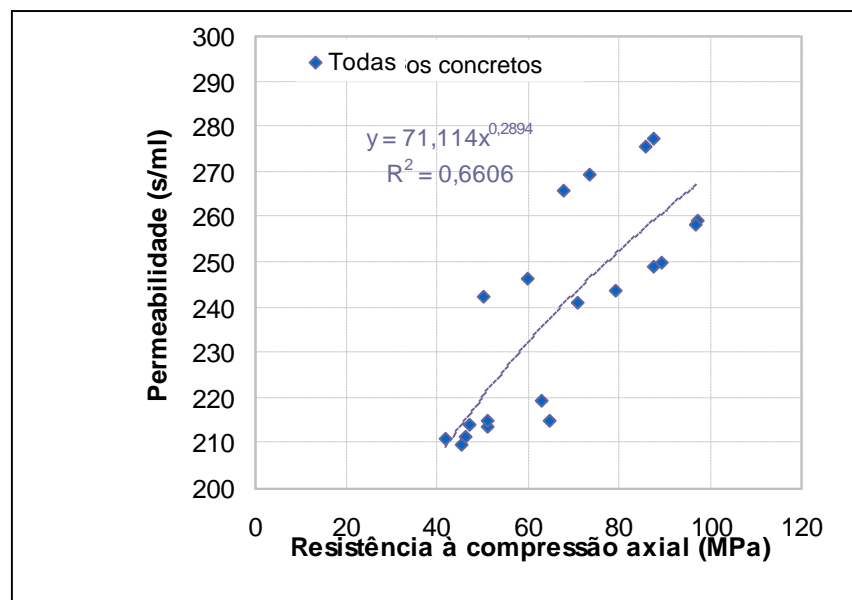


Figura 4.19 - Curva de tendência: resistência à compressão axial e permeabilidade ao ar

Fonte: Autoria própria (2015)

O resultado de coeficiente de determinação obtido para essa correlação ( $R^2$ ) é de 0,6606 o que representa baixa correlação entre os resultados, ou seja, houve grande dispersão entre eles.

Na Figura 4.20 pode-se observar os coeficientes de determinação das equações das curvas de tendência ( $R^2$ ) para os valores médios das resistências à tração por compressão diametral e tração na flexão de todos os concretos e permeabilidade.

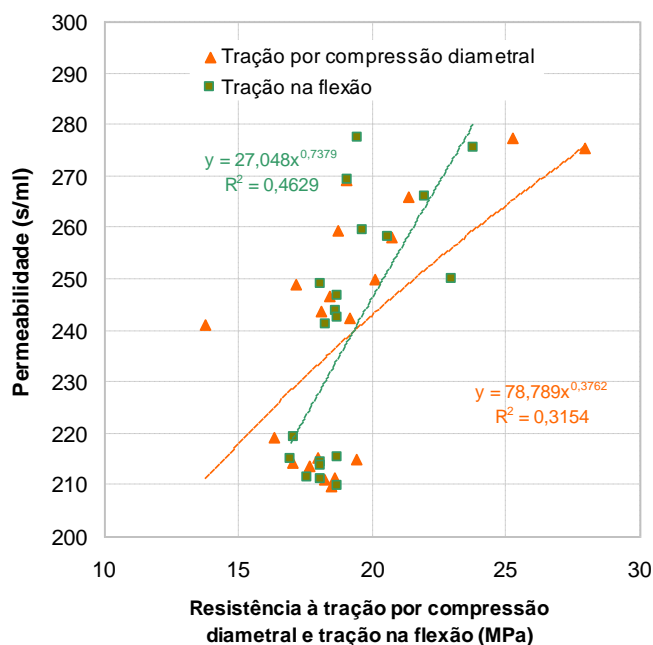


Figura 4.20 - Curva de tendência: resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão e permeabilidade ao ar

Fonte: Autoria própria (2015)

O resultado de coeficiente de determinação obtido para essa correlação ( $R^2$ ) é de 0,4629 para tração na flexão, 0,3154 para tração por compressão diametral, ambos relacionados com os resultados quanto à permeabilidade. Esses valores demonstram baixa correlação entre os resultados, ou seja, houve grande dispersão entre eles.

Já a Figura 4.21 apresenta os coeficientes de determinação das equações das curvas de tendência ( $R^2$ ) para os valores médios das resistências mecânicas de todas os concretos e permeabilidade.

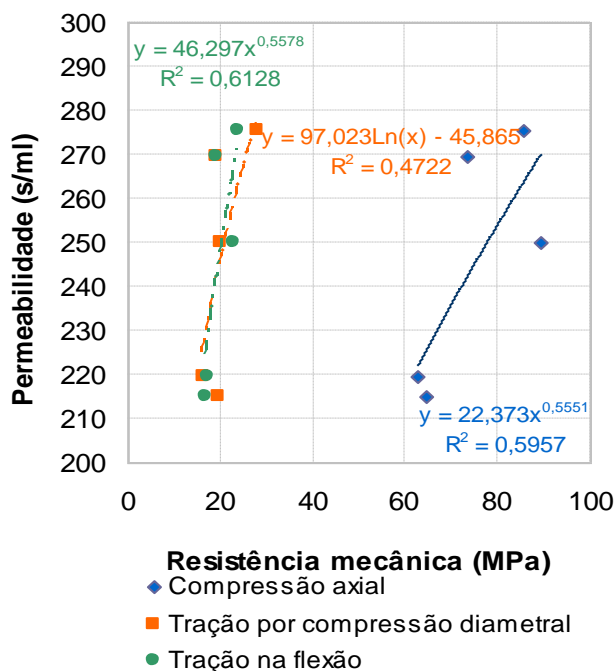


Figura 4.21 - Curva de tendência: resistências mecânicas e permeabilidade ao ar  
 Fonte: Autoria própria (2015)

O resultado de coeficiente de determinação obtido para essa correlação ( $R^2$ ) é de 0,618 para tração na flexão e 0,4722 para tração por compressão diametral e 0,5957 para tração na flexão. Todos esses valores foram relacionados com os resultados quanto à permeabilidade e demonstraram baixa correlação entre os resultados, ou seja, houve grande dispersão entre eles. Tudo isso indica que existem outras variáveis influenciando nos resultados de resistência mecânica, que não unicamente a permeabilidade ao ar dos concretos.

As figuras 4.22 e 4.23 demonstram as correlações dos tipos de curas empregadas, tipos de cimento e presença ou não de fibras nos concretos, quanto às resistências de compressão axial correlacionadas à tração por compressão diametral e tração na flexão.

