

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS - CPR

Gabrieli Formentin Machado (1), Ângela Costa Piccinini (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)gabrieli-fm@hotmail.com, (2)acp@unesc.net

RESUMO

O concreto de pós reativos (CPR) é uma mistura que não leva o agregado graúdo em sua composição, assim, são eliminados os vazios internos da estrutura, ganhando mais resistência e homogeneidade. É constituído de materiais finos com dimensões de partículas máximas de 2 mm, entre eles cimento, sílica ativa, pó de quartzo, superplastificante, areia e um fator água/cimento muito baixo, em torno de 0,15 a 0,20. A adição de fibras pode melhorar a resistência à tração e à compressão e auxiliar na diminuição de fissuras. A utilização do CPR em outros países já possibilitou construções mais leves, esbeltas, de baixo custo de manutenção e com maior vida útil. Há estudos, em laboratórios, que mostram que, com a combinação de algumas técnicas, como aplicação de pressão, cura com altas temperaturas e empacotamento das partículas pode-se chegar a uma resistência à compressão em torno de 800 MPa. Desse modo, este trabalho tem por objetivo desenvolver a mistura de concreto de pós reativos para análise de compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade. Também, analisou-se a influência das fibras metálicas na sua composição. Ao todo, foram 60 corpos de prova (dimensões de 5x10 cm); 30 sem adição de fibras metálicas e 30 com adição. Esses corpos de prova foram ensaiados aos 7 e aos 28 dias e, ainda no estado fresco, foram submetidos a uma pressão de 1,8 tf. Com relação à compressão axial, aos 28 dias, o CPR com fibras metálicas apresentou resultado de 76,66 MPa, 16,34% a mais do que a mistura sem fibras. Na resistência à tração por compressão diametral o maior resultado, também, foi na mistura com fibras, aos 28 dias, com valor de 9,17 MPa, 30,95% a mais do que a mistura sem fibras. Para o Módulo de Elasticidade, o melhor resultado foi aos 28 dias na mistura sem fibras, com o valor de 44,82 GPa. A experiência mostrou que este compósito apresentou baixíssima porosidade e interface pasta agregado quase inexistente. No Brasil, onde o CPR ainda é pouco conhecido, são necessárias pesquisas com relação à caracterização dos materiais e metodologias de ensaio para se tirar proveito das excelentes propriedades mecânicas e durabilidade.

Palavras-Chave: Concreto; pós reativos; fibras metálicas; resistência.

1 INTRODUÇÃO

Em busca por soluções de materiais com maior qualidade, a construção civil procura alternativas para melhorar o desempenho do concreto e obter maior durabilidade e resistência elevada, tornando-o um material com propriedades próximas das rochas (BIZ, 2001).

Segundo Machado (2016), o concreto convencional (CC) precisou ser aprimorado para que atendesse determinadas exigências. Com produtos adicionados à mistura, como os minerais, aditivos e fibras, aliados às técnicas diferenciadas de execução, pode-se obter um concreto com melhora nas suas propriedades, como alto desempenho e alta resistência. Foi desenvolvida, na França e no Canadá em 1990, uma alternativa para obter maiores resistências: o CPR (concretos pós reativos) que caracteriza-se por ser um concreto de alto-ultra desempenho (CAUD), que resiste à compressão entre 200 a 800 MPa, um valor muito elevado comparado com o CC, que chega a até 60 MPa. (BINA, 1999).

Atualmente, conforme Silva *et al* (2013), existem trabalhos documentados de laboratório com resistência à compressão superiores a 800 MPa, fazendo uso da combinação de aplicação de técnicas de pressão, de cura sob altas temperaturas e de empacotamento de partículas.

Para desenvolver o CPR, utilizam-se partículas na faixa de 2 mm, ou seja, o agregado graúdo (brita) é eliminado, assim, consegue-se eliminar boa parte dos vazios no concreto conferindo maior homogeneidade. Devido à retirada desse material, é necessário substituí-lo por outros, tais como sílica ativa, areia de quartzo, fibras de aço, cimento Portland e aditivo superplastificante, além de que o CPR tem uma relação água/cimento muito baixa, na faixa de 0,15 a 0,20. (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

As fibras metálicas também têm grande influência no composto. Conforme Vanderlei e Giongo (2006), elas atuam redistribuindo as tensões internas e, desse modo, combatem o aparecimento das primeiras fissuras, aumenta sua resistência e torna o material mais dúctil.

