

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JENNIFER STEPHANE OZELAME

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM E SEM ADIÇÃO DE FIBRAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2017

JENNIFER STEPHANE OZELAME

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM E SEM ADIÇÃO DE FIBRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim

TOLEDO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 094

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM E SEM ADIÇÃO DE FIBRAS

por

JENNIFER STEPHANE OZELAME

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:10 h do dia **08 de novembro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Me. Gladis Cristina Furlan
(UTFPR – TD)

Prof. Me. Patrícia Cristina Steffen
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

À meus pais Claudinei Ozelame e Cristina Ozelame e à meu irmão Jhonatan Ozelame, que com muito carinho e paciência, não mediram esforços para que eu completasse mais esta etapa da minha vida.

À Lucas Cechim, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR por ter me dado a chance e todas as ferramentas que permitiram chegar hoje ao final deste ciclo de maneira satisfatória.

Agradeço a todos os professores que me acompanharam durante a graduação. Em especial ao Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim e Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra, pelas orientações, correções e incentivos. Também ao Prof. Dr. Gustavo Savaris pela ajuda que forneceu para que este trabalho fosse concluído com o êxito esperado.

Agradeço a Universidade Paranaense – UNIPAR campus Toledo pelo empréstimo da prensa de compressão, fundamental para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado que dispões de seu tempo para contribuir em todo o desenvolvimento deste trabalho, ajudando-me fisicamente e mentalmente, com muito amor e tranquilidade.

À minha família e amigos que foram válvulas de escape e entretenimento quando estava sufocada pela cotidiano.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

“Alguns homens veem as coisas como são, e dizem: ‘Por quê?’. Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Por que não?’” (SHAW, George Bernard).

RESUMO

OZELAME, Jennifer Stephane. **Análise experimental da resistência à compressão do concreto de pós reativos com e sem adição de fibras.** 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso 2 (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

A exigência de materiais com desempenho superior aos materiais correntes disponíveis no mercado da Engenharia Civil é a força motriz por trás de pesquisas que visam o desenvolvimento de novas tecnologias. Neste contexto, surgiu o Concreto de Pós Reativos (CPR), que se destacam, em questões de controle de qualidade, visto que a otimização na seleção dos materiais utilizados para sua confecção associada com um detalhado e rigoroso processo de tratamento de cura, garantem elevadas resistências à compressão e à tração, sendo estas superiores a de um concreto convencional. O presente trabalho teve como objetivo principal realizar uma análise experimental da resistência à compressão de CPRs com diferentes tipos e dosagens de fibras, utilizando materiais disponíveis no mercado brasileiro. Inicialmente, foi realizado um estudo de traços de CPR obtidos a partir de pesquisas de publicações encontradas na literatura, e o traço que obteve melhor resistência à compressão aos 28 dias foi utilizado para esta pesquisa. De posse do traço, foram confeccionados corpos de prova de CPR com dosagens de fibras nas proporções de: 0%, 0,5% e 1%. As fibras utilizadas foram de aço e polietileno. Além disso, foi confeccionado um traço de concreto convencional, dosado segundo o método da ABCP. Os modelos de CPR tiveram cura térmica a vapor por 72 horas e deram continuidade à cura submersos em água até as idades de ensaio. As amostras de concreto convencional tiveram cura diretamente em água até as idades de ensaio. O ensaio realizado foi o de resistência à compressão uniaxial, de acordo com a NBR 5739/2007, nas idades de 3, 14 e 28 dias. Com os resultados, verificou-se a que os concretos de pós reativos possuem um desempenho melhor de resistência à compressão que o concreto convencional. Além disso, pode-se verificar a influência da dosagem das fibras na ruptura do concreto referente aos planos de ruptura observados, bem como, o comportamento de cada fibra e resistências residuais conferidas pelas mesmas após o colapso.

Palavras-chave: Concreto de pós reativos. Fibras de polietileno. Fibras de aço.

ABSTRACT

OZELAME, Jennifer Stephane. **Experimental analysis of the compressive strength of reactive powders concrete with and without fiber addition**. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso 2 (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

The requirement of materials with performance superior to the current materials available in the Civil Engineering market is the motor force behind researches that aim at the development of new technologies. In this context, Reactive Powder Concrete (RPC) emerged, which stands out in questions of quality control, since the optimization in the selection of the materials used for its preparation associated with a detailed and rigorous process of cure treatment, ensure high compressive and tensile strengths, which are higher than a conventional concrete. The present research had as main objective to perform an experimental analysis of the compressive strength of RPCs with different types and dosages of fibers, using materials available in the Brazilian market. Initially, a study of RPC traces obtained from researches of publications found in the literature was performed, and the trace that obtained the best compressive strengths at 28 days was used for this research. With the trace, CPR test specimens with fiber dosages were made in the proportions of: 0%, 0.5% and 1%. The fibers used were steel and polyethylene. In addition, a trace of conventional concrete was prepared according to the Brazilian Portland Cement Association (BPCA) method. The RCP models were vapor cured for 72 hours and continued to cure submerged in water up to the test ages. Conventional concrete samples were directly cured in water up to the test ages. The test was the uniaxial compression strength, according to Brazilian norm NBR 5739/2007, at the ages of 3, 14 and 28 days. With the results, it has been found that reactive dusts have a better compressive strength performance than conventional concrete. Furthermore, it is possible to verify the influence of the fiber dosage on the rupture of the concrete according to the rupture planes observed, such as the behavior of each fiber and residual resistances conferred by them after collapse.

Keywords: Reactive powders concretes. Polyethylene fibers. Steel fibers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação de tamanho dos agregados em um CC e em um CPR.....	18
Figura 2 - Passarela Sherbrooke em Quebec, Canadá.....	22
Figura 3 - Ponte de pedestres em Seoul, Coréia do Sul.....	23
Figura 4 - Materiais utilizados para o CPR.....	25
Figura 5 - Fibras de aço utilizadas para o CPRF.....	25
Figura 6 - Fibras de polietileno utilizadas para a confecção do CPRF.....	26
Figura 7 - Materiais utilizados para a confecção do Concreto Convencional.....	27
Figura 8 - Misturador de argamassa utilizado na pesquisa.....	28
Figura 9 - Homogeneização dos materiais secos.....	30
Figura 10 - Fluidificação da mistura.....	31
Figura 11 - Corpos de prova de 5x10 cm.....	31
Figura 12 - Moldagem dos corpos de prova.....	32
Figura 13 - Câmara de cura térmica.....	33
Figura 14 - Painel de controle de temperatura.....	33
Figura 15 - Grelha fixada na câmara de cura.....	34
Figura 16 - Corpos de prova no interior da câmara.....	34
Figura 17 - Corpos de prova em condição de cura submersa em água.....	35
Figura 18 - Prensa de compressão.....	36
Figura 19 - Fator água/cimento pela curva de Abrams.....	38
Figura 20 - Concreto convencional na betoneira.....	41
Figura 21 - Tronco de Cone para Slump Test.....	41
Figura 22 - Execução do ensaio de abatimento do concreto.....	42
Figura 23 - Adensamento dos corpos de prova.....	42
Figuras 24 (a) e (b) - Ruptura de corpos de prova no ensaio de compressão uniaxial.....	44
Figura 25 - Análise comparativa das resistências à compressão com cura submersa em água.....	45
Figura 26 - Análise comparativa das resistências à compressão com cura em estufa.....	45
Figura 27 - Resistência à compressão dos dias de ruptura.....	47
Figuras 28 (a) (b) e (c) – Planos de ruptura CPRs.....	49
Figuras 29 (a), (b) e (c) – Vazios nos CPR.....	50
Figura 30 - Gráfico gerado para corpos de prova sem adição de fibras.....	51
Figura 31 - Gráfico gerado para corpos de prova com fibras de aço.....	52
Figura 32 - Gráfico gerado para corpos de prova com fibras de polietileno.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dosagem de traços de CPR de referência.....	27
Tabela 2 – Dosagem de traços de CPR ajustados.....	29
Tabela 3 - Massa específica dos materiais utilizados.....	37
Tabela 4 - Consumo de água do concreto	38
Tabela 5 - Volume compactado de brita.....	39
Tabela 6 - Resistência à compressão com curas distintas	44
Tabela 7 - Resistência à compressão CPR e concreto convencional.....	46
Tabela 8 - Valores de Ψ_6	54
Tabela 9 - Mínimas resistências dos concretos e $f_{ck_{est}}$ aos 28 dias	54

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Ca	Consumo de água
CAD	Concreto de Alto Desempenho
Cb	Consumo de brita
Cc	Consumo de cimento
CC	Concreto Convencional
cm	Centímetro
Cm	Consumo de agregado miúdo
CP I	Cimento Portland comum
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPR	Concreto de Pós Reativos
CPRF	Concreto de Pós Reativos reforçado com Fibras
DMC	Dimensão máxima característica
f_i	Menor valor de resistência entre as resistências selecionadas dos exemplares
FA	Fibra de aço
FP	Fibra de polietileno
fcj	Resistência de dosagem do concreto
fck	Resistência característica do concreto
fck_{est}	Resistência característica estimada do concreto
kg/m ³	Quilo gramas por metro cúbico
kN	Quilo Newton
mm	Milímetro
m ³	Metros cúbicos
MF	Módulo de finura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
S/F	Sem fibras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Unipar	Universidade Paranaense
µm	Mícron
° C	Graus Celsius
%	Percentual
γ	Massa específica
Ψ ₆	Constante para controle do concreto em função do número de exemplares

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS.....	16
2.2 REQUISITOS BÁSICOS PARA OS CONSTITUINTES E DOSAGEM DO CPR.....	17
2.3 PROCEDIMENTO DE PREPARO E CURA	21
2.4 APLICAÇÕES DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 MATERIAIS.....	24
3.1.1 Produção do Concreto de Pós Reativos.....	24
3.1.2 Produção do Concreto Convencional	26
3.2 MÉTODOS.....	27
3.2.1 Estudo do traço do Concreto de Pós Reativos.....	27
3.2.2 Produção de Concreto de Pós Reativos com e sem adição de Fibras.....	30
3.2.3 Produção do Concreto Convencional	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 ESTUDO DE TRAÇOS DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS	44
4.2 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS E CONCRETO CONVENCIONAL.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	56
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais utilizados para fins estruturais na Engenharia Civil. É amplamente dominado e bem utilizado, uma vez que possui baixo custo de materiais e mão de obra, bem como, é uma ótima opção para construções dos mais variados tipos (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011). Além disso, a grande aceitação do concreto como material estrutural vai além de suas propriedades mecânicas, visto que apresenta aspectos de resistência ao fogo e resistência à penetração de água (NEVILLE; BROOKS, 2010).

O concreto convencional é um material composto por um meio aglomerante no qual são aglutinadas partículas de agregados. A areia e a brita constituem os agregados desta mistura, sendo classificados, respectivamente, como agregado miúdo e agregado graúdo. O cimento e água, por sua vez, formam o meio aglomerante (BAUER, 2008).

Devido a sua ampla utilização no setor da construção, exige-se, portanto, que ele se adapte às necessidades do mercado. Requer-se características superiores, principalmente em relação às suas resistências mecânicas, permitindo assim, executar construções cada vez mais esbeltas e com características de maior segurança, que em alguns casos não são supridas pelo concreto armado ou protendido (YI et al., 2012). Sendo assim, a busca por materiais de alta performance é a força motriz por trás do desenvolvimento de novos materiais (BAUER, 2008).

Neste contexto, o Concreto de Pós Reativos (CPR) é resultado de pesquisas que, ao longo dos anos, vem estabelecendo maneiras de suprir as demandas por materiais com desempenho superior aos materiais correntes disponíveis na indústria (YANG; JOH; KIM, 2010).

Os CPRs são constituídos basicamente por cimento Portland, sílica ativa, areia de quartzo, pó de quartzo, água e superplastificante (ZBED, 2013). Desta forma, por serem constituídos de materiais com granulometria fina e com exclusão do agregado graúdo, estes concretos justificam ser chamados de concretos de pós reativos. Todavia, alguns autores, como Coppola et al. (1997) e Maroliya (2012), consideram o CPR, sob o ponto de vista granulométrico, uma argamassa e não um concreto. No entanto, como as propriedades verificadas são as mesmas do concreto, em grau muito mais elevado, o termo concreto prevaleceu em função do desempenho deste material.

Os CPRs são definidos como concretos que apresentam uma relação água/cimento (a/c) baixa, quando comparada aos concretos comumente constituídos por cimento, areia, brita e água, podendo apresentar resistência à compressão de 150 a 810 MPa, assim sendo de três a

dezesseis vezes superior à resistência a compressão de um concreto convencional (RICHARD; CHEYREZY, 1995). Ademais, com incorporação de fibras, então denominado Concreto de Pós Reativos Reforçado com Fibras (CPRF), a ductilidade - definida por Callister (2008) como o grau de deformação plástica suportada do material até sua ruptura - é tipicamente trezentas vezes maior que a do concreto de alto desempenho (CAD) (WANG et al., 2015b).

Wang et al. (2015b) salienta que devido a elevada resistência à compressão garantida pelo CPR, as estruturas são muito mais leves se comparadas com estruturas de concreto convencional com a mesma carga, pesando apenas um terço ou metade destas. Esta redução de peso tem benefício na produção de estruturas mais esbeltas, aumentando, deste modo, o espaço útil em edifícios de grande altura e, conseqüentemente, proporcionando uma liberdade arquitetônica.