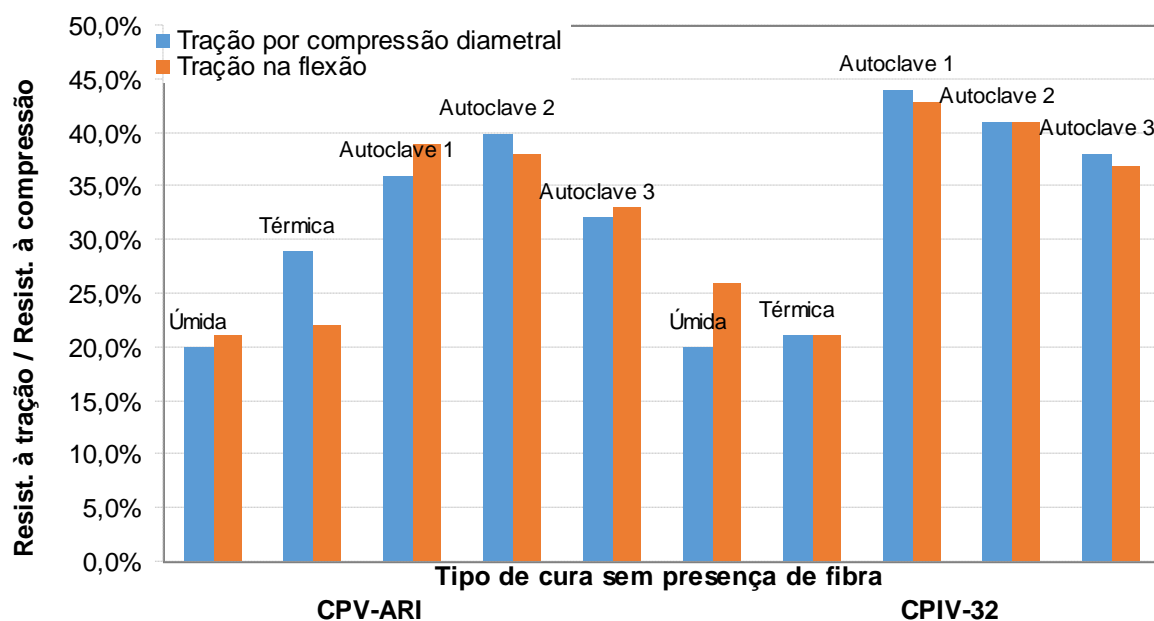


Figura 4.22 - Relação entre resistência à tração e compressão, concretos sem fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

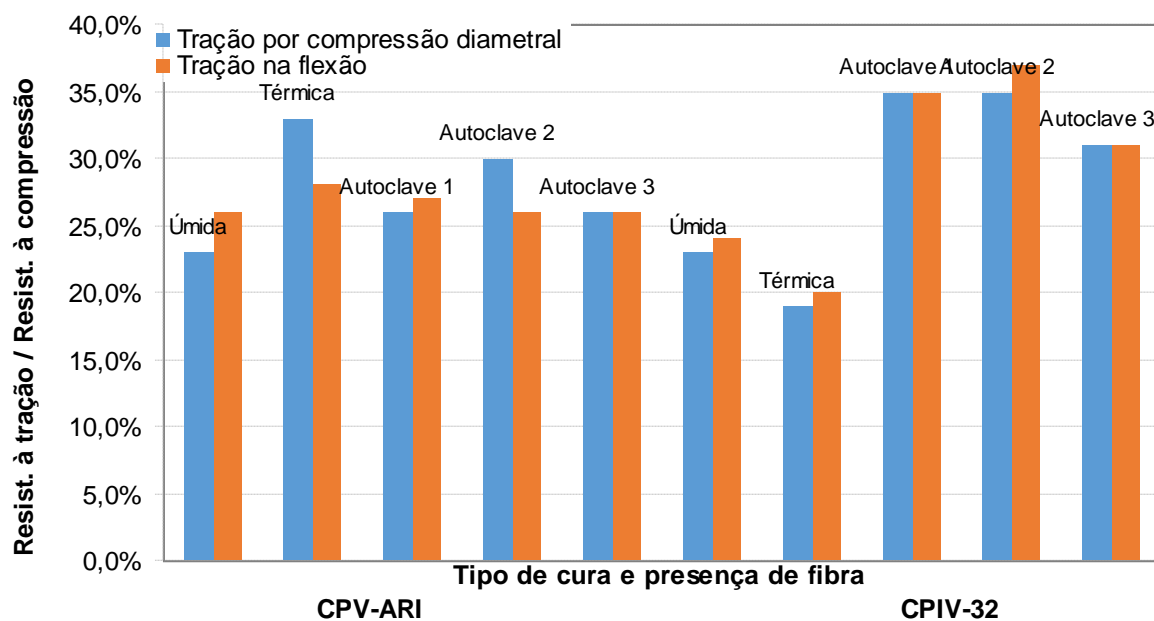


Figura 4.23- Relação entre resistência à tração e compressão, concretos com fibras

Fonte: Autoria própria (2015)

Observa-se que os maiores percentuais foram obtidos nos traços sem adição de fibras, confeccionados com CP IV. O maior percentual foi de 43% para tração na flexão em relação à média de resultados quanto à compressão axial e 44% na tração por compressão diametral em relação à média de resultados quanto à compressão axial. Em média para ambos os traços, com ou sem a adição de fibras, as resistências representaram 30% dos

valores quanto à resistência à compressão axial. Ou seja, esses concretos atingiram valores excelentes nos ensaios de tração na flexão e tração por compressão diametral.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Baseando-se nas análises realizadas no capítulo 4, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O modelo de empacotamento de partículas proposto por Toufar *et al.* (1976) e Toufar modificado permitiu determinar as proporções de adições minerais utilizadas no concreto: sendo 22% de sílica ativa e 78% de pó de quartzo, em volume. Esse valor se refere apenas às adições minerais, de modo que será reduzido ao se considerar o total de materiais que compõem o concreto. Porém, a determinação do consumo de cimento a partir do modelo foi inviável, já que este considera apenas aspectos físicos associados ao empacotamento. Verificou-se a necessidade de se considerar, também, aspectos químicos associados à hidratação do cimento, os quais não são considerados pelo modelo;
- Os três tipos de curas empregadas nos concretos de pós reativos influenciam em suas propriedades mecânicas. O tipo de cura que apresentou os melhores resultados quanto a resistência à compressão axial foi a cura térmica, pois os resultados mostram que a temperatura elevada de cura acelera as reações químicas de hidratação do cimento e reações pozolânicas das adições minerais, colaborando para resistência mecânica dos concretos. Os corpos de prova curados sob a cura térmica à 90°C foram os que apresentaram maiores valores de resistência a compressão;
- Na cura em autoclave os resultados apresentaram-se abaixo das expectativas, contrariando as indicações da literatura apontadas no capítulo 2. Uma vez que neste tipo de cura são aliadas temperatura elevada e pressão, esperava-se ganho significativo de resistência à compressão. Porém, isso não foi observado. As resistências mecânicas foram mais baixas que as dos concretos submetidos à cura úmida e térmica;
- Em contrapartida, foi verificado aumento do volume dos corpos de prova dos concretos com fibras e redução de volume, perda de material, nos corpos de prova de concretos sem fibra, após saírem do equipamento de autoclave. Em ambos os casos, muitas fissuras e poros foram observadas nos corpos de prova. Acredita-se que isso se deve ao fato de que, nos métodos 1 e 2 de autoclave, os corpos de prova foram submetidos ainda no estado fresco ao equipamento. Ou seja, os corpos de prova foram colocados na autoclave imediatamente após a produção, ainda em estado fresco e dentro das formas. Desse modo, os corpos de prova ficaram

expostos diretamente à água e a pressão, sem nenhum tipo de vedação, ainda em estado fresco. Isso pode ter facilitado a penetração da água que estava dentro da autoclave no interior dos corpos de prova, causando poros e fissuras no material. Deve-se ressaltar que os corpos de prova produzidos segundo estes dois métodos de cura apresentaram perda de massa ao sair da autoclave, a qual foi verificada visualmente, pois houve concentração de resíduos de concreto no fundo do aparelho. Além disso, observou-se a diminuição da altura dos corpos de prova, em média igual a 2 cm, assim como a formação de fissuras nas superfícies dos corpos de prova;