Conforme Christ (2011), a aplicação de uma pressão confinante no concreto fresco eleva a densidade da mistura. A aplicação desta pressão elimina os vazios deixados na introdução do material durante a concretagem.

De acordo com Andrade (2015), o concreto de pós reativos possui uma elevada durabilidade, o que nos remete a uma baixa porosidade, que caracteriza-se como uma propriedade importante para o concreto, já que também aumenta sua vida útil.

Devido a esse alto desempenho do CPR, ele pode ser utilizado nas mais diversas obras, tais como as que Bina (1999, p. 50) cita:

A utilização do CPR é bastante interessante na construção de estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, passarelas, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimento de fachadas, além de cilindros para laminação, projéteis, engrenagens, etc.

Uma das primeiras obras feitas com o CPR foi a passarela de Sherbrooke, no Canadá, que possui um vão bastante grande, de aproximadamente 56 m, e foi confeccionada com elementos pré-fabricados com 15 cm de altura. (BINA,1999).

O concreto de pós reativos vem para ser mais uma alternativa de projeto para obras especiais da construção civil. Mas para isso, faz-se necessário o domínio da técnica de produção e aplicação desse novo material, explorando todo seu potencial de maneira clara e segura. (BIZ, 2001, p. 50).

Segundo Silva *et al* (2013), apesar de já existirem algumas estruturas construídas com esse material, principalmente na Europa e nos EUA, o CPR ainda necessita de muitos estudos para sua caracterização e aplicação, sendo um tema potencial de novas pesquisas e de desenvolvimento de tecnologias para sua aplicação prática, e em maior escala, no ramo da construção civil, principalmente, no Brasil, onde o CPR ainda é pouco conhecido e não utilizado comercialmente.

Dentro deste contexto o trabalho tem a finalidade de analisar o comportamento do concreto de pós reativos com e sem adição de fibras metálicas submetidos à cura imersos em água à 23° C. Os corpos de prova serão submetidos a uma pressão confinante por alguns segundos. Serão realizados ensaios de compressão axial, tração por compressão axial, módulo de elasticidade e análise microscópica aos 7 e aos 28 dias, com corpos de prova de 5x10 cm.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

2.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CP-V-ARI, que tem como característica atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. Além, de conter elevado teor de clínquer e um grau de finura alto.

2.1.2 Areia

A areia utilizada foi fornecida pelo IPT (Instituto de Pesquisa e Tecnologia do Estado de São Paulo) e é do tipo normal brasileira de acordo com a ABNT NBR 7214:2015.

As frações utilizadas podem ser visualizadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Porcentagem das frações de areias utilizadas.

Peneira Retida (mm)	% Utilizada
1,2	42%
0,6	18%
0,3	15%
0,15	25%

Fonte: Autor, 2017.

2.1.3 Sílica Ativa

A sílica ativa, segundo o fabricante, apresenta diâmetro médio das partículas de 0,20 μm e massa específica de 2,22 g/cm^3 . Foi disponibilizada pelo Laboratório de Materiais da Construção Civil, situado no Iparque – Parque Científico e Tecnológico da UNESC.

2.1.4 Pó de quartzo

O pó de quartzo utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa Esmalglass do Brasil S.A, e utilizou-se o material retido na malha 200. A sua composição básica é o dióxido de silício (SiO_2).

2.1.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado foi da marca BASF, da linha MasterGlenium® ACE tipo 402, o líquido possui uma cor amarelada, um pH de 8.50 - 10.50, e uma massa específica na faixa de 1,055 – 1,100 g/cm^3 .

2.1.6 Fibras Metálicas

As fibras metálicas (Figura 1) utilizadas têm nome comercial de DRAMIX OL TYPES, uma fibra importada da China, cujas dimensões são de 13 mm de comprimento e 0,15 mm de espessura

Figura 1 - Fibras Metálicas



Fonte: Autor, 2017.

2.1.7 Molde para Aplicação de Pressão no concreto

Confeccionou-se uma bucha de *nylon* com dimensão de 5 cm de diâmetro e 4 cm de altura que foi colocada no topo do corpo de prova para ser aplicada a pressão através de uma prensa hidráulica, após a moldagem do corpo de prova.

2.2 MÉTODO

No estudo, analisou-se o concreto de pós reativos com e sem a adição de fibras metálicas. Os corpos de provas (CP) foram submetidos a ensaio de compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade. Os testes foram realizados no laboratório LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil localizado no Iparque – Unesc em Criciúma / SC.

O traço utilizado foi baseado no estudo experimental de Christ (2011), na Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos. A Tabela 2, apresenta o traço utilizado neste estudo.