Referente a sua produção, esta tecnologia exige condições de cura à alta temperatura, de pelo menos 90° C, de acordo com Richard e Cheyreyzy (1995), e pressão em estado fresco, segundo Isaia, Helene e Tutikian (2011), a fim de diminuir ou eliminar os vazios da mistura. Embora estes procedimentos técnicos sejam benéficos para as propriedades mecânicas do CPR, podem resultar em baixa eficiência de produção e alto consumo de energia, sendo, portanto, de difícil aplicação em obras correntes, e inviável execução em canteiros de obras convencionais (WANG et al., 2015b).

Deste modo, são amplamente passíveis de implantação em indústrias de estruturas pré-fabricadas, as quais utilizam centrais dosadoras de concreto e há a possibilidade de criar-se as situações específicas de pressão e cura térmica, de modo a atingir as propriedades elevadas do concreto. Como exemplo de indústria nacional que já realiza cura térmica em seus pré-moldados, tem-se a Leonardi Pré-Moldados, em Atibaia – SP.

Ademais, o Concreto de Pós Reativos é tido na literatura científica internacional como uma inovação na área de materiais de construção civil. No entanto, no âmbito brasileiro, ainda carece de estudos e aplicações práticas. Com isso, este trabalho tem a finalidade de estudar a resistência à compressão deste material, reforçado com diferentes tipos e dosagens de fibras, de modo a contribuir para o estudo das resistências mecânicas do concreto com materiais nacionais e a notabilizar o compósito, visando aplicações desta tecnologia no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise experimental comparando a resistência à compressão de corpos de prova de concreto de pós reativos sem e com fibras metálicas e poliméricas à resistência do concreto convencional executado com cimento, areia, brita e água, utilizando materiais disponíveis no mercado nacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento de Concretos de Pós Reativos reforçados com diferentes tipos e dosagens de fibras;
- Comparar as resistências à compressão do CPR e CPRF com a resistência à compressão de um concreto convencional dosado pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland;
- Verificar se os resultados obtidos utilizando materiais disponíveis no mercado brasileiro são similares aos verificados na literatura referente.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Concreto de Pós Reativos é uma composto cimentício de avançada tecnologia. No entanto, ainda não adquiriu o destaque necessário no mercado da construção civil nacional.

Embora existam referências internacionais acerca dos CPRs, no Brasil, esta modalidade de material ainda é inacessível ou desconhecida à grande parte das empresas no âmbito da Engenharia Civil. Deste modo, justifica-se a necessidade de pesquisas referentes a esta tecnologia, visando suprir a carência de estudos com materiais nacionais, e permitindo assim, futuras aplicações deste concreto no Brasil.

Além disso, através desta análise experimental da resistência à compressão do CPR, com adição de diferentes fibras e em dosagens variadas, busca-se prover informações de modo que balizem o fornecimento de critérios de projeto de elementos estruturais moldados com CPR. Ressalta-se que a não existência de normalização nacional para este composto cimentício dificulta sua implementação e aplicação, devido à falta de padrões comumente aceitos e métodos de controle de qualidade em instalações de produção.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido em 5 capítulos.

No capítulo 1 é apresentado uma breve introdução do Concreto de Pós Reativos e qual sua importância no mercado frente ao concreto convencional. Além disso, são apontados os objetivos do desenvolvimento do trabalho e sua justificativa.

No capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica do Concreto de Pós Reativos, explicando suas características gerais, os requisitos básicos para os constituintes e dosagem do CPR, procedimento de preparo e cura e, por fim, aplicações do compósito.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, bem como a metodologia aplicada.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e realizada uma discussão referente aos mesmos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas do trabalho e sugestões para novas pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

Richard e Cheyrezy (1995) afirmam que para obter um comportamento mecânico de excelência, no preparo do CPR são necessários aspectos especiais relacionados às técnicas e matérias primas utilizadas, podendo ser citadas:

- a) Remoção do agregado graúdo a fim de atingir uma maior homogeneidade do concreto;
- b) Utilização de superplastificantes, sílica ativa e quartzo para atingir baixas relações entre água/cimento com a finalidade de reduzir a porosidade e visando maior empacotamento de partículas;
- c) Incorporação de fibras para melhorar a ductilidade do compósito;
- d) Utilização de pressão no concreto em estado fresco para eliminação de vazios e/ou ar aprisionado;
- e) Utilização de tratamento térmico para melhora na microestrutura do CPR durante o processo de cura.

Zbed (2013) concorda com os parâmetros descritos por Richard e Cheyrezy (1995) e afirma ainda que o princípio deste compósito cimentício é reduzir as adversidades do concreto convencional. Desta forma, o autor discorre que os principais aspectos relacionados à obtenção da alta resistência à compressão se deve a minimização da porosidade, a modificação da microestrutura da matriz cimentícia e ao aumento da homogeneidade física de seus constituintes.

A minimização da porosidade, de acordo com Zbed (2013), é obtida mediante a adoção de compostos com distribuição adequada de tamanho, otimizando o empacotamento dos materiais granulares. Além disso, a redução no fator água/cimento e a redução no teor de ar aprisionado, por meio de procedimentos de aplicação de vácuo ou pressão no concreto em estado fresco, também auxiliam nesta minimização de porosidade.

Ademais, Zbed (2013) cita a aplicação de curas térmicas. Estes procedimentos alteram a estrutura cimentícia, visto que intensificam as reações pozolânicas e conferem uma

modificação da microestrutura do concreto, potencializando as propriedades mecânicas do composto.

Isaia, Helene e Tutikian (2011) comentam que o aumento da homogeneidade física dos constituintes do CPR, por sua vez, é conferido devido a incorporação de partículas com granulometria fina, eliminando a zona de transição nas interfaces pastas/agregados graúdos, evitando as tensões de contato e possíveis falhas nesses locais.

Coppola et al. (1997) ressaltam que, a fim de melhorar a ductilidade e propriedades mecânicas do composto cimentício, o concreto pode ainda receber reforços de fibras. Vanderlei (2004) concorda com o exposto por Coppola et al. (1997), e ainda cita que para que isso ocorra, as fibras devem ter elevado módulo de elasticidade.

2.2 REQUISITOS BÁSICOS PARA OS CONTITUENTES E DOSAGEM DO CPR

Zbed (2013) cita que a obtenção da composição adequada de materiais é um dos inconvenientes verificados para execução do CPR. Isso se dá devido a dificuldade de determinar as proporções relativas entre os componentes com diferentes granulometrias. Isaia, Helene e Tutikian (2011) comentam que a seleção adequada dos materiais utilizados para o CPR é uma questão primordial, podendo influenciar as propriedades físicas e químicas do compósito.

O constituinte básico do concreto de pós reativo é o cimento que, segundo Zbed (2013), representa cerca de 30% do seu volume total. De acordo com Isaia, Helene e Tutikian (2011) é adequada a escolha de cimentos sem adições, como o CP I, que, no entanto, não é mais comercializado nacionalmente. Tem-se como alternativa próxima o CP V ARI, no entanto, Isaia, Helene e Tutikian (2011) ressaltam que este tipo de cimento é excessivamente fino, exigindo, deste modo, uma quantidade de água superior à mistura, porém, ainda dentro dos limites exigidos para o CPR.

Segundo Isaia, Helene e Tutikian (2011) a sílica ativa é utilizada para o CPR devido a forma bem arredondada de suas partículas, bem como ao tamanho dos grãos, sendo cerca de 100 vezes menores do que o cimento. Tanto para Isaia, Helene e Tutikian (2011) quanto para Zbed (2013), a função principal da sílica ativa é atuar como um microfíler e preencher os espaços vazios na zona de transição e entre agregados.

Chan e Chu (2004) concluíram que o teor ótimo de sílica/cimento estava entre 0,2 e 0,3. Richard e Cheyrezy (1995) recomendam para o CPR a relação de sílica/cimento de 0,25 -

dentro dos limites verificados por Chan e Chu (2004) - sendo esta proporção correspondente ao empacotamento ótimo e próxima da dosagem requerida para consumir o hidróxido de cálcio que resulta da total hidratação do cimento. No entanto, Richard e Cheyrezy (1995) destacam que a quantidade de sílica utilizada é superior à requerida pela reação pozolânica, e ressalta que o excesso exerce o efeito de preenchimento de vazios. Wang et al. (2015a), por sua vez, citam que a quantidade ótima de sílica ativa é altamente dependente do fator água/cimento. Deste modo, um baixo fator água/cimento exige uma menor quantidade de sílica na mistura.

Zbed (2013) menciona que os materiais utilizados como microagregados no concreto de pós reativos são a areia de quartzo e o pó de quartzo, a fim de conferir uma boa compacidade à mistura. Segundo Isaia, Helene e Tutikian (2011) a utilização de agregados oriundos do quartzo é recomendada, visto que possui propriedades superiores à rocha mãe, a qual apresenta elevada dureza e resistência à compressão. Zbed (2013) e Richard e Cheyrezy (1995) também ressaltam que o pó de quartzo apresenta uma reatividade quando submetido a altas temperaturas, o que ocorre durante a cura do CPR, elevando as resistências finais da mistura.

De modo a aumentar a homogeneidade e garantir um ótimo empacotamento entre as partículas, Richard e Cheyrezy (1995) afirmam que o tamanho máximo de partícula de areia é limitado a 600 μm , e para o valor mínimo, devem ser evitadas partículas abaixo de 150 μm . Para o pó de quartzo, por sua vez, o autor cita que a reatividade máxima durante o tratamento térmico é obtida para um tamanho médio de partícula entre 5 μm a 25 μm , possuindo tamanho médio da partícula usada para CPR de 10 μm , estando, portanto, na mesma classe granular do cimento.

A Figura 1 apresenta uma comparação de tamanho entre agregados de um concreto convencional e os agregados utilizados em um concreto de pós reativos.



Figura 1 - Comparação de tamanho dos agregados em um CC e em um CPR
Fonte: Adaptado de Zbed (2013).

Nota-se a nítida diferença de tamanho dos agregados utilizados para os tipos distintos de concreto, uma vez que o menor agregado utilizado para o concreto convencional (areia) possui tamanho superior ao maior agregado utilizado para o concreto de pós reativos (areia de quartzo).

Referente ao uso de superplastificantes, Dils, Boel e De Schutter (2013) recomendam o uso de superplastificantes compatíveis com os tipos de cimento utilizados. Neste sentido, superplastificantes a base de Éter Policarboxilato de cadeia longa são preferíveis, pois minimizam o retardamento da hidratação do cimento.

Wang et al. (2015a) ressaltam que o uso de superplastificante pode reduzir significativamente o fator água/cimento, ocasionando assim, uma redução da porosidade e aumento da resistência do concreto. Os autores ainda discorrem que o fator água/cimento típico para o CPR varia entre 0,14 e 0,20, enquanto que para o concreto convencional está em torno de 0,4 a 0,5. Deste modo, a utilização de um superplastificante compatível é um passo crítico para a produção de CPR de alta qualidade.

Vanderlei (2004) cita que as dosagens experimentais feitas com superplastificantes utilizam taxas de 1,5% a 2,5% do consumo do cimento em massa. Wang et al. (2015a) verifica que a adição progressiva do superplastificante à mistura aumenta notavelmente o efeito dispersante do mesmo e aumenta a fluidez do CPR, em comparação com sua adição única e direta.

Já as fibras, de acordo com Isaia, Helene e Tutikian (2011), são adicionadas à mistura para conferir ductilidade e resistência à tração e flexão, o que permite eliminar a armadura passiva. Yang (2008) apud Wang et al. (2015a), verificou que fibras de aço melhoraram significativamente as propriedades mecânicas do CPR, por outro lado, as fibras de polipropileno e vidro não melhoraram as propriedades mecânicas devido às suas baixas resistências. O autor ainda verificou que uma elevada quantidade de fibras aumentou a interação das fibras umas com as outras durante a mistura, causando a formação de bolhas e, conseqüentemente, diminuindo a trabalhabilidade da mistura e, por fim, os desempenhos mecânicos.

Richard e Cheyrezy (1995) recomendam que se deve limitar as dimensões das fibras, com comprimentos da ordem de 13 mm e diâmetro de 0,15 mm. Quanto a proporção, os autores recomendam a utilização de 1,5 a 3% do volume da mistura, sendo uma opção econômica a utilização de 2% do volume. Zbed (2013), entretanto, afirma que a fração volumétrica máxima de fibras, de modo a obter uma trabalhabilidade adequada da mistura, corresponde a 4% do volume de todo o compósito.

Hassan, Jones e Mahmud (2012), através de análises experimentais, concluíram que as fibras adicionadas ao CPRF melhoram a resistência à tração do concreto em até duas vezes àquela verificada no CPR. Em contraste, os autores verificaram que a sua influência na resistência à compressão e no módulo de elasticidade foi relativamente pequena, sendo a resistência à compressão do CPRF de 10 a 20% maior do que a do CPR, e o módulo de elasticidade de 6 a 10% superior ao CPR.

O mesmo foi verificado por Zbed (2013). No caso de materiais contendo 4% de fibras e tendo processo de cura em água e a vapor, a resistência à compressão aumentou cerca de 10% em relação aos materiais sem fibras. A maior progressão, cerca de 20%, pode ser observada quando os materiais foram submetidos a adição de 4% de fibras e aplicação de pressão de compressão.

Wang et al. (2015a) ainda prescrevem que a incorporação de fibras no concreto pode prevenir e controlar o início, propagação ou coalescência de fissuras. Quando uma carga atua sobre concreto reforçado com fibra, as fibras não sustentam a carga diretamente, mas a matriz a faz. A carga é transferida para as fibras através da interface entre as fibras e a matriz.