- Comparando os 3 métodos aplicados quanto a cura autoclavada, verifica-se através dos resultados que o método 3 foi o mais eficaz, porém não superando os resultados dos concretos sob cura úmida e térmica;
- A máxima resistência à compressão alcançada foi igual a 116,6 MPa, referente ao concreto produzido com cimento CP V-ARI, com a adição de fibras, submetida à cura térmica. Este resultado de máxima resistência à compressão é inferior aos valores tipicamente encontrados para CPR, superiores a 150 MPa;
- Não houve contribuições das fibras poliméricas às propriedades dos concretos. As fibras poliméricas são adicionadas aos concretos com o objetivo de auxiliar no combate ou redução das fissuras resultantes da retração plástica, não apresentando efeitos significativos na resistência à compressão. Ressalta-se ainda que nos 3 métodos de cura à autoclave, a adição de fibras produziu o aumento de volume dos corpos de prova, quando retirados da cura, de modo que o topo destes se apresentou estufado. A principal razão para isso pode se dar pelo fato de que, sob pressão e com o concreto em estado fresco, tende-se a perder massa de concreto no interior da autoclave. Porém, as fibras impedem essa perda, promovem possíveis fissuras e até mesmo aumento de volume do corpo de prova;
- Através do ensaio de permeabilidade ao ar foi possível verificar que os concretos de pós reativos estudados apresentam baixa porosidade aberta. Observou-se que 100% dos corpos de prova produzidos nesta pesquisa, em todos os tipos de cura, apresentaram resultados satisfatórios, sendo classificados como bons ou excelentes, conforme recomendações de Cather *et al.* (1984).

## 5.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Alguns temas a serem estudados em futuras pesquisas:

- Analisar a influência da fibra metálica nas propriedades dos concretos de pós reativos, comparando diferentes tipos de cura, inclusive a cura autoclavada;
- Utilizar outro modelo de empacotamento de partículas, para dosagem de concretos de pós reativos;
- Testar outras formas de se submeter o concreto à cura em autoclave;
- Analisar a influência da cura autoclavada nas propriedades de concretos de pós reativos, com o auxílio de um equipamento que obtenha temperatura e pressão acima de 150 °C e 150 kPa, respectivamente.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000.

ALHOZAIMYA, A., FARESA, G., AL-NEGHEIMISHA, A., JAAFARB, M.S. **The autoclaved concrete industry: An easy-to-follow method for optimization and testing**. Center of Excellence for Concrete Research and Testing, Saudi Arabia, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. **State-of-the-report on high-strength concrete**, ACI 363R-92 (Reapprove 1997). ACI Manual of Concrete Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 55 p.

ANDREASSEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. **Ind. Eng. Chem. Kolloid Z** v. 50. P. 217-228. 1930.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico – Especificação**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9479 - Concreto e argamassa - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ADAM, T.; MA, J.. **Development of an Ultra-High Performance Concrete for precast spun concrete columns.** In: 3<sup>o</sup> International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

ALMEIDA D. **Avaliação da permeabilidade e da absorção de água de revestimento de argamassa pelo método do cachimbo.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, V., 2003, São Paulo. Anais. São Paulo: p. 519-544. ANTAC, 2010.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H.. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa.** 4<sup>ed</sup>ição. Editora O Nome da Rosa. Setembro de 2008.

BAUER, E.; CABRAL, A. E. B. ; DAL MOLIN, D. C. C. **Avaliação de aspectos mecânicos de argamassas de reparo utilizadas em estruturas de concreto armado.** Congresso Brasileiro do Concreto, 2011.

BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. **Avaliação da Carbonatação Natural em Concretos Produzidos com e sem sílica ativa submetidos a diferentes procedimentos de cura.** 47.º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2006.

BARNETT, S. J.; MACPHEE D. E.; LACHOWSKI E.E.; GRAMMOND N. J. **XRD, EDX and IR Analysis of Solid Solutions Between Thaumascite and Ettringite.** Cement and Concrete Composites, v. 32, p. 719-730, 1992.

BATTAGIN, A. F; CURTI, R.; SILVA, C. O. ; MUNHOZ, F.A. C. **Influência das condições de cura em algumas propriedades das argamassas e concretos convencionais e de alto desempenho.** Instituto Brasileiro de Concreto– Congresso Brasileiro. São Paulo, 2010.

BEHLOUL, M.; ADELIN, R.; BERNIER, G. **Non –linear computation of fiber reinforced micro-concrete and mortars structures**. Worldwide advances in structural concrete and masonry structures congress, New York, 1996.

BEHLOUL, M; ACKER, P. **Ductal Technology: a large spectrum of properties wide range of applications**. In: International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, 2004.

BETIOLI, A. MURILLO; J, VANDERLEY MOACYR; GLEIZE, PHILIPPE JEAN PAUL;PILEGGI, RAFAEL GIULIANO. **Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48, out./dez.2009.

CAMARINI, G, CINCOTTO, A. **Caracterização da durabilidade de concretos e argamassas pela absorção de água**. Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 1999.

CAMPAGNOLO, J.L.; FILHO,A.C. & FILHO, L.C.P.S. (1996), **Estudo de peças fletidas de concreto armado com armadura exposta**. In: REUNIÃO DO IBRACOM, 38., Ribeirão Preto, 19-23 agosto 1996. Anais. São Paulo, IBRACON,1996. v.1, p.131-143.

CARDOSO, FÁBIO ALONSO. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese para doutorado na EPUSP. São Paulo, São Paulo 2009.

CARNEIRO, L. A. V.; SHEHATA, I. A. M.; SHEHATA, L. C. D. **Avaliação da resistência de colunas curtas de concreto confinadas externamente com fibras de carbono**. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 29., Punta Del Este. Anais... Punta del Este, Uruguai, 1999.

CATHER, R.; FIGG, J. W.; MARSDEN, A. F.; O'BRIEN, T. P. **Improvements to the Figg Method for determining the air permeability of concrete**. Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No. 129. p. 241-245. Reino Unido, 1984

CASTRO A. L. de; PANDOLFELLI V. C. **Revisão: conceito de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de argamassas especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica No. 55. pp. 18 – 32, 2009.

CHAN YW, CHU SH. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. Cem Concr Res 2004;34:1167–72.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de concretos de pós reativos com materiais do estado do Rio Grande do Sul**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

CHENG, Z. **Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement**, Cem. Concr. Res. 27, 5 (1997) 685-695

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

CORSINI, R. **Inovações Ultrafinas**. Téchne, PINI, São Paulo, 2006.

DAMAS, G.P.; SOARES, T.C.C. **Análise da influência da temperatura de cura na resistência à compressão axial nas argamassas de pós reativos**. 2011.60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Tecnologia em Argamassa, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

DE LARRARD, F. **A method for proportioning high-strength concrete mixtures**. Cement, concrete and aggregates, 1999.

DE LARRARD, F., BOSCH, F., CATHERINE, C. e DEFLORENE, F., **The AFREM Method of the Mix-Design of High Performance Concrete**, Materials and Structures V. 30 Parte 201, p. 439-446, 1997.

DELWAR, MURSHED; FAHMY, MOSTAFA E TAHA, RAMZI. **Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete**. ACI Materials Journal, p. 251-256, Mai.-Jun., 1997

DUGAT, J, FROUIN, L.; CLAVAUD, B. **RPC: Microstructure Analysis**. Proceedings 4th International Symposium on Utilization of HS/HPC, Paris. 1996.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. TU Delft, Delft University of Technology, 2011.

FEYLESSOUFI A; VILLIÉRAS F; MICHOT L; DONATO P; CASES J; RICHARD P. **Water Environment and nanostructural network in a reactive powder concrete**. Cement e Concrete Composites, nº 18, p.23-29, 1996.

FUNK, J.E.; DINGER, D.R. **Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content**. Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO). New York. 1980.

FURNAS, C.C. **Grading Aggregates**: I. Ind. Eng. Chem, v. 23, p. 1052-1058, 1931.

FREITAS, CLEVERSON DE. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido.** Dissertação para o Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, da Universidade Federal do Paraná, Mestre em Construção Civil. Curitiba, Paraná, Abril de 2010.

GAZOLA, ANA PAULA. **Argamassas de assentamento e revestimento fabricadas com compósito de cimento-madeira: serragem da madeira de Pinus Taeda.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, Santa Catarina, 2007.

GRAYBEAL, B. **Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete.** Report No. FHWA-HRT-06e103, FHWA, U.S. Department of Transportation, 2006.

GUIMARÃES, M.B.; SILVA, C. **Influência de diversos tipos de éteres de celulose nas propriedades das argamassas colantes.** VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Anais do VIII SBTA. Curitiba, 19 a 22 de Maio de 2002.

HALIT, H. YARDIMCI, M.Y., AYDIN, S., KARABULU, A.S. **Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes.** Construction and Building Materials, 2009

HIGH-PERFORMANCE CONSTRUCTION MATERIALS AND SYSTEMS: an essential program for America and its infrastructure, CERF-Civil Engineering Research Foundation, 2003.

IBUK, H; BECKHAUS, K. **Ultra-high performance Concrete for Drill Bits in Special Foundation Engineering.** 3º International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

IVESON, S. M.; LITSTER, J. D.; HAPGOOD, K.; ENNIS, B. J. **Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review.** Powder Technol., v. 117, p.3-39, 2001.

KADRI, EL HADJ E DUVAL, ROGER. **Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars.** ACI Materials Journal, Pag. 138-142, Mar.-Abr., 2002.

KLEIN, N.S. **El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland,** Barcelona, 2012, Tese (doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, 247 p.



KOURY, G.A; WILLOUGHBY B. **Polypropylene fibers in heated concrete. Part 1: molecular structure and materials behavior**, Magazine Concrete Res. 60, 2 (2008) 125-136.

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com adição de microssílica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos**. Porto Alegre-RS, 1994. 106 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LI, Y. KWAN, A.K.H. **Ternary blending of cement with fly ash microsphere and condensed silica fume to improve the performance of mortar**. Cement and Concrete Composites, v.49, 2014a, p.26-35.

LI, L.G. KWAN, A.K.H. **Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. Powder Technology**, v.253, 2014b, p.514-521.

LEON, J.M.S. **Ductal Solutions Newsletter nº 11**. Lafarge Ductal – Novembro, 2011.

LOHAUS, L.; RAMGE, P. **Rouboustness of UHPC – A new Approach for mixture proportioning**. In: International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 2008.

MALLMANN, J. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante** - Dissertação de mestrado – Engenharia Civil – UFRGS – Porto Alegre – 1996.

MAILVAGANAM. N. P.; DEANS, J. J. **Materials, selection, and handling: repair and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992.

MARGALHA, M. G. – **Argamassas – Conservação e Recuperação do Patrimônio**, Universidade de Évora – 2011.

MEHTA, P.K. **Concrete technology for sustainable development**. Concrete International, November, 1999.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Argamassa: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 667 p, 2008.

MIRANDA, C.R. **Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química**. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

MIRZA, F. ALHOZAIMY, M. P. **Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials**, Cement Concrete Composites 18, 2 (1991) 85-92

P. KALIFA, G. CHÉNÉ, C. GALLÉ, **High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure**, Cement Concrete Res. 31, 10 (2001) 1487-1499.

NELSON, E., GUILLOT, D. **Well Cementing**, 2nd Ed., Schlumberger, 2006.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, Ed. Pini, 1ª Edição, São Paulo, 1982.

OLIVEIRA, I. STUART, A.R. PILEGGI, R.G. PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partícula: princípios e aplicações em processamento cerâmico**, São Paulo: Fazenda Arte, 2000, 224 p.

PANDOLFELLI, V.C.; OLIVEIRA, R. I.; STUART, A. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazenda Arte, 2000. 224 p.

PIÉRARD, J.; DOOMS, B.; CAUBERG, N. **Evaluation of Durability Parameters of UHPC Using Accelerated Lab Tests**. 3º International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

POON, C.S. SHUI, Z. LAM H. L., **Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures**, Cement Concrete Res. 34, 12 (2004) 2215-2222.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **A reologia da pasta de cimento e a influência da cal**. I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1999, p25-32.

REIS, A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

RESPLENDINO, J. **State of the art of design and construction of UHPFRC structures in France**. 3º International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

RICHARD, P. CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes**. Cement and Concrete Research, v. 25, n.7, p. 1501-1511, Out, 1995.

RICHARD, P. **Reactive powder concrete: A new ultra-high-strength cementitious material.** In: International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 4, 1996.

SABBATINI, F.H.; ORLANDI, S.A.F. **Processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural silício-calcaria.** São Paulo, 1984.

SANTOS, MARIA. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Agosto de 2008

SANTOS, J. WHITE. **Argamassa de alto desempenho.** 2011. 209f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

SOTO, N. T. A. **Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SCHEYDT, J; MUELLER, H; HEROLD, G. **Long term behaviour of ultra-high performance concrete under the attack of chlorides and aggressive waters.** In: International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 2008.

STROEVEN, P., STROEVEN, M. **Assessment of packing characteristics by computer simulation.** Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999.

STRONGE, J; DEUSE, T; **Special cements for ultra-high performance concrete.** In: International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 2008.

TERZIAN, P. **Prevenção de fissuras por retração plástica de origem climática empavimentos, pisos e lajes de concreto.** Concreto e Construções, São Paulo, n.46, p.38- 41, 1992.

TORRENTI, J. M.; MATTE, V.; MARET, V.; RICHET, C. **High integrity containers for interim storage of nuclear wastes using reactive powder concrete.** In: International Symposium of high Strength/high performance concrete, 4, 1996, p. 1407-1413.

TOUFAR, W., BORN, M. KLOSE, E. **Optimierung der Packungsdichte Polydisperser körniger Systeme.** Freiburger Forschungsheft A 558, VEB.