Ainda referente a adição de fibras utilizada nos concretos de pós reativos, Hassan, Jones e Mahmud (2012) comentam que o modo que as fibras são distribuídas e orientadas no concreto podem modificar a deformação suportada pelo CPRF tanto na compressão quanto tração. Barnett et al. (2010), em estudo realizado verificou que a fissuração inicial e as resistências máximas à flexão do CPR, quando as fibras foram colocadas paralelamente à direção longitudinal, foram, respectivamente, 5,5% e 61% maiores do que quando foram colocadas transversalmente.

2.3 PROCEDIMENTO DE PREPARO E CURA

Vanderlei (2004) cita que pela ausência de agregados graúdos, o qual auxilia na dispersão do cimento e outros finos no concreto convencional, é necessário um misturador forçado para auxiliar na dispersão dos pós. O autor ainda comenta que o tempo de mistura é indispensável para obter o CPR de qualidade constante.

Segundo Yang, Joh e Kim (2010), o ciclo de mistura do CPR deve obedecer a seguinte ordem: homogeneização dos materiais secos, fluidificação da pasta de cimento pela adição dos aditivos e da água de hidratação, e adição das fibras após homogeneização da pasta fluida.

De acordo com Hassan, Jones e Mahmud (2012), o procedimento de preparo do CPR e do CPRF difere-se apenas no momento da inserção das fibras no CPRF. Os autores discorrem que é necessário misturar inicialmente o cimento, a sílica ativa, o pó de quartzo e a areia de quartzo. Estes materiais devem ser misturados por 5 minutos antes de se adicionar à mistura o superplastificante previamente diluído em água. Em seguida, os materiais devem ser misturados por mais 10 minutos até que a mistura transforme-se em um concreto trabalhável.

Para o CPRF, por sua vez, Hassan, Jones e Mahmud (2012) afirmam que as fibras devem ser adicionadas lentamente, preferivelmente com as mãos, à massa de concreto. Após adicionadas, o concreto deve ser misturado por mais 2 minutos para assegurar a dispersão adequada das fibras. Yang, Joh e Kim (2010), entretanto, recomendam que após a adição das fibras à mistura fluida, deve-se realizar a mistura por mais 5 minutos.

Referente ao processo de cura, Vanderlei (2004) discorre que o efeito da cura térmica, quando adotada nas primeiras idades, melhora as propriedades térmicas do CPR pois conduz a uma melhor cristalização dos hidratos e ativação da reação pozolânica da sílica ativa.

Richard e Cheyrezy (1995) comentam que, em geral, o procedimento de cura térmica consiste em, após a desmoldagem, submeter os corpos de prova à cura com tratamento térmico por um período de 48 a 72 horas. Após esta exposição, os corpos de prova são curados à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ em câmara úmida.

Prem, Bharatkumar e Iyer (2013) verificaram em um estudo que as amostras curadas à 25°C por 28 dias apresentaram resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de 142 MPa, e amostras curadas por 48 horas a 200°C , e posteriormente a 25°C até a data do ensaio de compressão uniaxial aos 28 dias, mostraram resistência de 217 MPa, confirmando a influência da cura térmica na resistência à compressão uniaxial.

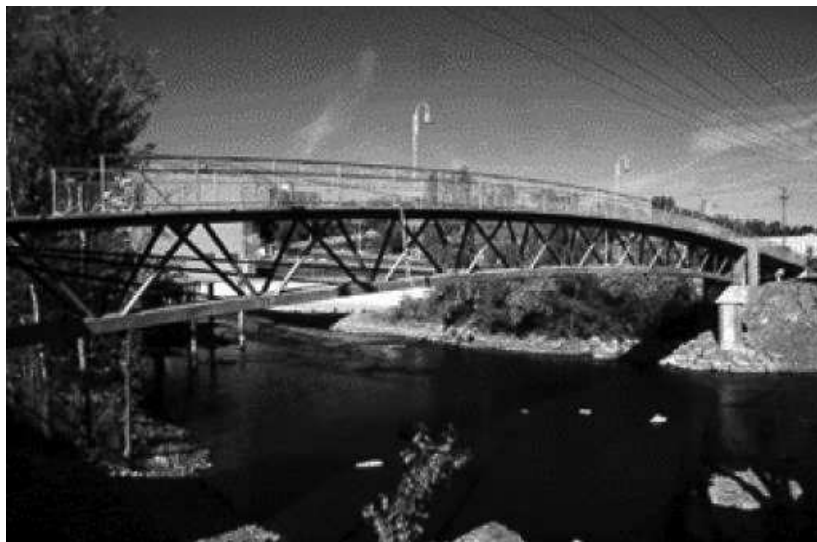
Segundo Vanderlei (2004), a fim de aumentar a densidade relativa e, conseqüentemente, a resistência à compressão, é recomendado ainda aplicar pressão de confinamento no concreto fresco. Esta aplicação, de acordo com o método e intensidade da aplicação, pode reduzir o ar incorporado, remover o excesso de água, reduzindo ainda mais o fator água/cimento do CPR e, por fim, a compensação da retração química, eliminando, deste modo, parte da porosidade do modelo da retração química.

Richard e Cheyrezy (1995) realizaram ensaios experimentais em CPRs referentes a aplicação de pressão de compressão e tratamento térmico à temperatura elevada, concluindo que a cura a vapor em 90°C ou superior, com alta pressão alcança boas melhoras nas propriedades mecânicas, quando comparadas a cura a temperatura ambiente, tal como maior resistência, menor retração de secagem e de deformação.

2.4 APLICAÇÕES DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS

De acordo com Vanderlei (2004), a utilização do CPR é bastante viável na construção de estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimento de fachadas. Construções com CPR já são aplicadas no Canadá, França, Japão, Estados Unidos e Coreia do Sul, tendo em vista as vantagens proporcionadas pelo compósito.

A primeira e mais conhecida estrutura de porte executada com concretos de pós reativos é a passarela Sherbrooke em Quebec, no Canadá, construída em 1997, com comprimento de 60 metros por 3 metros de largura (ISAIA, HELENE e TUTIKIAN, 2011). Esta é uma ponte para pedestres e ciclistas, sobre o rio Magog, e pode ser observada na Figura 2. Segundo Vanderlei (2004), o projeto foi executado com CPR reforçado com fibras, excluindo a necessidade de armadura passiva, e sendo garantida uma resistência à compressão de 200 MPa. Além disso, realizou-se cura térmica a 90° C em todo o módulo.



**Figura 2 - Passarela Sherbrooke em Quebec, Canadá
Fonte: Vanderlei (2004).**

Outro conhecido exemplo é a passarela de pedestres em Seoul, Coreia do Sul, construída em 2002 e observada na Figura 3. O arco central da ponte possui 120 metros de vão livre e tabuleiro com espessura de apenas 3 cm (ISAIA, HELENE e TUTIKIAN, 2011).



Figura 3 - Ponte de pedestres em Seoul, Coréia do Sul
Fonte: Isaia, Helene e Tutikian (2011).

Outras obras que podem ser citadas são as Pontes Rodoviárias em Iowa e na Virgínia, nos Estados Unidos da América, e Posto de Pedágio do Viaduto de Millau, na França (ISAIA, HELENE e TUTIKIAN, 2011).

Com o estudo da bibliografia consultada, notou-se que o concreto de pós reativos é uma inovação na área de materiais de construção, podendo ser aplicado em vários seguimentos da Engenharia Civil. No entanto, também ficou perceptível que o método de dosagem para o concreto de pós reativos ainda não é padronizado. Além disso, tem-se poucos estudos, mesmo na literatura internacional, referente ao melhor tipo de cimento para conferir melhores propriedades mecânicas, bem como sobre o melhor tipo de cura térmica aplicado, além do efeito das dosagens de fibras distintas nas propriedades do CPR.

Com isso, este trabalho busca analisar o processo de produção com materiais nacionais. Além disso, verificar se a adição de fibras, na dosagem especificadas para a metodologia, realmente não tem grande influência na resistência à compressão. E por fim, verificar se o procedimento de cura térmica juntamente com umidade – a vapor - realmente é favorável para a propriedade de resistência à compressão deste compósito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Produção do Concreto de Pós Reativos

Para a produção do CPR e do CPRF foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Cimento Portland CP V-ARI;
- b) Areia de quartzo com diâmetro nominal máximo de 600 μm ;
- c) Pó de quartzo com diâmetro nominal máximo de 25 μm ;
- d) Sílica ativa;
- e) Superplastificante a base de Éter Policarboxilato;
- f) Fibras de aço lisas com diâmetro de 0,2 mm e comprimento de 13 mm;
- g) Fibras de polietileno lisas com diâmetro de 0,2 mm e comprimento de 15 mm;
- h) Água.

Os materiais base utilizados para a confecção do Concreto de Pós Reativos foram adotados de acordo com o recomendado na literatura. Ou seja, o cimento é o recomendado por Isaia, Helene e Tutikian; a areia e o pó de quartzo possuem dimensão máxima limitada por Richard e Cheyrezy; o superplastificante é a base de Éter Policarboxilato, orientado por Dils, Boel e De Schutter.

A Figura 4 apresenta estes materiais, em que as letras A, B, C, D, E e F representam, respectivamente, o cimento, areia de quartzo, pó de quartzo, sílica ativa, superplastificante a base de éter policarboxilato e a água.

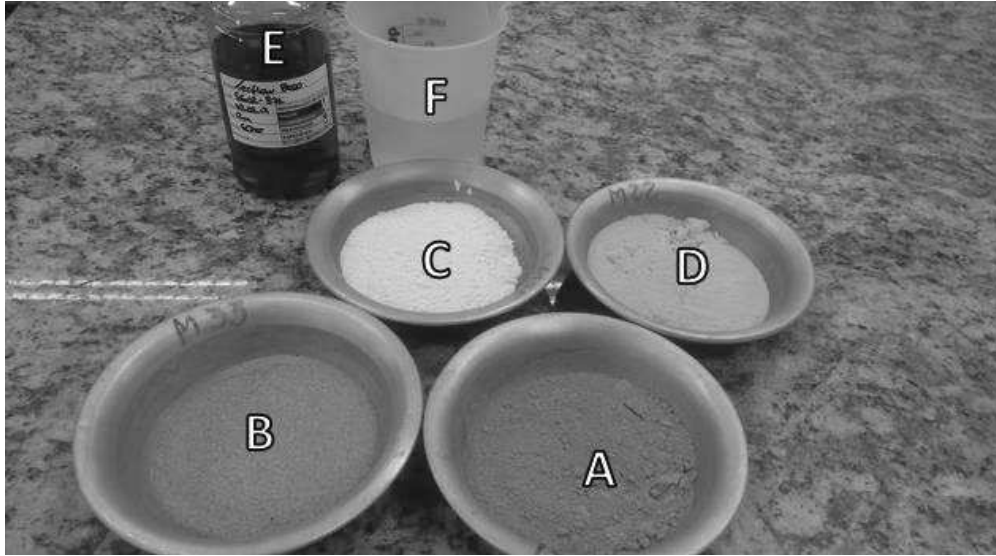


Figura 4 - Materiais utilizados para o CPR
Fonte: A autora (2016).

Para o CPRF, por sua vez, além dos materiais base expostos na Figura 4, utilizou-se fibras metálicas e poliméricas, sendo estas verificadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.



Figura 5 - Fibras de aço utilizadas para o CPRF
Fonte: A autora (2017).



Figura 6 - Fibras de polietileno utilizadas para a confecção do CPRF
Fonte: A autora (2017).

3.1.2 Produção do Concreto Convencional

Referente a produção do concreto convencional foram utilizados:

- a) Cimento Portland CP V-ARI;
- b) Areia média;
- c) Brita com dimensão máxima característica igual a 9,5 mm;
- d) Água.

Os materiais utilizados para a produção dos concretos convencionais foram selecionados de acordo a disponibilidade de materiais no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. A Figura 7 apresenta os agregados e aglomerante utilizados, em que as letras A, B e C representam, respectivamente, o cimento, a areia e a brita.

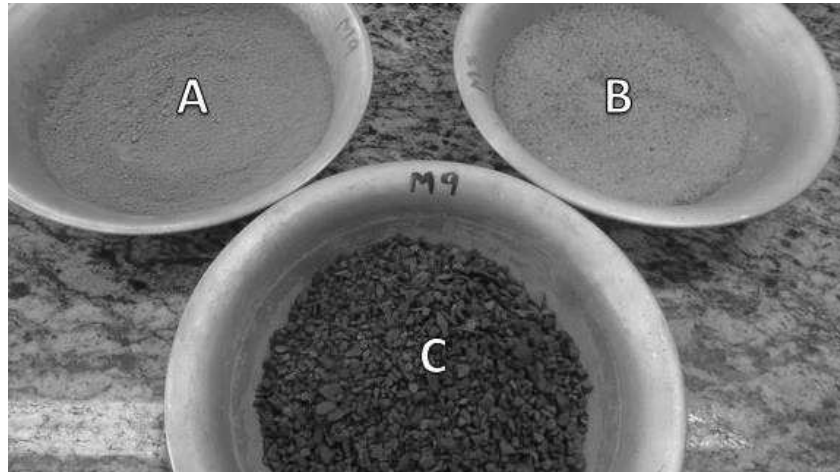


Figura 7 - Materiais utilizados para a confecção do Concreto Convencional
Fonte: A autora (2017).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Estudo de traços do Concreto de Pós Reativos

O objetivo desta etapa foi analisar traços de concretos de pós reativos através de teses e artigos internacionais, obtidos a partir das plataformas *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*, e adequá-los de modo a serem executados com materiais disponíveis nacionalmente.