TUTIKIAN, B, F; ISAIA , G, C; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra desempenho**. In: ISAIA, G, C. (Ed). **Concreto: ciência e tecnologia** . 1.ed. São Paulo: Ibracon, 2011

VANDERLEI, R. D.. **Análise experimental do concreto de pós-reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VILELA, F. P., KULAKOWSKI, M. P., DAL MOLIN, D. **Durabilidade e resistência mecânica de concretos e argamassas com adição de sílica ativa** - Porto Alegre, 1999.

VOO, Y. L., FOSTER, S. J., GILBERT, R. I. **Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups**. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 2006, p 123-13.

WALKER, R. C.; PURTON, M. J.; **Some observations on calcium silicate brick specimens in the autoclave**. In: *International Symposium on Autoclave Calcium Silicate Building Products*. 3, 1973, Utrecht, Jaarbenrs Congrescentrum. p. 1-13.

WANG, W. C. **Feasibility of stabilizing expanding property of furnace slag by autoclave method**. *Construction and Building Materials*, 2014.

WONG, H; KWAN, A. **Packing density of cementitious materials: part 1 – measurement using a wet packing method** . *Materials and Structures* 41: 689 – 701, 2008.

WONG, H; KWAN, A. **Packing density of cementitious materials: part 2–packing and flow of OPC + PFA+ CSF**. *Materials and Structures* 41: 773 – 784, 2008.

## **APÊNDICE A**

Determinação da densidade de empacotamento dos finos, na condição úmida  
Resultados numéricos para as pastas produzidas

Tabela A.1 - - Densidade de empacotamento do Cimento CPIV

CP IV 10/09/2013

Temperatura da sala (°C)	22°											
Massa específica do cimento (kg/m <sup>3</sup> )	2830											
Massa específica do superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	1060											
% Aditivo sobre Massa do CPIV	5											
<b>Consumo (em massa)</b>												
Pastas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Materiais	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )											
Cimento	1480,00	1600,00	1650,00	1705,00	1735,00	1770,00	1800,00	1830,00	1865,00	1900,00	1940,00	1975,00
Plastificante	37,00	40,00	41,25	42,63	43,38	44,25	45,00	45,75	46,63	47,50	48,50	49,38
Água	444,00	400,00	379,50	358,05	347,00	336,30	324,00	311,10	298,40	285,00	271,60	256,75
Total	1961,00	2040,00	2070,75	2105,68	2125,38	2150,55	2169,00	2186,85	2210,03	2232,50	2260,10	2281,13
a/c	0,30	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13
<b>Consumo (em volume)</b>												
Materiais	Consumo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )											
Cimento	0,523	0,565	0,583	0,602	0,613	0,625	0,636	0,647	0,659	0,671	0,686	0,698
Plastificante	0,035	0,038	0,039	0,040	0,041	0,042	0,042	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047
Água	0,444	0,400	0,380	0,358	0,347	0,336	0,324	0,311	0,298	0,285	0,272	0,257
Total	1,002	1,003	1,001	1,001	1,001	1,003	1,002	1,001	1,001	1,001	1,003	1,001
a/c	0,892	0,751	0,694	0,638	0,609	0,581	0,553	0,524	0,496	0,471	0,440	0,411
Produção:												
Materiais	Produção de 1 litro de pasta (kg/1 l)											
Cimento	1,480	1,600	1,650	1,705	1,735	1,770	1,800	1,830	1,865	1,900	1,940	1,975
Plastificante	0,037	0,040	0,041	0,043	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048	0,049	0,049
Água	0,444	0,400	0,380	0,358	0,347	0,336	0,324	0,311	0,298	0,285	0,272	0,257
Total	1,961	2,040	2,071	2,106	2,125	2,151	2,169	2,187	2,210	2,233	2,260	2,281
<b>a/c REAL</b>	0,316	0,266	0,246	0,226	0,216	0,206	0,196	0,186	0,176	0,166	0,156	0,146
M (kg)	0,843	0,841	0,841	0,840	0,837	0,833	0,849	0,840	0,843	0,853	0,831	0,825
V (m <sup>3</sup> )	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Vc (m <sup>3</sup> )	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
u	0,738	0,676	0,649	0,625	0,617	0,611	0,568	0,572	0,554	0,521	0,549	0,547
Φ	0,575	0,597	0,606	0,615	0,619	0,621	0,638	0,636	0,644	0,657	0,646	0,646

Fonte: Autoria própria (2015)

Tabela A.2 - - Densidade de empacotamento do Cimento CPV

CP V 03/09/2013

Temperatura da sala (°C)	19,5											
Massa específica do cimento (kg/m <sup>3</sup> )	3098											
Massa específica do superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	1060											
% Aditivo sobre massa do CPV	5											
<b>Consumo (em massa)</b>												
Pasta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Materiais	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )											
Cimento	1550,00	1680,00	1735,00	1800,00	1830,00	1860,00	1900,00	1940,00	1980,00	2015,00	2055,00	2100,00
Plastificante	38,75	42,00	43,38	45,00	45,75	46,50	47,50	48,50	49,50	50,38	51,38	52,50
Água	465,00	420,00	399,05	378,00	366,00	353,40	342,00	329,80	316,80	302,25	287,70	273,00
Total	2053,75	2142,00	2177,43	2223,00	2241,75	2259,90	2289,50	2318,30	2346,30	2367,63	2394,08	2425,50
a/c	0,30	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13
<b>Consumo (em volume)</b>												
Materiais	Consumo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )											
Cimento	0,500	0,542	0,560	0,581	0,591	0,600	0,613	0,626	0,639	0,650	0,663	0,678
Plastificante	0,037	0,040	0,041	0,042	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048	0,048	0,050
Água	0,465	0,420	0,399	0,378	0,366	0,353	0,342	0,330	0,317	0,302	0,288	0,273
Total	1,002	1,002	1,000	1,001	1,000	0,998	1,000	1,002	1,003	1,000	0,999	1,000
a/c	0,977	0,822	0,760	0,698	0,667	0,636	0,605	0,574	0,543	0,530	0,510	0,490
Produção:												
Materiais	Produção de 1 litro de pasta (kg/1 l)											
Cimento	1,550	1,680	1,735	1,800	1,830	1,860	1,900	1,940	1,980	2,015	2,055	2,100
Plastificante	0,039	0,042	0,043	0,045	0,046	0,047	0,048	0,049	0,050	0,050	0,051	0,053
Água	0,465	0,420	0,399	0,378	0,366	0,353	0,342	0,330	0,317	0,302	0,288	0,273
Total	2,054	2,142	2,177	2,223	2,242	2,260	2,290	2,318	2,346	2,368	2,394	2,426
<b>a/c REAL</b>	0,316	0,266	0,246	0,226	0,216	0,206	0,196	0,186	0,176	0,166	0,156	0,146
M (kg)	0,824	0,830	0,850	0,860	0,870	0,879	0,886	0,887	0,885	0,888	0,881	0,806
V (m <sup>3</sup> )	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V <sub>c</sub> (m <sup>3</sup> )	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
u	0,946	0,859	0,786	0,737	0,704	0,672	0,646	0,630	0,620	0,608	0,603	0,753
φ	0,514	0,538	0,560	0,576	0,587	0,598	0,608	0,613	0,617	0,622	0,625	0,570

Fonte: Autoria própria (2015)

Tabela A.3 - - Densidade de empacotamento - Pó de Quartzo

Pó de Quartzo		12/11/2013									
Temperatura da sala (°C)	23										
Massa específica do pó de quartzo (kg/m <sup>3</sup> )	2500										
Massa específica do superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	1060										
% Aditivo sobre massa de pó	5%										
<b>Consumo (em massa)</b>											
Pastas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Materiais	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )										
Pó	1530,00	1580,00	1605,00	1630,00	1658,00	1687,00	1715,00	1742,00	1775,00	1810,00	
Plastificante	38,25	39,50	40,13	40,75	41,45	42,18	42,88	43,55	44,38	45,25	
Água	351,90	331,80	321,00	309,70	298,44	286,79	274,40	261,30	248,50	235,30	
Total	1920,15	1951,30	1966,13	1980,45	1997,89	2015,97	2032,28	2046,85	2067,88	2090,55	
a/c	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	
<b>Consumo (em volume)</b>											
Materiais	Consumo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )										
Pó	0,612	0,632	0,642	0,652	0,663	0,675	0,686	0,697	0,710	0,724	
Plastificante	0,036	0,037	0,038	0,038	0,039	0,040	0,040	0,041	0,042	0,043	
Água	0,352	0,332	0,321	0,310	0,298	0,287	0,274	0,261	0,249	0,235	
Total	1,000	1,001	1,001	1,000	1,001	1,001	1,001	0,999	1,000	1,002	
a/c	0,613	0,563	0,538	0,513	0,488	0,463	0,438	0,413	0,388	0,363	
<b>Produção:</b>											
Materiais	Produção de 1 litro de pasta (kg/l)										
Pó	1,530	1,580	1,605	1,630	1,658	1,687	1,715	1,742	1,775	1,810	
Plastificante	0,038	0,040	0,040	0,041	0,041	0,042	0,043	0,044	0,044	0,045	
Água	0,352	0,332	0,321	0,310	0,298	0,287	0,274	0,261	0,249	0,235	
Total	1,920	1,951	1,966	1,980	1,998	2,016	2,032	2,047	2,068	2,091	
<b>a/c REAL</b>	0,246	0,226	0,216	0,206	0,196	0,186	0,176	0,166	0,156	0,146	
M (kg)	0,712	0,724	0,727	0,727	0,732	0,740	0,757	0,769	0,760	0,750	
V (m <sup>3</sup> )	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	
Vc (m <sup>3</sup> )	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	
U	0,720	0,665	0,646	0,626	0,606	0,576	0,529	0,491	0,496	0,503	
Φ	0,581	0,601	0,608	0,615	0,623	0,634	0,654	0,671	0,668	0,665	

Fonte: Autoria própria (2015)



Tabela A.4 - - Densidade de empacotamento da Sílica Ativa

Silica Ativa		22/10/2013														
Temperatura da sala (°C)	22															
Massa específica da sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	2220															
Massa específica do superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	1060															
% Aditivo sobre massa da sílica ativa	5%															
<b>Consumo (em massa)</b>																
Pasta:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Materiais	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )															
Sílica	1082,00	1144,00	1214,00	1290,00	1380,00	1420,00	1460,00	1485,00	1505,00	1530,00	1555,00	1580,00	1605,00	1630,00	1655,00	
Plastificante	27,05	28,60	30,35	32,25	34,50	35,50	36,50	37,13	37,63	38,25	38,88	39,50	40,13	40,75	41,38	
Água	486,90	457,60	424,90	387,00	345,00	326,60	306,60	297,00	285,95	275,40	264,35	252,80	240,75	228,20	215,15	
Total	1595,95	1630,20	1669,25	1709,25	1759,50	1782,10	1803,10	1819,13	1828,58	1843,65	1858,23	1872,30	1885,88	1898,95	1911,53	
a/sólidos	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	
<b>Consumo (em volume)</b>																
Materiais	Consumo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )															
Sílica	0,487	0,515	0,547	0,581	0,622	0,640	0,658	0,669	0,678	0,689	0,700	0,712	0,723	0,734	0,745	
Plastificante	0,026	0,027	0,029	0,030	0,033	0,033	0,034	0,035	0,035	0,036	0,037	0,037	0,038	0,038	0,039	
Água	0,487	0,458	0,425	0,387	0,345	0,327	0,307	0,297	0,286	0,275	0,264	0,253	0,241	0,228	0,215	
Total	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	1,000	0,999	1,001	0,999	1,001	1,001	1,002	1,002	1,001	1,000	
a/sólidos	1,033	0,922	0,811	0,700	0,590	0,545	0,500	0,478	0,456	0,434	0,411	0,389	0,367	0,345	0,323	
<b>Produção:</b>																
Materiais	Produção de 1 litro de pasta (kg/1 l)															
Sílica	1,082	1,144	1,214	1,290	1,380	1,420	1,460	1,485	1,505	1,530	1,555	1,580	1,605	1,630	1,655	
Plastificante	0,027	0,029	0,030	0,032	0,035	0,036	0,037	0,037	0,038	0,038	0,039	0,040	0,040	0,041	0,041	
Água	0,487	0,458	0,425	0,387	0,345	0,327	0,307	0,297	0,286	0,275	0,264	0,253	0,241	0,228	0,215	
Total	1,596	1,630	1,669	1,709	1,760	1,782	1,803	1,819	1,829	1,844	1,858	1,872	1,886	1,899	1,912	
<b>a/sólidos REAL</b>	0,466	0,416	0,366	0,316	0,266	0,246	0,226	0,216	0,206	0,196	0,186	0,176	0,166	0,156	0,146	
M(kg)	0,600	0,616	0,610	0,601	0,588	0,569	0,561	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556	
V (m <sup>3</sup> )	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	
Vc (m <sup>3</sup> )	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	
U	1,134	1,008	0,955	0,923	0,913	0,922	0,934	0,932	0,932	0,935	0,923	0,923	0,921	0,925	0,930	
Φ	0,469	0,498	0,511	0,523	0,532	0,523	0,524	0,524	0,528	0,529	0,529	0,529	0,523	0,523	0,522	

Fonte: Autoria própria (2015)

## **APÊNDICE B**

Resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão

Tabela B.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, tração na flexão e tração diametral - CPIV