Para o estudo de traço foram utilizados como base cinco traços. Para o traço 1 e 2 utilizou-se como referência os traços apresentados por Richard e Cheyrezy (1995). Os traços 3, 4 e 5 foram embasados em artigos apresentados por Mostodinejad, Nikoo e Hossein (2016), Dils, Boel e De Schutter (2013), Alkaysi et al. (2016), respectivamente. Estes traços, em massa, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dosagem de traços de CPR de referência

Traços de CPR						
Traço	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Pó de Quartzo	Superplastificante	Água
1	1	0,23	1,1	0,39	1,9%	0,17
2	1	0,23	0,5	0,39	1,9%	0,19
3	1	0,3	0,73	0,18	3%	0,165
4	1	0,23	1,1	0,28	1,9%	0,21
5	1	0,25	1,06	0,26	1,35%	0,22

Fonte: A autora (2017).

Os traços foram executados e ajustados para os materiais desta pesquisa, mudando-se, principalmente, a proporção de superplastificante e o fator água/cimento, até se obter um CPR que pudesse ser misturado nos equipamentos disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade, e que apresentasse uma boa trabalhabilidade para a moldagem dos corpos de prova.

A confecção dos corpos de prova, deu-se inicialmente pela mistura dos materiais secos por 5 minutos em um misturador mecânico de argamassa, apresentado na Figura 8.



Figura 8 - Misturador de argamassa utilizado na pesquisa
Fonte: A autora (2017).

Posteriormente, foi adicionada a água com superplastificante já homogeneizado e a mistura foi realizada por mais 10 minutos. A Tabela 2 apresenta os traços finais com as devidas adequações.

Tabela 2 – Dosagem de traços de CPR ajustados

Traços de CPR						
Traço	Cimento	Silica Ativa	Areia de Quartzo	Pó de Quartzo	Superplastificante	Água
1	1	0,23	1,1	0,39	3%	0,27
2	1	0,23	0,5	0,39	2,2%	0,29
3	1	0,3	0,73	0,18	3%	0,25
4	1	0,23	1,1	0,28	3%	0,265
5	1	0,25	1,06	0,26	3%	0,224

Fonte: A autora (2017).

Comparando-se as Tabelas 1 e 2, é possível notar que as diferenças estão nas porcentagens de superplastificante e água, visto que os materiais utilizados para esta pesquisa podem ser distintos dos materiais utilizados pelos autores de referência.

Para a análise da resistência à compressão uniaxial dos CPRs foram moldados corpos de prova de dimensões 5x10 cm. A escolha das dimensões destes corpos de prova se deu devido à limitação de carga das prensas disponíveis para ensaio, uma vez que quanto maior o diâmetro do corpo de prova, maior a carga necessária para rompê-lo para atingir um mesmo valor de resistência.

Foram confeccionados vinte e nove corpos de prova, sendo destes, seis corpos de prova para o traço 1, 2, 4, 5 e cinco corpos de prova para o traço 3, devido a insuficiência de material confeccionado. Após a mistura dos materiais, os moldes devidamente prontos foram preenchidos e deixados por 24 horas à temperatura ambiente, sendo posteriormente desmoldados, identificados e encaminhados à uma determinada condição de cura. O objetivo desta etapa foi verificar os efeitos de diferentes condições de cura, passíveis de execução no referido laboratório e descritas na literatura, nas propriedades mecânicas dos corpos de prova.

A saber, os dois métodos de cura empregados foram:

- a) Cura na estufa à 90°C por 72 horas e posterior cura submersa até as idades de ruptura;
- b) Cura submersa em água até as idades de ruptura;

Desta forma, para os traços 1, 2, 4 e 5, três corpos de prova foram curados em cada método descrito. Para o traço 3, por sua vez, três corpos de prova foram curados inicialmente em estufa, e os outros dois restantes, tiveram cura submersa em água. Posteriormente, os corpos de prova foram encaminhados para o ensaio de compressão segundo as respectivas datas de ruptura: 14, 21 e 28 dias. O ensaio de compressão foi realizado em uma prensa de compressão de 2000 kN do Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR.

3.2.2 Produção de Concreto de Pós Reativos com e sem adição de Fibras

Para a produção do Concreto de Pós Reativos foi utilizado o traço 1: 0,23: 1,1: 0,28: 0,03: 0,265 (cimento, sílica ativa, areia de quartzo, pó de quartzo, superplastificante e água), sendo este referente ao traço 4, da Tabela 2, escolhido previamente através do estudo e definição do traço, visto que apresentou a maior resistência à compressão uniaxial na idade de 28 dias, bem como apresentou um aumento contínuo em sua resistência.

O procedimento de preparo do CPR foi conforme recomendado na literatura referente. Deste modo, primeiramente se realizou a homogeneização dos materiais secos no misturador mecânico, conforme verificado na Figura 9, por 5 minutos.



Figura 9 - Homogeneização dos materiais secos
Fonte: A autora (2017).

A água de amassamento foi misturada com o superplastificante formando uma solução única, a qual foi adicionada em pequenas doses na mistura dos materiais pulverulentos, com misturador em velocidade média. Posteriormente aumentou-se a velocidade de rotação e aguardou-se que a mistura atingisse a consistência esperada, conforme Figura 10. O processo de mistura após a adição de água e superplastificante se deu por, aproximadamente, 10 minutos. Para o CPR, o processo de preparo do concreto se deu até esta etapa.



Figura 10 - Fluidificação da mistura
Fonte: A autora (2017).

No caso do CPRF foram ainda adicionadas as fibras após homogeneização da pasta fluida e misturado por mais 2 minutos para assegurar a dispersão adequada das fibras.

A dosagem de fibras utilizada, tanto para as fibras metálicas quanto poliméricas, foi de 0,5% e 1%, a fim de garantir uma boa trabalhabilidade e verificar a influência da adição de fibras no CPRF.

A NBR 5739 (ABNT, 2007), a qual baliza ensaios de compressão, recomenda que para uma avaliação estatística satisfatória dos resultados sejam moldados, pelo menos, dois corpos de prova, a fim de estimar a dispersão dos resultados devido as operações de ensaio. Deste modo, foram moldados seis corpos de prova para cada idade de ruptura.

Como fôrmas, foram adotados moldes metálicos, de dimensões 5x10 cm, conforme Figura 11. Como já explanado, quanto maior o diâmetro do corpo de prova, maior a carga necessária para rompê-lo para atingir um mesmo valor de resistência. A moldagem dos modelos foi feita em uma bancada plana e colocava-se o concreto na fôrma de maneira lenta, permitindo o adensamento do material.



Figura 11 - Corpos de prova de 5x10 cm
Fonte: A autora (2017).

Sendo assim, foram confeccionados:

- a) 18 corpos de prova de CPR sem adição de fibras;
- b) 18 corpos de prova de CPRF com adição de 0,5% de fibras de aço;
- c) 18 corpos de prova de CPRF com adição de 1% de fibras de aço;
- d) 18 corpos de prova de CPRF com adição de 0,5% de fibras de polietileno;
- e) 18 corpos de prova de CPRF com adição de 1% de fibras de polietileno;

Ressalta-se que a produção e moldagem dos corpos de prova se deu em etapas. Ou seja, devido a limitação da capacidade do misturador mecânico e dos moldes disponíveis, não foram retiradas da mesma amostra os 18 corpos de prova de cada situação analisada. Foram produzidos 6 corpos de prova por vez, e controlou-se rigorosamente a dosagem dos materiais a fim de evitar-se divergências.

Após devidamente preenchidos os corpos de prova, as amostras foram deixadas por 24 horas à temperatura ambiente, em uma bancada plana, conforme Figura 12. Posteriormente os modelos foram desmoldados, identificados e encaminhados à condição de cura.



Figura 12 - Moldagem dos corpos de prova
Fonte: A autora (2017)

Para o procedimento de cura foi construída uma câmara de cura térmica de modo a promover a cura dos corpos de prova à vapor sob temperatura controlada, observado na Figura 13.



Figura 13 - Câmara de cura térmica
Fonte: A autora (2017).

O equipamento consistiu em um compartimento com tampa dotado de um resistor que aquecia a água depositada em seu interior. Desta forma, foi possível aquecer a água e gerar vapor no interior do compartimento. A fim de controlar a temperatura da água, acoplou-se um termostato a um painel, possibilitando que a água não ultrapassasse a temperatura estabelecida, ocasionando o desligamento da resistência, conforme observado na Figura 14. As letras A, B e C representam, respectivamente, o termostato, a luz de acionamento e desligamento da resistência e, por fim, a temperatura adotada (verde) e a atingida (vermelho) para a água depositada na câmara.



Figura 14 - Painel de controle de temperatura
Fonte: A autora (2017).

Além do exposto, para que os corpos de prova não estivessem em contato direto com a água, fixou-se uma grelha metálica para a suspensão dos modelos, conforme Figura 15. Ressalta-se que foram feitos testes de temperatura e estanqueidade na câmara antes da exposição dos corpos de prova que atestaram sua eficiência.



Figura 15 - Grelha fixada na câmara de cura
Fonte: A autora (2017).

Como já citado, o regime de cura empregado foi a vapor com temperatura de, aproximadamente, 90° C por 72 horas após a desmoldagem. Adotou-se uma temperatura superior no termostato devido as possíveis perdas de calor, visto que a câmara não era totalmente isolada. Na Figura 16 é possível observar a disposição dos corpos de prova suspensos no interior da câmara.



Figura 16 - Corpos de prova no interior da câmara
Fonte: A autora (2017).

Passadas as 72 horas de cura térmica, os corpos de prova foram retirados da câmara e resfriados naturalmente até que atingissem a temperatura ambiente, por um período de 3 horas. Posteriormente, as amostras deram continuidade a cura submersos em água até a data dos ensaios, conforme Figura 17.



Figura 17 - Corpos de prova em condição de cura submersa em água
Fonte: A autora (2017).

De acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), é recomendado que as idades de ensaio de compressão uniaxial sejam de 24 horas, 3 dias, 7 dias, 28 dias, 63 dias e 91 dias, podendo haver ainda idades intermediárias. Para o trabalho em questão, foram adotadas as seguintes idades de ruptura: 3 dias, 14 dias e 28 dias.

Para tomar as superfícies da base e do topo dos modelos paralelas e planas, uma vez que a superfície dos corpos de prova cilíndricos submetidas a acabamento manual após a moldagem apresentavam irregularidade, utilizou-se uma retífica mecânica com suporte adaptado, disponível no Laboratório de Materiais da UTFPR.

Os ensaios de compressão uniaxial para análise da resistência foram realizados em uma prensa de compressão de 1000 kN disponível no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Paranaense – Unipar, mostrada na Figura 18.

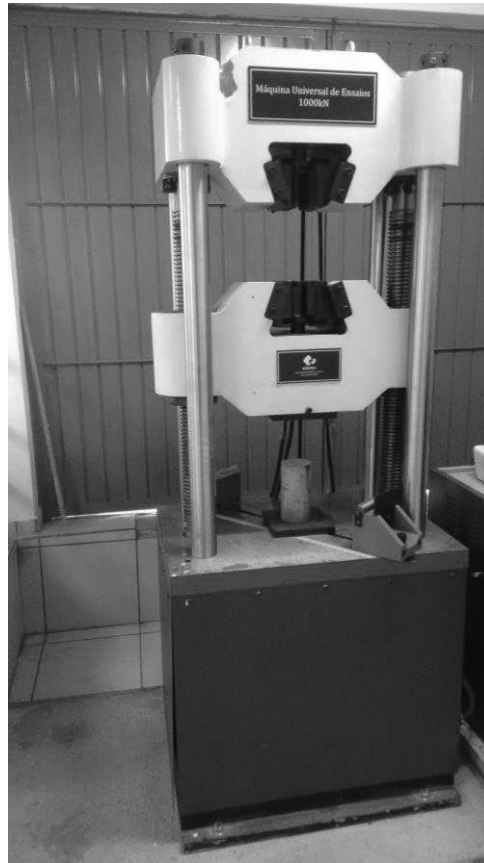


Figura 18 - Prensa de compressão
Fonte: A autora (2017).

Os corpos de prova eram colocados entre as placas de aço, bem ao centro, para que a força atuasse de forma centrada.

3.2.3 Produção do Concreto Convencional

Para a confecção dos concretos convencionais foi utilizado um traço realizado pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O método exige o conhecimento de algumas informações, tal como tipo, massa específica e nível de resistência aos 28 dias do cimento; análise granulométrica e massa específica dos agregados; dimensão máxima característica do agregado graúdo; consistência desejada do concreto fresco e resistência de dosagem do concreto (f_{cj}).

Os ensaios referentes a análise dos materiais foram previamente realizados com os materiais disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UTFPR campus Toledo.

Tem-se que a areia possui módulo de finura (MF) igual a 2,74, sendo classificada, deste modo, como areia média. Referente ao agregado graúdo, visto que a brita utilizada para a confecção do traço é a brita 0 (pedrisco), tem-se que sua dimensão máxima característica (DMC) é igual a 9,5 mm, e sua massa unitária compactada corresponde a 1780 kg/m³.

A massa específica dos outros materiais utilizados para a confecção do traço são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa específica dos materiais utilizados

Massa Específica	
Materiais	Massa específica (kg/m ³)
Cimento	3100
Areia	2600
Brita	2880
Água	1000

Fonte: A autora (2017).

Para fixar o fator água/cimento é necessário conhecer o nível de resistência aos 28 dias do cimento (f_{cj}), obtido através da Equação (1).

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (1)$$

Onde:

f_{cj} : Resistência de dosagem do concreto (MPa);

f_{ck} : Resistência característica do concreto (MPa);

S_d : Desvio padrão determinado pelo sistema de controle adotado na produção do concreto (MPa).