Tipo de cimento	Ensaio	Fibra	Idade	Cura	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
CPIV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Úmida	66,30	60,20	58,90	55,40	67,30	68,10	62,70	5,24
CPIV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Úmida	67,10	67,90	66,80	69,30	69,60	78,30	69,83	4,30
CPIV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Úmida	69,80	69,40	72,30	70,10	67,30	71,20	70,02	1,70
CPIV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Úmida	77,9	49,4	71,7	75,2	84,7	64,4	70,55	12,35
CPIV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Térmica	68,50	68,90	69,00	71,80	71,20	74,40	70,63	2,28
CPIV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Térmica	71,20	71,70	74,30	73,70	80,10	88,70	76,62	6,72
CPIV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Térmica	89,00	91,20	89,80	94,00	93,10	99,70	92,80	3,88
CPIV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Térmica	106,6	102,4	90,8	105,3	95,3	80,7	96,85	9,97
CPIV	Compressão	Com fibra	3 dias	Úmida	71,30	70,00	68,70	69,10	69,80	70,20	69,85	0,91
CPIV	Compressão	Com fibra	7 dias	Úmida	70,30	74,50	78,90	78,40	69,10	78,30	74,92	4,35
CPIV	Compressão	Com fibra	14 dias	Úmida	85,1	92,7	84,8	98,3	85,1	75,2	86,87	7,89
CPIV	Compressão	Com fibra	28 dias	Úmida	65,0	56,3	71,9	84,0	93,0	104,7	79,15	18,13
CPIV	Compressão	Com fibra	3 dias	Térmica	68,40	66,70	68,70	69,10	67,00	68,00	67,98	0,95
CPIV	Compressão	Com fibra	7 dias	Térmica	72,30	78,50	79,60	81,20	76,90	88,70	79,53	5,42
CPIV	Compressão	Com fibra	14 dias	Térmica	84,50	87,90	78,90	77,40	60,90	96,20	80,97	11,94
CPIV	Compressão	Com fibra	28 dias	Térmica	116,2	96,2	95,7	109,6	91,0	75,0	97,28	14,49
CPIV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Úmida	18,7	18,4	19,1	16,9	17,9	17,4	18,07	0,83
CPIV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Térmica	19,4	19,1	17,8	18,9	20,2	16,9	18,72	1,18
CPIV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Úmida	13,6	14,1	13,7	12,9	15,1	13,20	13,77	1,90
CPIV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Térmica	19,8	21,2	19,6	18,2	21,4	24,2	20,73	2,06
CPIV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Úmida	19,00	18,80	18,60	19,10	18,50	18,10	18,68	0,37
CPIV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Térmica	19,20	19,10	18,60	18,90	20,40	21,60	19,63	1,14
CPIV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Úmida	18,4	17,5	17,6	18,4	19,1	18,5	18,25	0,60
CPIV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Térmica	19,3	19,5	19,7	21,9	20,9	22,4	20,62	1,32
CPIV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Autoclave 1	29,70	31,10	31,60	27,98	32,89	29,87	30,52	1,71
CPIV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Autoclave 1	35,00	36,50	33,00	35,00	35,60	37,80	35,48	1,62
CPIV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Autoclave 1	41,20	39,00	42,00	38,00	40,00	38,00	39,70	1,67
CPIV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 1	42,00	41,00	39,00	38,00	44,00	45,98	41,66	3,01
CPIV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Autoclave 2	29,80	32,00	30,80	33,20	30,00	29,00	30,80	1,55
CPIV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Autoclave 2	36,00	36,10	38,00	37,00	37,10	35,87	36,68	0,83
CPIV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Autoclave 2	39,00	41,50	42,30	39,90	41,50	38,09	40,38	1,65
CPIV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 2	44,10	46,10	44,87	44,00	49,10	43,98	45,36	2,01
CPIV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Autoclave 3	33,00	33,66	33,87	36,90	37,01	33,00	34,57	1,88
CPIV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Autoclave 3	44,87	39,08	41,00	42,13	42,89	42,98	42,16	1,97
CPIV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Autoclave 3	43,90	44,09	46,98	40,98	44,76	40,87	43,60	2,34

CPIV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 3	49,76	48,76	51,09	49,87	49,80	52,30	50,26	1,24
Tipo de cimento	Ensaio	Fibra	Idade	Cura	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
CPIV	Compressão	Com fibra	3 dias	Autoclave 1	28,00	30,00	27,90	26,40	24,78	24,98	27,01	2,01
CPIV	Compressão	Com fibra	7 dias	Autoclave 1	31,00	29,80	28,90	27,80	30,90	31,70	30,02	1,47
CPIV	Compressão	Com fibra	14 dias	Autoclave 1	45,98	43,87	44,87	40,10	45,60	44,90	44,22	2,14
CPIV	Compressão	Com fibra	28 dias	Autoclave 1	51,00	50,90	52,30	53,60	49,09	48,90	50,97	1,82
CPIV	Compressão	Com fibra	3 dias	Autoclave 2	27,90	26,90	29,80	25,40	25,90	28,90	27,47	1,72
CPIV	Compressão	Com fibra	7 dias	Autoclave 2	33,00	28,99	27,90	31,00	32,98	29,80	30,61	2,10
CPIV	Compressão	Com fibra	14 dias	Autoclave 2	45,60	41,98	45,10	43,50	43,98	44,02	44,03	1,27
CPIV	Compressão	Com fibra	28 dias	Autoclave 2	52,00	49,00	54,00	51,09	50,09	49,00	50,86	1,94
CPIV	Compressão	Com fibra	3 dias	Autoclave 3	34,00	35,60	32,80	33,90	33,60	38,90	34,80	2,21
CPIV	Compressão	Com fibra	7 dias	Autoclave 3	41,09	40,87	40,61	43,50	44,87	45,09	42,67	2,07
CPIV	Compressão	Com fibra	14 dias	Autoclave 3	54,76	52,09	52,98	50,01	52,09	54,15	52,68	1,70
CPIV	Compressão	Com fibra	28 dias	Autoclave 3	60,00	58,70	58,00	60,00	61,00	62,00	59,95	1,46
CPIV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 1	18,70	18,40	19,10	16,90	17,90	17,40	18,07	0,83
CPIV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 2	19,40	19,10	17,80	18,90	20,20	16,90	18,72	1,18
CPIV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 3	19,40	19,10	17,80	18,90	20,20	16,90	18,72	1,18
CPIV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Autoclave 1	18,70	18,40	19,10	16,90	17,90	17,40	18,07	0,83
CPIV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Autoclave 2	19,40	19,10	17,80	18,90	20,20	16,90	18,72	1,18
CPIV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Autoclave 3	19,40	19,10	17,80	18,90	20,20	16,90	18,72	1,18
CPIV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Autoclave 1	17,61	18,80	18,91	19,10	19,65	15,21	18,21	1,62
CPIV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Autoclave 2	18,90	17,40	20,12	18,90	16,98	18,54	18,47	1,14
CPIV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Autoclave 3	19,20	19,10	18,37	18,90	19,21	20,10	19,15	0,56
CPIV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Autoclave 1	16,80	17,50	18,20	18,40	17,20	17,79	17,65	0,61
CPIV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Autoclave 2	17,32	16,98	19,70	18,65	16,90	18,40	17,99	1,11
CPIV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Autoclave 3	17,81	18,40	17,20	16,32	19,10	21,60	18,41	1,84

Fonte: Autoria própria (2015)

Tabela B.2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, tração na flexão e tração diametral - CPV