Adotando-se que o f_{ck} do concreto corresponde a 25 MPa, e o controle adotado na produção do concreto será do tipo “B”, ou seja, admite um desvio padrão de dosagem igual a 5,5 ($S_d = 5,5$ MPa), tem-se que o f_{cj} será 34,075 MPa.

De posse do f_{cj} , e sabendo que o nível de resistência aos 28 dias do cimento utilizado corresponde a 40 MPa, plota-se a curva de Abrams e obtém-se o fator água/cimento de 0,56, conforme observado na Figura 19.

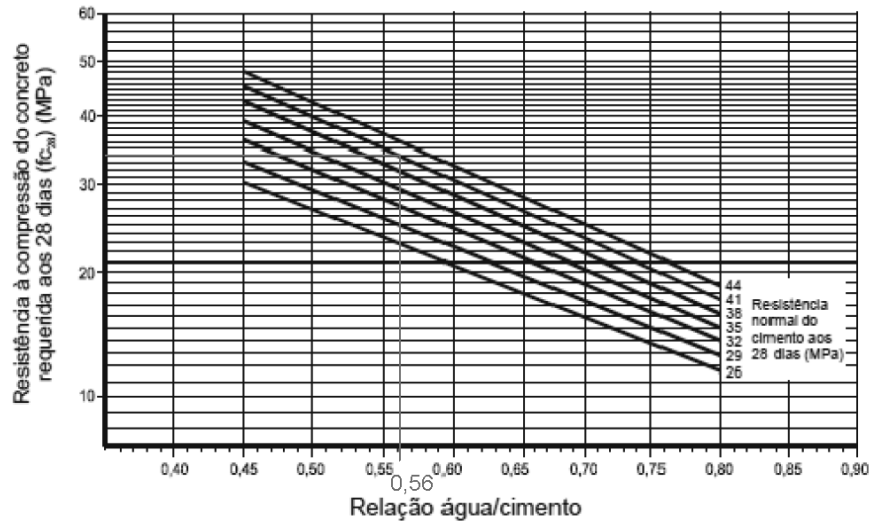


Figura 19 - Fator água/cimento pela curva de Abrams
Fonte: A autora (2017).

O consumo de água do concreto (C_a), por sua vez, é determinado neste método através da dimensão máxima característica do agregado graúdo e da consistência desejada, conforme verificado na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo de água do concreto

Abatimento do tronco de cone (mm)	Consumo de Água		
	Dimensão Máxima do Agregado Agraúdo (mm)		
	9,5	19	25
40 a 60	220 kg/m ³	195 kg/m ³	190 kg/m ³
60 a 80	225 kg/m ³	200 kg/m ³	195 kg/m ³
80 a 100	230 kg/m ³	205 kg/m ³	200 kg/m ³

Fonte: Adaptado de Rodrigues (1990).

Deste modo, visto que a dimensão máxima característica é de 9,5 mm, e o abatimento do tronco de cone desejado é de 80 a 100 mm, tem-se, através da Tabela 4, que o consumo de água é 230 kg/m³.

Seguidamente, é necessário determinar o consumo de cimento (C_c), que corresponde à relação entre o consumo de água e a relação água/cimento, como exposto na Equação (2). Assim sendo, tem-se que o consumo de cimento é 410,71 kg/m³.

$$C_c = C_a / (a/c) \quad (2)$$

Onde:

Cc: Consumo de cimento (kg/m³);

Ca: Consumo de água (kg/m³);

a/c: Fator água/cimento.

Após, deve-se determinar o consumo de agregados. O consumo de agregado graúdo (Cb) depende do conhecimento da dimensão máxima característica do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo. O consumo é dado pela Equação (3):

$$C_b = V_b \cdot \mu \quad (3)$$

Onde:

Cb: Consumo de agregado graúdo (kg/m³);

Vb: Volume compactado do agregado graúdo (m³);

Mu: Massa unitária compactada do agregado graúdo (kg/m³).

O volume compactado é obtido através da Tabela 5. O valor é aferido por meio de interpolação referente ao agregado com dimensão máxima característica de 9,5 mm com módulo de finura entre 2,6 e 2,8, e volume compactado entre 0,565 m³ e 0,545 m³, correspondendo, portanto, a 0,551 m³.

Tabela 5 - Volume compactado de brita

Módulo de Finura	Volume Compactado (m ³)				
	Dimensão Máxima Característica (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de Rodrigues (1990).

Deste modo, aplicando os valores encontrados na Equação (3) tem-se que o consumo de brita corresponde a 980,78 kg/m³.

O consumo de agregado miúdo (C_m) é dado a partir do volume de agregado miúdo (V_m) obtido por meio da Equação (4). A quantidade em massa é obtida por meio do produto entre o volume encontrado e a massa específica do agregado miúdo, conforme Equação (5).

$$V_m = 1 - (C_c/\gamma_c + C_b/\gamma_b + C_a/\gamma_a) \quad (4)$$

$$C_m = V_m \cdot \gamma_m \quad (5)$$

Onde:

V_m: Volume de areia (m³);

γ_c: Massa específica do cimento (kg/m³);

γ_b: Massa específica da brita (kg/m³);

γ_a: Massa específica da água (kg/m³);

γ_m: Massa específica da areia (kg/m³).

O valor do volume de agregado miúdo corresponde a 0,27 m³. Deste modo, o consumo de agregado miúdo corresponde a 772,10 kg/m³.

Por fim, obtém-se o traço dividindo-se todas as massas obtidas pela massa de cimento, conforme Equação (6).

$$(C_c/C_c): (C_m/C_c): (C_b/C_c): (C_a/C_c) \quad (6)$$

Deste modo, o traço obtido, em massa, é 1: 1,88: 2,39: 0,56 (cimento, areia, brita e água). Tendo posse do traço, seguiu-se com a produção do concreto na betoneira. A betoneira utilizada para a confecção do concreto está disponível no Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR.

Inicialmente, realizou-se a imprimação da betoneira, ou seja, colocou-se na betoneira a brita e a água e ligou-a, a fim de que fosse limpa antes de ser usada, livre de qualquer pó, água suja ou restos da última utilização que pudessem interferir na confecção do novo concreto.

Com a limpeza da betoneira já realizada, começou-se a confecção do concreto. Para tanto, adicionou-se na betoneira padiolas da brita, em seguida, metade da água, depois o cimento. Ligou-se a betoneira para uma primeira mistura dos materiais. Por fim, colocou-se a

areia e o restante da água e novamente ocorreu a mistura até homogeneização dos materiais. A mistura já fluida e ainda na betoneira é observada na Figura 20.



Figura 20 - Concreto convencional na betoneira
Fonte: A autora (2017).

No estado fresco o concreto foi avaliado em relação a trabalhabilidade pelo teste de consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test), de acordo com a NBR 67 (ABNT, 1998). O tronco de cone utilizado para a avaliação do concreto convencional é observado na Figura 21.



Figura 21 - Tronco de Cone para Slump Test
Fonte: A autora (2017).

Para a execução do ensaio, primeiramente, colocou-se a fôrma tronco-cônica sobre a placa metálica em um local bem nivelado e apoiou-se os pés sobre as abas inferiores do cone.

Seguidamente, coletou-se uma amostra do concreto, e preencheu-se a primeira camada, aplicando 25 golpes com a haste, conforme observado na Figura 22.



Figura 22 - Execução do ensaio de abatimento do concreto
Fonte: A autora (2017).

Em seguida, foram preenchidas mais duas camadas, cada uma golpeada 25 vezes e sem penetrar a camada inferior. Após a compactação da última camada, retirou-se o excesso de concreto e alisou-se a superfície. Posteriormente, retirou-se o tronco cônico, colocou-se a haste sobre o cone invertido e realizou-se a leitura do abatimento, com o auxílio de uma trena. O concreto utilizado para o Slump Test foi devolvido à betoneira e misturado novamente.

Após a mistura, foram moldados corpos de prova de 10x20 cm, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). O adensamento realizado nos moldes foi manual, e é observado na Figura 23.



Figura 23 - Adensamento dos corpos de prova
Fonte: A autora (2017).

Assim como o CPR e CPRF, foram moldados seis corpos de prova para cada idade de ruptura, deste modo, confeccionou-se 18 corpos de prova de concreto convencional. Após devidamente preenchidos os corpos de prova, as amostras foram deixadas por 24 horas à temperatura ambiente, sendo posteriormente desmoldadas, identificadas e encaminhadas à cura em condição saturada em água com cal a $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$. Os corpos de prova foram curados submersos em água até a idade de ensaio. Foram adotadas as seguintes idades de ruptura: 3 dias, 14 dias e 28 dias.

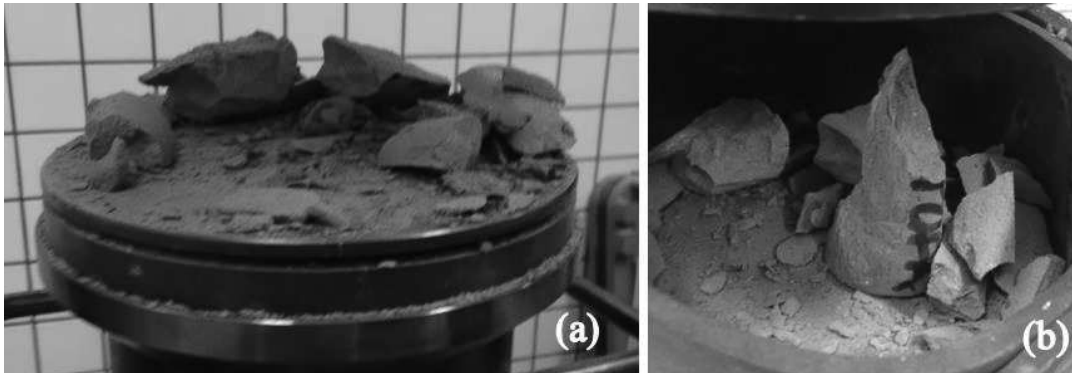
Para tomar as superfícies da base e do topo dos modelos paralelas e planas, uma vez que a superfície dos corpos de prova cilíndricos submetidas a acabamento manual após a moldagem apresentavam irregularidade, utilizou-se uma retífica mecânica, disponível no Laboratório de Materiais da UTFPR.

Os ensaios de compressão uniaxial para análise da resistência foram realizados em uma prensa de compressão de 1000 kN disponível no Laboratório de Engenharia Civil da Unipar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO DE TRAÇOS DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS

As Figuras 24 (a) e (b) mostram os corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão, em que foi observada a ruptura brusca dos mesmos.



Figuras 24 (a) e (b) - Ruptura de corpos de prova no ensaio de compressão uniaxial
Fonte: A autora (2016).

A Tabela 6 apresenta os valores de resistência à compressão alcançados em cada idade de ensaio. As letras A e B indicadas na tabela correspondem, respectivamente, a cura realizada com corpos de prova submersos em água e em estufa com posterior submersão em água.

Tabela 6 - Resistência à compressão com curas distintas

Condição de cura	Traço 1 (MPa)		Traço 2 (MPa)		Traço 3 (MPa)		Traço 4 (MPa)		Traço 5 (MPa)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
14 dias	86,76	93,87	85,42	89,82	83,89	79,79	97,31	101,18	72,86	106,58
21 dias	74,01	86,75	88,57	75,44	95,45	-	103,85	99,32	90,1	87,67
28 dias	78,21	83,51	93,01	94,45	65,18	110,16	113,36	87,57	83,99	98,03

Fonte: A autora (2017).

As Figuras 25 e 26 apresentam graficamente os valores de resistência à compressão uniaxial obtidos de acordo com cada condição de cura e idades de ensaio.

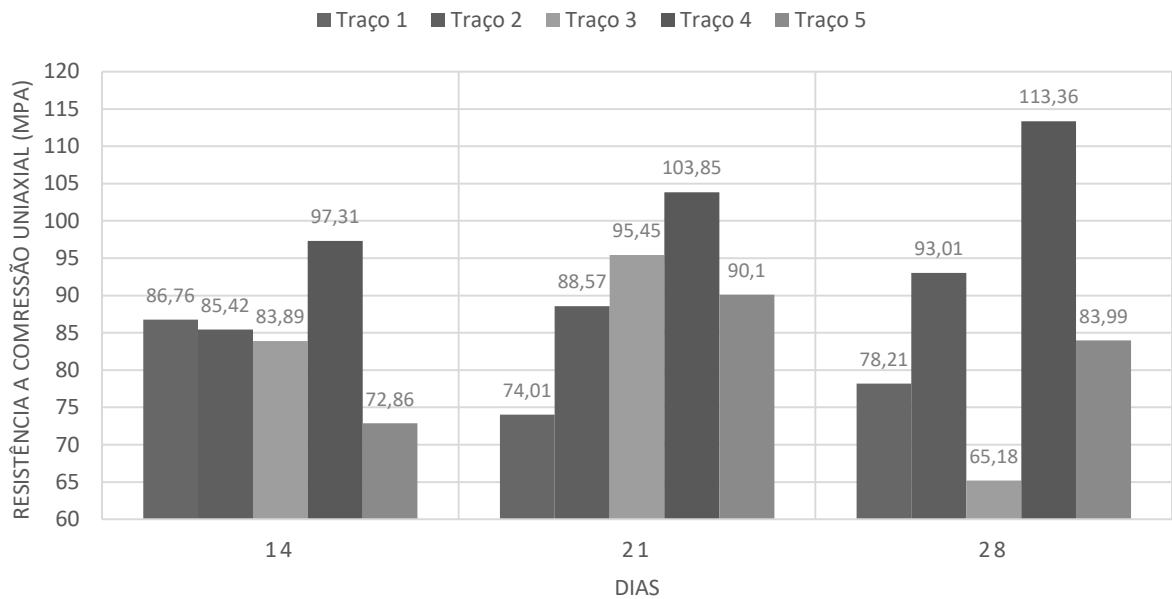


Figura 25 - Análise comparativa das resistências à compressão com cura submersa em água
Fonte: A autora (2017).

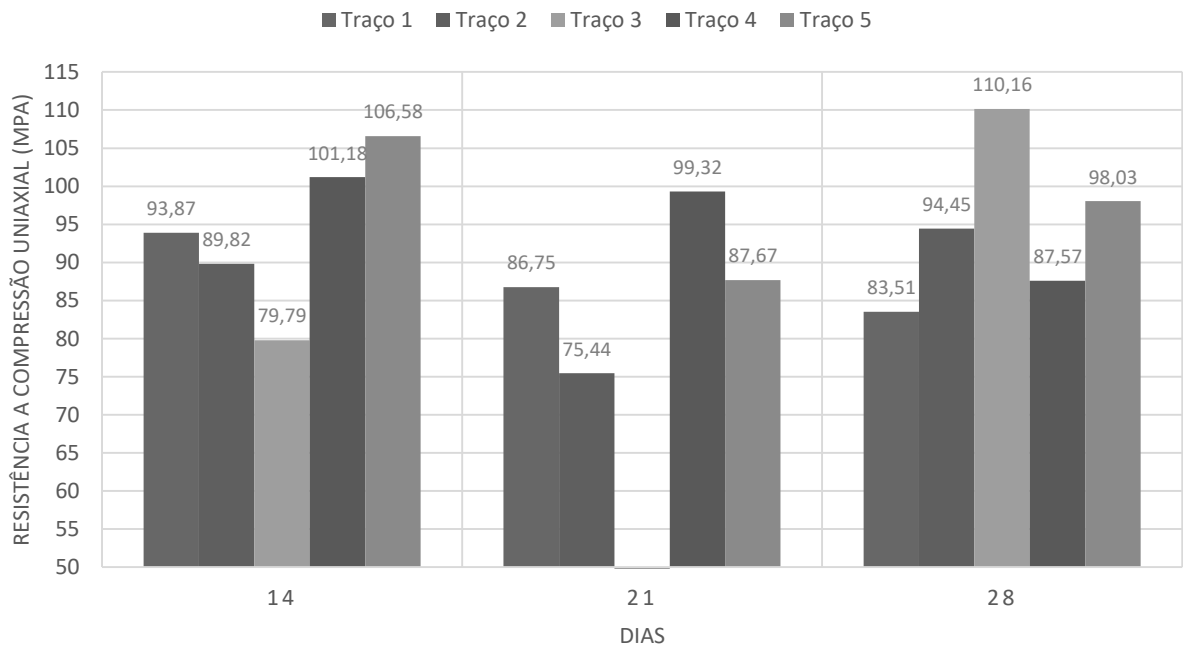


Figura 26 - Análise comparativa das resistências à compressão com cura em estufa
Fonte: A autora (2017).

Comparando os resultados de resistência à compressão uniaxial, é possível observar que os corpos de prova que iniciaram seu processo de cura na estufa obtiveram resistência à compressão superior aos que foram submetidos ao processo de cura submerso em água a primeira idade de ensaio, aos 14 dias. Isto demonstra que uma maior temperatura de cura potencializa as reações pozolânicas e ocasiona uma maior resistência à compressão.

Também é possível verificar que os corpos de prova que foram submetidos somente a cura com submersão em água apresentaram progressão na resistência, enquanto aqueles que inicialmente estavam em estufa tiveram uma queda de resistência. A condição para tal fato decorre da baixa umidade relativa no interior da estufa durante as primeiras idades, o que ocasiona uma perda de água de amassamento e, conseqüentemente, a uma baixa disponibilidade de água para as reações de hidratação e pozolânicas nestas primeiras idades, levando à um processo de hidratação deficiente com conseqüências às resistências.

Os resultados apresentados para os dois métodos de cura mostram que a maior resistência à compressão uniaxial na idade de 28 dias foi alcançada na condição de cura submersa em água (113,36 MPa), referente ao traço 4, evidenciando a influência positiva da umidade sobre o processo de cura. Além disso, como verificado na Figura 25 este traço apresentou um aumento contínuo em sua resistência. Deste modo, para a pesquisa em questão, foi utilizado o traço 4 como referência para a confecção do CPR e CPRF.

4.2 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS E CONCRETO CONVENCIONAL

A análise dos dados obtidos se deu pela média aritmética dos resultados. A Tabela 7 apresenta os valores de resistência à compressão alcançados em cada idade de ensaio, tanto para os corpos de prova de concreto de pós reativos, quando para os de concreto convencional. A nomenclatura S/F corresponde os corpos de prova de CPR sem fibras, ao passo que, as siglas FA e FP correspondem, respectivamente, ao uso de fibras de aço e fibras de polietileno e, por fim, CC corresponde ao concreto convencional. As porcentagens indicam a quantidade de fibra utilizada para cada situação em relação ao volume da amostra. A Figura 27 apresenta graficamente os valores de resistência à compressão média dos corpos de prova.

Tabela 7 - Resistência à compressão CPR e concreto convencional

Resistência (MPa)	Resistência à compressão uniaxial					
	S/F	0,5% FA	1% FA	0,5% FP	1% FP	CC
3 dias	68,32	64,32	56,71	74,91	70,66	27,34
14 dias	53,74	69,58	65,88	58,40	68,82	39,77
28 dias	54,72	52,47	67,84	62,07	52,05	45,19

Fonte: A autora (2017).

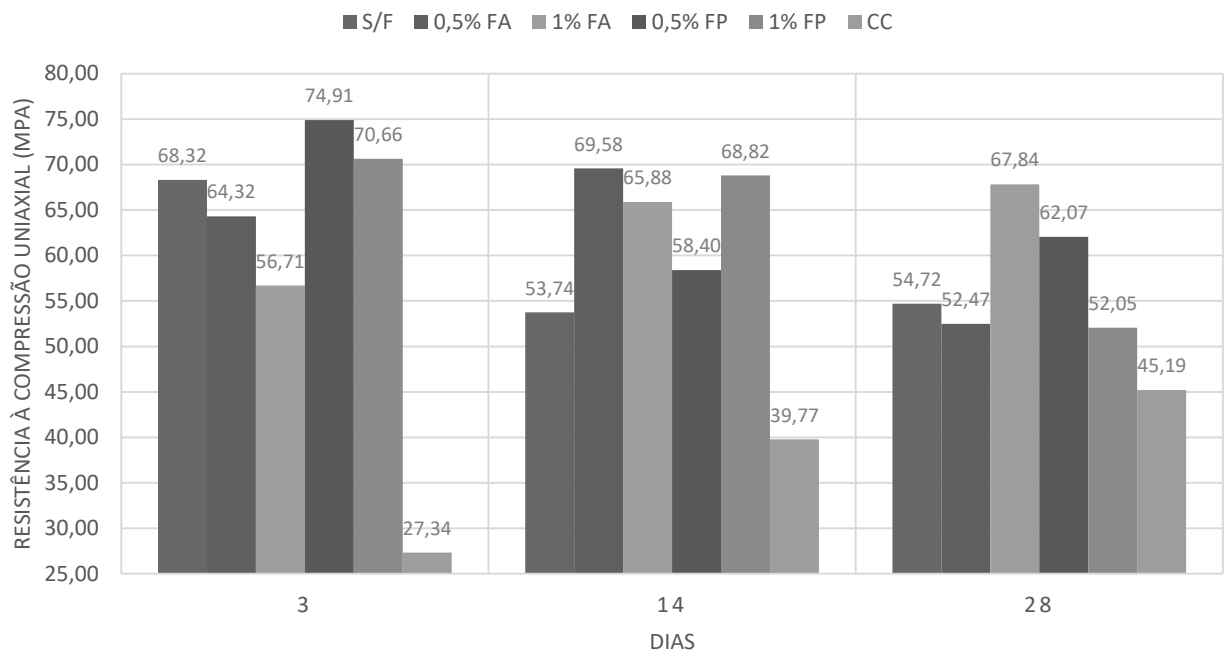


Figura 27 - Resistência à compressão dos dias de ruptura
Fonte: A autora (2017).

Através da análise da Tabela 7 e da Figura 27 é possível verificar que os corpos de prova manufaturados com pós reativos atingiram uma elevada resistência aos 3 dias em comparação ao concreto convencional, com valores variando de 56,71 MPa até 74,91 MPa. Com esta idade, os CPRs foram ensaiados ao sair das condições de cura a vapor, sendo, portanto, perceptível a influência positiva da umidade e temperatura sobre o processo de cura do concreto, bem como, fica evidente o efeito da temperatura de cura nas primeiras idades.

Referente ao concreto convencional – o qual apresentou abatimento do tronco de cone de 18 cm - este atingiu aos 3 dias a resistência esperada visto que o cimento utilizado para sua produção era de alta resistência inicial.

Aos 14 e 28 dias, por sua vez, houve uma queda nas resistências dos CPRs. Uma das explicações passíveis para tal resultado é devido ao tempo deixado para os corpos de prova resfriarem até a temperatura ambiente, após serem retirados da câmara de cura a vapor, bem como, a temperatura da água durante o procedimento de cura convencional. Neste ponto, conforme citado na metodologia, os corpos de prova permaneceram, aproximadamente, 3 horas resfriando ao ar. Este tempo corresponde ao resfriamento verificado ao toque, ou seja, somente na face externa dos corpos de prova, sendo os mesmos encaminhados posteriormente à câmara de cura convencional em água.

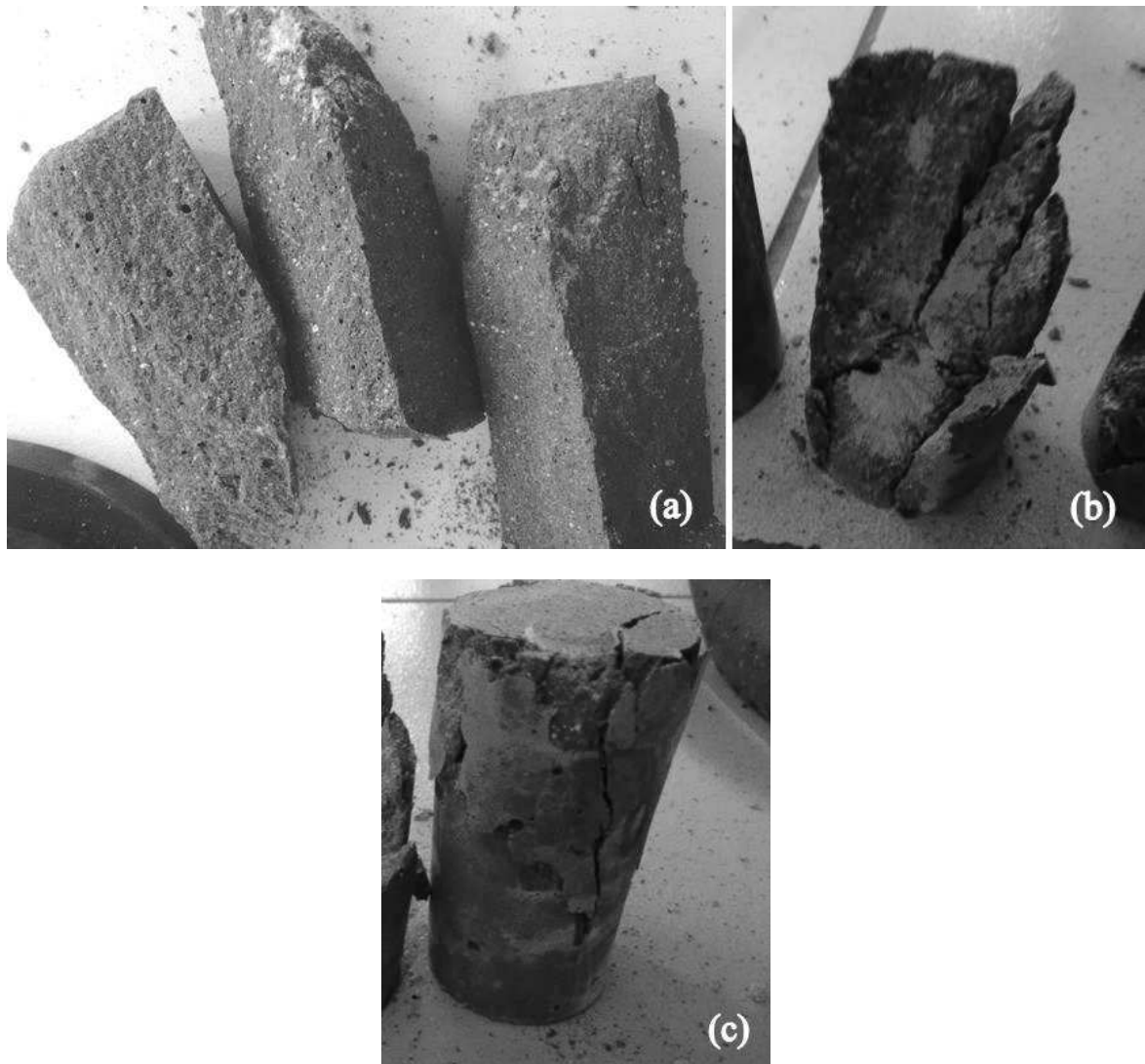
Os interiores dos corpos de prova, possivelmente, ainda apresentavam uma elevada temperatura antes de serem submersos em água na câmara de cura. Tal fato pode ter gerado um gradiente de temperatura entre a parte externa e interna dos corpos de prova, ocasionando microfissurações e justificando assim a queda de resistência observada na Figura 27.