Tipo de cimento	Ensaio	Fibra	Idade	Cura	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
CPV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Úmida	55,80	88,70	90,80	72,30	60,80	87,90	71,87	8,69
CPV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Úmida	44,10	90,83	106,83	73,20	94,09	86,46	88,53	1,19
CPV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Úmida	113,14	141,80	88,04	122,40	127,35	85,62	103,77	26,21
CPV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Úmida	87,57	83,09	81,20	94,14	90,20	104,93	87,44	27,66
CPV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Térmica	80,90	78,90	77,60	60,90	62,30	70,60	71,87	8,69
CPV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Térmica	90,10	89,40	88,70	86,70	88,50	87,80	88,53	1,19
CPV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Térmica	109,30	130,82	81,93	109,98	63,57	127,03	103,77	26,21
CPV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Térmica	101,77	122,88	52,31	102,35	87,99	57,31	87,44	27,66
CPV	Compressão	Com fibra	3 dias	Úmida	95,14	73,88	77,80	66,50	69,80	81,20	77,39	10,18
CPV	Compressão	Com fibra	7 dias	Úmida	86,51	81,72	83,20	72,20	59,94	80,09	77,28	9,74
CPV	Compressão	Com fibra	14 dias	Úmida	65,46	48,57	84,25	66,10	55,31	55,94	62,61	12,52
CPV	Compressão	Com fibra	28 dias	Úmida	76,94	100,77	83,72	64,73	111,67	96,62	89,08	17,16
CPV	Compressão	Com fibra	3 dias	Térmica	81,30	80,90	78,50	77,10	75,40	76,40	78,27	2,42
CPV	Compressão	Com fibra	7 dias	Térmica	107,46	136,98	109,77	109,98	109,67	125,67	116,59	12,00
CPV	Compressão	Com fibra	14 dias	Térmica	49,78	62,46	86,93	87,36	126,40	77,94	81,81	26,31
CPV	Compressão	Com fibra	28 dias	Térmica	86,30	75,30	92,93	99,72	72,83	85,93	85,50	10,23
CPV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Úmida	19,65	20,15	19,51	19,44	21,84	19,82	20,07	0,90
CPV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Térmica	26,92	28,74	26,64	29,09	27,91	28,24	27,92	0,98
CPV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Úmida	19,7	19,49	15,16	17,18	16,78	14,72	17,17	1,90
CPV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Térmica	24,92	23,96	24,78	25,39	24,69	27,68	25,24	1,28
CPV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Úmida	21,12	20,60	23,40	23,60	25,40	23,80	22,99	1,80
CPV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Térmica	22,30	22,80	23,10	24,50	25,10	24,90	23,78	1,19
CPV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Úmida	19,8	17,4	16,8	19,2	16,3	18,9	18,07	1,43
CPV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Térmica	19,2	18,9	18,5	19,8	20,1	20,4	19,48	0,74
CPV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Autoclave 1	30,10	31,10	31,60	32,20	32,89	33,40	31,88	1,21
CPV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Autoclave 1	37,30	36,50	37,00	35,00	35,60	37,80	36,53	1,06
CPV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Autoclave 1	41,20	40,40	42,00	42,00	40,00	39,00	40,77	1,19
CPV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 1	46,00	48,00	45,00	46,00	50,00	46,00	46,83	1,83
CPV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Autoclave 2	31,00	32,00	31,60	34,00	30,00	29,00	31,27	1,73
CPV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Autoclave 2	36,00	35,00	38,00	37,00	37,00	36,50	36,58	1,02
CPV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Autoclave 2	40,00	41,00	42,30	40,00	41,50	38,00	40,47	1,50
CPV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 2	45,00	47,00	45,00	44,00	49,00	47,00	46,17	1,83
CPV	Compressão	Sem fibra	3 dias	Autoclave 3	33,00	33,66	32,01	36,90	37,01	36,00	34,76	2,15
CPV	Compressão	Sem fibra	7 dias	Autoclave 3	40,00	39,08	41,00	42,09	42,89	43,02	41,35	1,60
CPV	Compressão	Sem fibra	14 dias	Autoclave 3	51,00	52,01	51,09	53,40	49,87	51,20	51,43	1,18
CPV	Compressão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 3	66,98	69,90	67,98	65,98	66,87	68,09	67,63	1,36

Tipo de cimento	Ensaio	Fibra	Idade	Cura	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
CPV	Compressão	Com fibra	3 dias	Autoclave 1	34,50	35,70	33,40	36,70	35,80	39,00	35,85	1,92
CPV	Compressão	Com fibra	7 dias	Autoclave 1	45,00	43,00	54,00	55,00	57,00	41,00	49,17	6,94
CPV	Compressão	Com fibra	14 dias	Autoclave 1	56,00	61,00	60,00	57,00	58,00	62,00	59,00	2,37
CPV	Compressão	Com fibra	28 dias	Autoclave 1	61,00	67,00	60,00	59,00	61,00	68,00	62,67	3,83
CPV	Compressão	Com fibra	3 dias	Autoclave 2	33,00	34,56	34,00	34,98	31,00	29,00	32,76	2,32
CPV	Compressão	Com fibra	7 dias	Autoclave 2	44,90	45,67	43,01	54,00	58,00	49,00	49,10	5,83
CPV	Compressão	Com fibra	14 dias	Autoclave 2	55,00	59,00	62,00	56,89	59,09	64,00	59,33	3,28
CPV	Compressão	Com fibra	28 dias	Autoclave 2	62,70	68,00	61,00	60,00	69,00	66,90	64,60	3,85
CPV	Compressão	Com fibra	3 dias	Autoclave 3	34,00	33,56	34,78	37,80	41,00	43,67	37,47	4,14
CPV	Compressão	Com fibra	7 dias	Autoclave 3	57,09	54,89	55,90	58,09	56,70	55,08	56,29	1,23
CPV	Compressão	Com fibra	14 dias	Autoclave 3	62,00	61,09	64,98	65,09	60,80	63,40	62,89	1,89
CPV	Compressão	Com fibra	28 dias	Autoclave 3	76,00	70,10	71,70	75,20	79,00	69,00	73,50	3,86
CPV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 1	18,90	18,40	18,70	15,60	17,90	19,00	18,08	1,28
CPV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 2	18,90	19,10	16,80	15,69	19,00	16,00	17,58	1,60
CPV	Tração na flexão	Sem fibra	28 dias	Autoclave 3	21,00	19,10	23,00	18,90	24,00	26,00	22,00	2,83
CPV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Autoclave 1	18,70	17,00	16,00	16,90	17,90	16,00	17,08	1,06
CPV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Autoclave 2	16,00	18,00	17,80	18,90	16,00	15,00	16,95	1,50
CPV	Tração na flexão	Com fibra	28 dias	Autoclave 3	19,40	19,10	17,80	18,90	20,20	19,00	19,07	0,78
CPV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Autoclave 1	17,00	16,00	18,60	15,00	18,50	17,00	17,02	1,40
CPV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Autoclave 2	19,20	19,10	18,60	18,90	19,00	21,60	19,40	1,10
CPV	Tração diametral	Sem fibra	28 dias	Autoclave 3	24,00	19,10	22,00	18,90	21,00	23,00	21,33	2,07
CPV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Autoclave 1	16,00	17,50	17,60	15,80	16,00	15,00	16,32	1,02
CPV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Autoclave 2	19,30	19,50	19,70	18,00	17,00	17,90	18,57	1,09
CPV	Tração diametral	Com fibra	28 dias	Autoclave 3	19,20	19,10	18,60	18,00	20,40	19,00	19,05	0,79

Fonte: Autoria própria (2015)