Além disso, deve ser ressaltado que a temperatura da água na câmara de cura no Laboratório de Materiais da Construção sofre influência da temperatura ambiente, uma vez que, atualmente, não há um controlador de temperatura para tal fim. Neste tocante, nos dias em que os corpos de prova foram submersos, a temperatura mínima do ambiente atingiu valores próximos a 3° C, estando a água no interior da câmara de cura com uma temperatura inferior a 21° C, afetando a cinética das reações de hidratação do cimento e das reações pozolânicas e, concomitantemente a isso, reduzindo a resistência observada.

Quanto ao concreto convencional, através de uma análise da Tabela 7 e Figura 27, este apresentou um crescimento com as idades, possuindo resistência de 45,19 MPa aos 28 dias. Os corpos de prova de concreto convencional foram colocados à cura submersos em água em dias que a temperatura mínima do ambiente estava baixa. No entanto, visto que não foram submetidos à cura térmica, não ocasionou um gradiente térmico e, portanto, influenciou na resistência verificada.

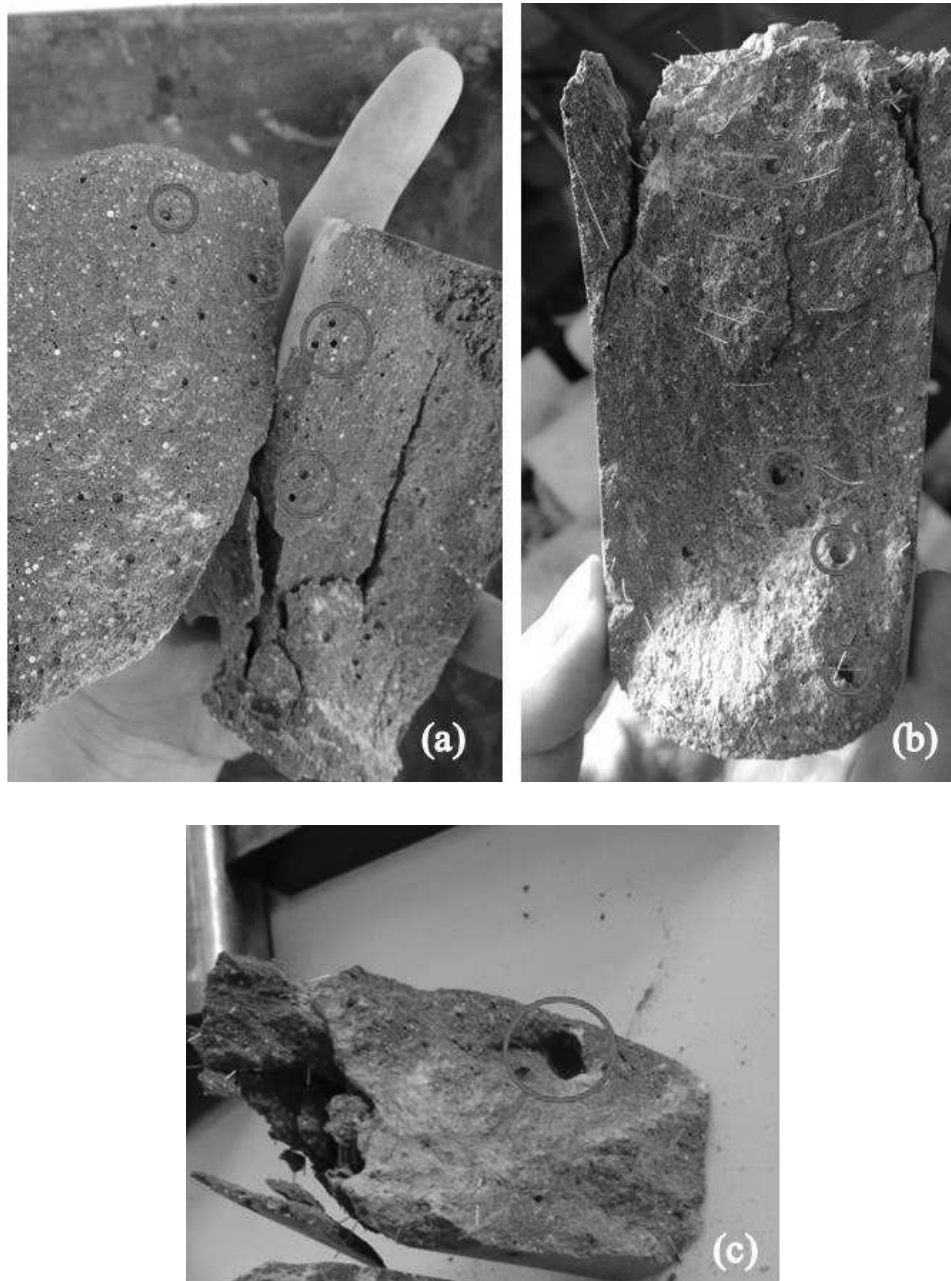
Apesar do concreto convencional apresentar uma evolução de resistência influenciada pela idade, ainda assim, as resistências à compressão dos concretos de pós reativos mostraram-se superiores. A menor resistência média aos 28 dias observada para o CPR é de 52,05 MPa, correspondente a 1% fibras de polietileno. Ainda assim, esta foi 15% superior a resistência à compressão média aos 28 dias do concreto convencional.

Os corpos-de-prova que não continham fibras apresentaram uma ruptura brusca com planos de ruptura bem delimitados, conforme observado na Figura 28 (a). Os corpos de prova com 0,5% de fibras em seu volume, independentemente desta ser polimérica ou metálica, apresentaram ruptura brusca, porém sem que fossem constatadas faces planas de ruptura (Figura 28 (b)). Tal fato decorre dos efeitos de aderência das fibras ao concreto dos corpos de prova, que permitiram que o mesmo não apresentasse um destacamento entre camadas do corpo de prova. Em corpos de prova com 1% de fibras, por sua vez, este efeito é mais notável. Apenas fissuras são observadas nos corpos de prova, sem que haja um destacamento das faces do mesmo (Figura 28 (c)).



Figuras 28 (a) (b) e (c) – Planos de ruptura CPRs
Fonte: A autora (2017)

Verificou-se, após separação das camadas dos corpos de prova, que a medida que a quantidade de fibras aumentou, maiores foram os vazios verificados, conforme visto nas Figuras 29 (a), (b) e (c), correspondendo, respectivamente, ao CPR sem fibras, com 0,5% de fibras e 1% de fibras. Tal fato decorre das dificuldades de adensamento, uma vez que o entrelaçamento de fibras acaba dificultando o preenchimento de todo o volume do corpo de prova com concreto, ocasionando, portanto, a presença destes vazios. Isto auxilia a explicar, por exemplo, o motivo pelo qual um aumento na quantidade de fibras não necessariamente corresponde a um aumento de resistência mecânica para as condições testadas.



Figuras 29 (a), (b) e (c) – Vazios nos CPR
Fonte: A autora (2017).

Referente ao tipo específico de fibra utilizada, bem como para o CPR sem adição de fibras, algumas considerações também podem ser feitas. Em alguns corpos de prova continuou-se o carregamento após a ruptura, e os gráficos gerados possibilitaram a análise de uma tendência.

Notou-se que os corpos de prova de CPR sem adição de fibras, quando atingiam a máxima resistência, decresciam sua capacidade de suportar carga rapidamente, não havendo

resistência ou deformação residual, conforme observado na Figura 30. Tal comportamento se dá justamente pela ausência de fibras no modelo.

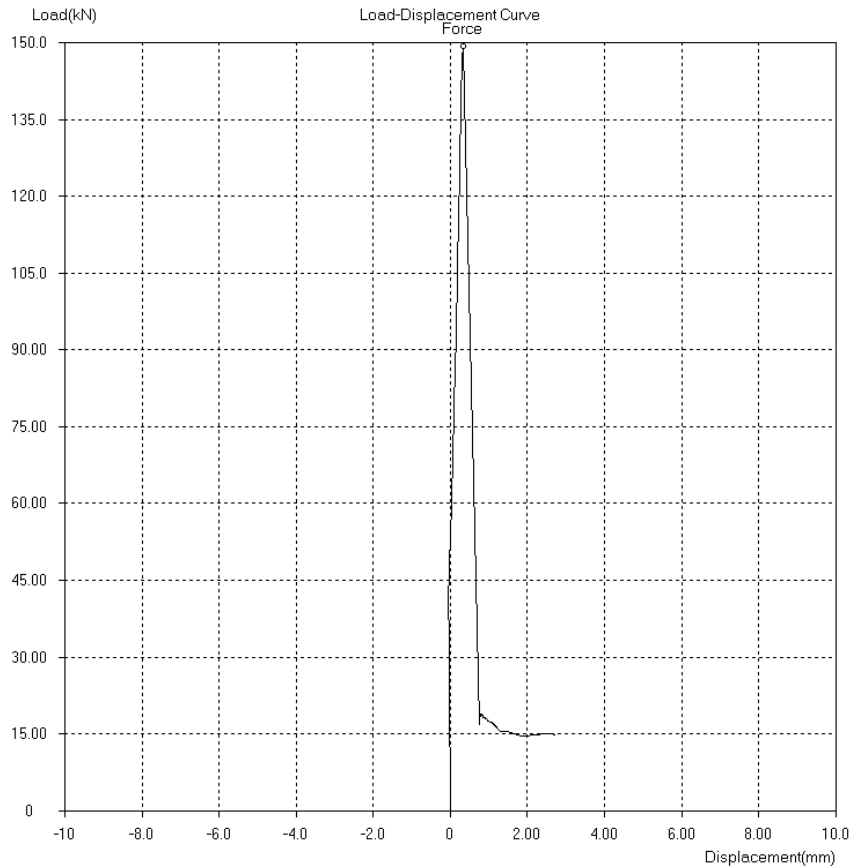


Figura 30 - Gráfico gerado para corpos de prova sem adição de fibras
Fonte: A autora (2017).

Referente aos corpos de prova com fibra de aço, estes apresentavam uma queda quando atingiam a máxima resistência, no entanto, uma deformação e uma capacidade de carga residuais foram observadas após a ruptura, fato este, relacionado à presença das fibras (Figura 31). Neste ponto, observa-se que para um deslocamento do cabeçote da máquina de compressão da ordem de 2 mm, a resistência apresentada pelo concreto sem fibras foi na ordem de 15 MPa, sendo finalizado o ensaio por conta da completa ruptura do corpo de prova, ao passo que a resistência residual do corpo de prova com 1% de fibras de aço foi na ordem de 40 MPa, havendo posteriormente, um contínuo deslocamento do cabeçote da máquina e valores decrescente de resistência residual. Isso demonstra que, no caso do colapso de uma estrutura, concretos reforçados com fibras de aço mantém um certo nível de resistência mecânica e deformação residual.

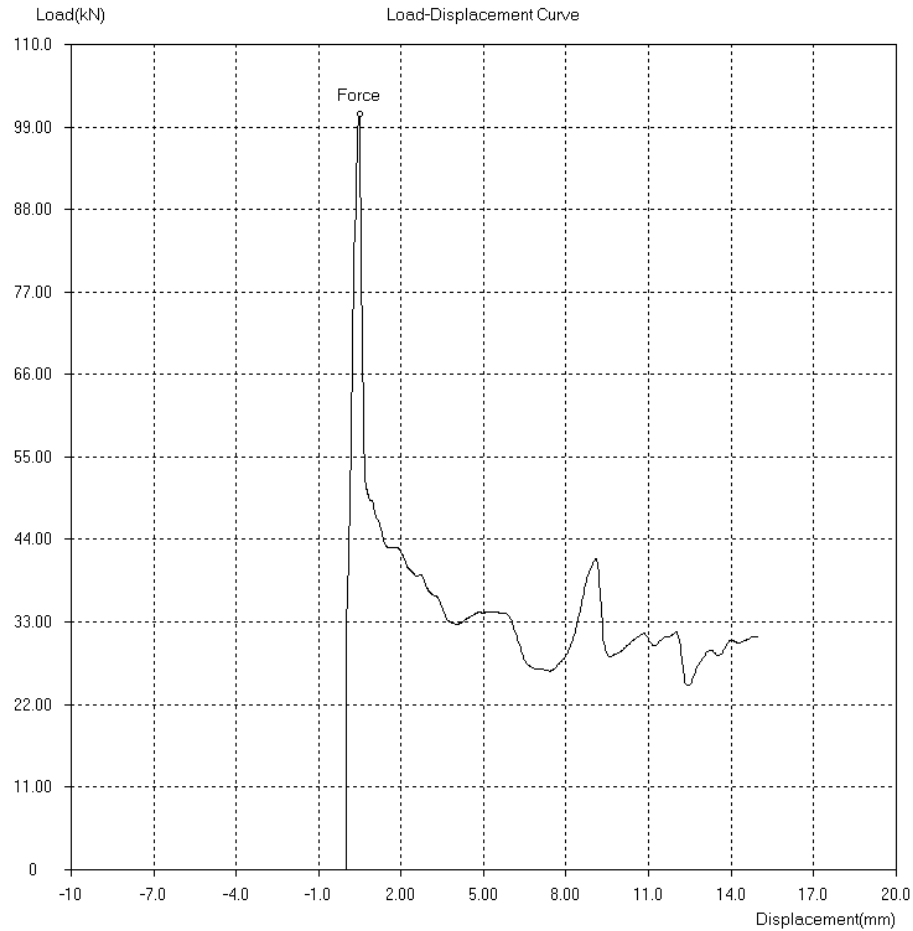


Figura 31 - Gráfico gerado para corpos de prova com fibras de aço
Fonte: A autora (2017).

Os corpos de prova que continham fibra de polietileno, por sua vez, após a ruptura, não apresentaram resistência e deformação residuais, sendo seu comportamento muito próximo ao comportamento de concretos sem fibras, conforme observado na Figura 32. Tal fato remete que a presença de fibras poliméricas não levam a uma significativa aderência entre estas e o concreto, não havendo portanto uma capacidade residual conforme observado para o concreto reforçado com fibras de aço. Em todo caso, observa-se que, de maneira geral, os corpos de prova reforçados com fibras poliméricas aumentaram a resistência última dos corpos de prova em relação aos concretos não reforçados com fibras, o que permite concluir que, o uso de fibras poliméricas contribui para aumentar a resistência mecânica do concreto antes de sua ruptura.

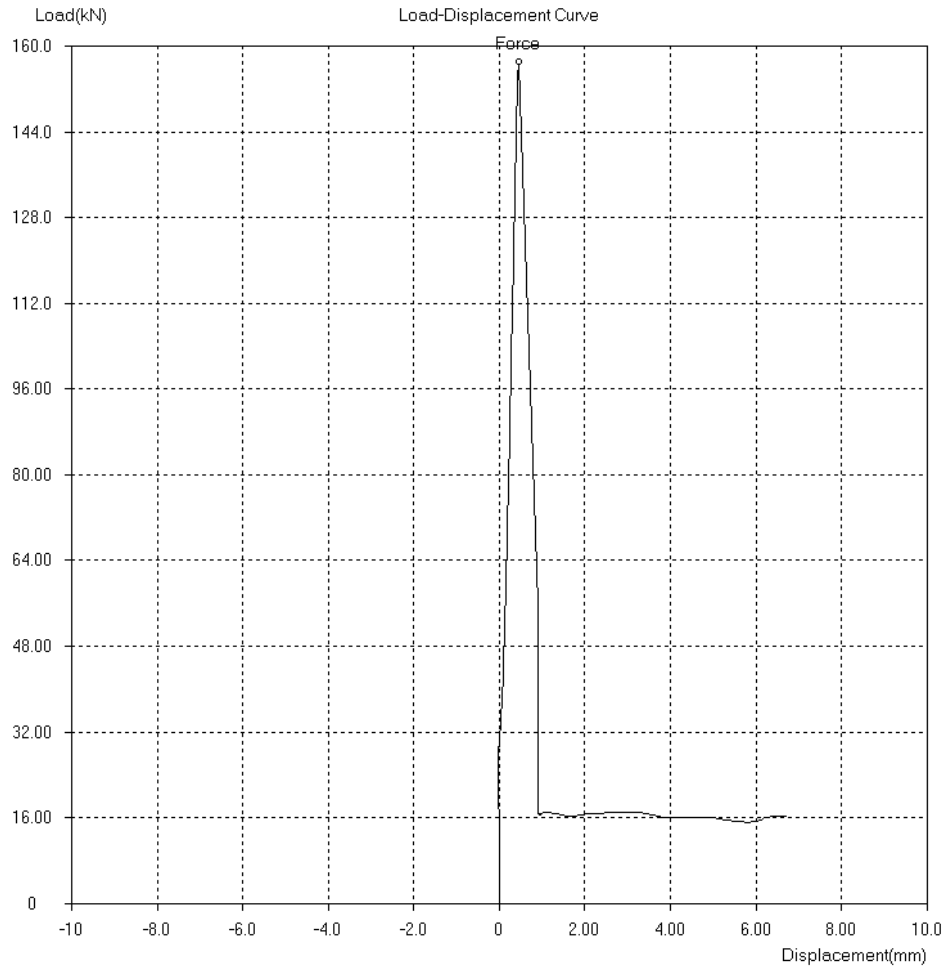


Figura 32 - Gráfico gerado para corpos de prova com fibras de polietileno
Fonte: A autora (2017).

Outra análise que pode ser realizada com os resultados obtidos, é referente ao controle da resistência dos concretos. De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), torna-se possível verificar a resistência característica estimada dos concretos ($f_{ck_{est}}$), de acordo com o número de exemplares confeccionados. A norma foi elaborada para controle de concretos convencionais, no entanto, para este trabalho, será utilizada também para os CPRs, de modo a ter valores comparativos.

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2006), cada exemplar é composto por 2 corpos de prova. Deste modo, visto que foram confeccionados 6 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, tem-se 3 exemplares. Para amostras de 2 a 5 exemplares, é possível estimar o $f_{ck_{est}}$ do concreto através da Equação 7.

$$f_{ck_{est}} = \Psi_6 \cdot f_1 \quad (7)$$

Onde:

$f_{ck_{est}}$: Resistência característica estimada do concreto (MPa);

Ψ_6 : Constante dada em função do número de exemplares;

f_1 : Menor valor de resistência entre as resistências selecionadas dos exemplares (MPa).

O valor de Ψ_6 é dada pela Tabela 8. Visto que o número de exemplares utilizados para todos os concretos confeccionados é 3, e a condição de preparo adotada é B - igualmente adotado como no traço de concreto dosado pelo método ABCP -, tem-se que o valor de Ψ_6 é 0,80.

Tabela 8 - Valores de Ψ_6

Condição de preparo	Número de exemplares				
	2	3	4	5	6
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92
B ou C	0,75	0,80	0,84	0,87	0,89

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2006).

De acordo com os valores de resistências verificadas no ensaio, tem-se os menores valores de resistência entre as resistências selecionadas dos exemplares (f_1). Aplicando os resultados na Equação 7, tem-se os $f_{ck_{est}}$ para os 28 dias dos exemplares. As mínimas resistências dos concretos e o $f_{ck_{est}}$ são dados na Tabela 9.

Tabela 9 - Mínimas resistências dos concretos e $f_{ck_{est}}$ aos 28 dias

	S/F	0,5% FA	1% FA	0,5% FP	1% FP	CC
Mínima resistência (f_1) (MPa)	46,397	42,552	43,392	48,027	43,137	41,609
$f_{ck_{est}}$ (MPa)	37,1176	34,0416	34,7136	38,4216	34,5096	33,2872

Fonte: A autora (2017).

É possível verificar através da Tabela 9 que a resistência característica estimada aos 28 dias dos CPRs é superior à obtida para o concreto convencional para todos os casos.

Por fim, comparando-se os resultados obtidos dos CPRs com os resultados verificados pelos autores Dils, Boel e De Schutter (2013) - autores utilizados como referência para a confecção do traço 4, utilizado neste trabalho -, tem-se que as resistências obtidas foram inferiores a apurada pelos autores. O trabalho realizado por Dils, Boel e De Schutter possibilitou resultado médio de 136,12 MPa aos 28 dias. A maior resistência à compressão média aos 28

dias verificados na Tabela 7, por sua vez, é de 67,84 MPa. Deste modo, tem-se que a resistência alcançada pelos autores é superior à atingida neste trabalho, para a mesma idade de ensaio.

Ressalta-se, no entanto, que algumas técnicas realizadas pelos autores foram diferenciadas das adotadas para este trabalho, como por exemplo, tem-se a mistura a vácuo dos materiais, a utilização de cimentos diferentes, bem como, não se sabe qual o método de cura utilizado pelos autores. Tais fatores, aliados as questões que interferem na resistência mecânica do concreto descritas anteriormente, auxiliam a explicar a diferença nos resultados obtidos entre os trabalhos mesmo utilizando um traço semelhante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Este trabalho analisou experimentalmente a resistência à compressão de concretos de pós reativos com diferentes tipos e dosagens de fibras. Deste modo, as principais conclusões são:

- (1) As resistências à compressão médias de todos os CPRs confeccionados e ensaiados foram superiores as verificada para o concreto convencional. A menor resistência média aos 28 dias observada para o CPR é de 52,05 MPa, sendo 15% superior a resistência à compressão média aos 28 dias do concreto convencional.
- (2) Embora os efeitos benéficos da elevação da temperatura de cura na atividade pozolânica sejam claros, ressalta-se o possível surgimento de gradientes térmicos nos corpos de prova quando submetido a cura térmica e posteriormente à convencional, o que pode levar ao decréscimo de propriedades mecânicas.
- (3) Os corpos de prova sem adição de fibras apresentaram colapso brusco com planos de ruptura bem definidos. Os exemplares com 0,5% de fibras, independentemente do tipo destas, apresentaram ruptura brusca, porém sem destacamento entre as camadas, devido a aderência das fibras ao concreto. Os corpos de prova com 1% de fibras, por sua vez, independentemente do tipo destas, apresentaram apenas fissuras nos corpos de prova, sem destacamento das faces.
- (4) O entrelaçamento de fibras no concreto dificultam o adensamento e preenchimento de todo o volume do molde dos corpos de prova, ocasionando vazios nos mesmo. Tal situação é acentuada de acordo com o aumento de dosagem de fibras no concreto.
- (5) Corpos de prova de CPR sem adição de fibras, após a máxima resistência não apresentam deformação residual. Os modelos com adição de fibras de aço exibem uma deformação e capacidade de carga residuais após a ruptura, demonstrando que após o colapso de uma estrutura, o concreto mantém um certo nível de resistência. Os corpos de prova com fibras de polietileno, por sua vez, não apresentaram deformação residual, semelhante ao comportamento de CPRs sem fibras, demonstrando que este tipo de fibra não apresenta uma aderência significativa com o concreto.

(6) Os resultados obtidos dos CPRs possuíram resistências à compressão inferiores a apurada por Dils, Boel e De Schutter (2013), para a mesma idade de ensaio. No entanto, algumas técnicas utilizadas pelos autores foram diferenciadas das adotadas para este trabalho. Tais fatores, aliados as questões que interferem na resistência mecânica do concreto, auxiliam a explicar a diferença nos resultados obtidos entre os trabalhos mesmo utilizando um traço semelhante.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O traço, o processo de produção e as condições de cura tem um efeito significativo sobre as propriedades dos concreto de pós reativos. Para aplicações em campo, algumas pesquisas adicionais são sugeridas, a fim de contribuir para o entendimento das propriedades físico-químicas e mecânicas deste tipo de concreto, tal como:

- (1) Determinar a influência de diferentes tipos de cimentos, com a finalidade de verificar qual o mais adequado para a confecção dos CPRs;
- (2) Determinar a influência de diferentes tipos de superplastificantes, a fim de determinar o tipo e a dosagem adequada para conferir as melhores propriedades dos CPRs;
- (3) Investigar o comportamento de concretos de pós reativos com utilização de diferentes tipos de adições minerais em substituição à sílica ativa, verificando quais os efeitos de diferentes adições nas propriedades dos mesmos;
- (4) Analisar o comportamento de CPRs reforçados com diferentes tipos e dosagens de fibras às realizadas neste trabalho, visando melhorar as propriedades mecânicas dos CPRs de modo que os concretos apresentem maior deformação antes da ruptura;
- (5) Verificar a influência de diferentes métodos e temperaturas de cura em concretos de pós reativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKAYSI, Mo et al. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**. v. 66, p. 47–56, fev. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão em Corpos de prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.
- BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1.
- BARNETT, Stephanie J. et al. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. **Materials and Structures**. v. 43, n. 7, p. 1009–1023, ago. 2010.
- CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 109.
- CHAN, Yin-Wen; CHU, Shu-Hsien. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 37, n. 7, p. 1167–1172, jul. 2004.
- COPPOLA, Luigi et al. Mechanical properties of modified reactive powder concrete. **American Concrete Institute**. v. 173, p. 1-22, out. 1997.
- DILS, J.; BOEL, V.; DE SCHUTTER, G. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. **Construction and Building Materials**. v. 41, p. 455–463, abr. 2013.
- HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**. v. 37, p. 874-882, dez. 2012.
- ISAIA, Geraldo C.; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, Geraldo C. (Org). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2010.

- MAROLIYA, M. K. Mechanical behavior of modified of reactive powder concrete. **International Journal of Engineering Research and Applications**. v. 2, n. 5, p. 2062-2067, out. 2012.
- MOSTOFINEJAD, Davood; NIKOO, Mojtaba R.; HOSSEIN, Seyed A. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). **Construction and Building Materials**. v. 123, n. 1, p. 754-767, out. 2016.
- PREM, P.R.; BHARATKUMAR, B.H.; IYER, N.R. Influence of Curing Regimes on Compressive Strength of Ultra High Performance Concrete. **Sādhanā Indian Academy of Science**. v.38, n.6, p. 1421–1431, dez. 2013.
- RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of Reactive Powder Concretes. **Cement and Concrete Research**. v. 25, n. 07, p. 1501-1511, out. 1995.
- RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1990.
- VANDERLEI, Romel. D. **Análise experimental de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- WANG, Dehui et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**. n. 101, p. 741-751, dez. 2015a.
- _____. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**. v. 96, p. 368-377, out. 2015b.
- YANG, In H.; JOH, Changbin; KIM, Byung-Suk. Structural Behavior of Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending. **Engineering Structures**. v. 32, n. 11, p. 3478-3487, nov. 2010.
- YI, N.H. et al. Blast-Resistant Characteristics of Ultra-High Performance Concrete and Reactive Powder Concrete. **Construction and Building Materials**. n.28, p. 694-707, 2012.
- ZDEB, T. Ultra High Performance Concrete – Properties and Technology. **Bulletin of the Polish Academy of Science - Technical Science**. v. 61, n. 1, 2013.