Tabela 2 - Dosagem da Mistura

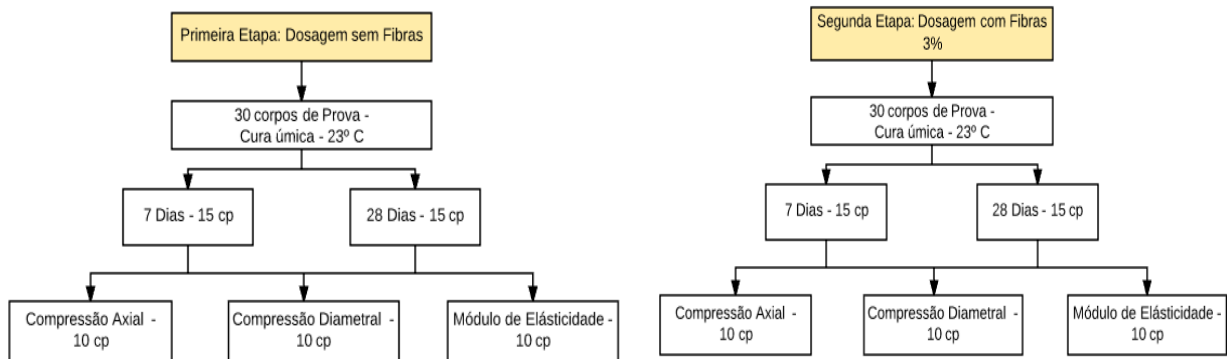
Material	Dosagem 1 – Sem fibras	Dosagem 2 – com fibras
Cimento CP V – Ari	1	1
Areia	1,101	1,101
Sílica Ativa	0,15	0,15
Pó de Quartzo	0,235	0,235
Fibras metálicas	-	0,03
Aglomerante	0,03	0,03
Relação água cimento (kg/m ³)	0,20	0,20

Fonte: Autor (2017).

As misturas se diferem somente na adição das fibras, em que na dosagem 2 utilizou-se 3% de fibras em relação ao cimento utilizado na mistura.

A Figura 2 apresenta o diagrama com a quantidade de corpos de provas e os ensaios submetidos.

Figura 2 – Diagrama das etapas do trabalho



Fonte: Autor, 2017.

2.2.1 Primeira etapa

A primeira etapa foi a confecção dos corpos de provas sem fibras metálicas, da dosagem 1. Os materiais foram pesados previamente e separados em bandejas, para posterior mistura na máquina.

A misturadora utilizada foi de 5 litros, do Laboratório de Materiais de Construção da Unesc, e foi previamente umedecida.

Com a máquina ainda desligada, foram adicionados os materiais, exceto água e aglomerante, e misturados por 5 minutos em velocidade baixa, esse tempo foi suficiente para observar boa homogeneidade. Após esse período, com a misturadora ligada, acrescentou-se água e aglomerante em uma solução única e misturou-se por mais 10 minutos em velocidade baixa. Observou-se que, a partir de 9 minutos, a mistura começa a se tornar fluida e com possibilidade de ser moldada. Para cada mistura, foram confeccionados 5 corpos de provas.

A mistura pronta foi moldada segundo a ABNT NBR 7215:1996 em corpos de prova com medida 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, quatro camadas e adensados com trinta golpes de soquete padrão.

Definiu-se, neste trabalho, que seria aplicado pressão em todos os corpos de prova para que o número de vazios se tornasse menor. Esta pressão foi feita por uma prensa hidráulica, de marca Marcon, com capacidade de 10 tf. Na parte superior dos moldes, havia uma bucha de *nylon* de 4 cm de altura. A força aplicada em cada

corpo de prova foi de 1,8 tf, ou seja, o limite da prensa para que não houvesse perda dos moldes. A Figura 3 apresenta a prensa com a bucha.

Figura 3 – Aplicação da pressão nos corpos de prova



Fonte: Autor, 2017.

Após 24 horas, os corpos de provas foram retirados dos moldes e colocados em um tanque com água a 23° C, onde permaneceram até o dia de sua ruptura. Na Figura 4, estão os corpos de prova desmoldados.

Figura 4 – Corpos de provas desmoldados



Fonte: Autor, 2017.

2.2.2 Segunda etapa

Para a segunda etapa, na dosagem 2, foi adicionado 3% de fibras com relação ao cimento. A mistura realizada seguiu a mesma linha da primeira etapa, porém, as fibras foram adicionadas somente aos 13 minutos de mistura e colocadas em partes para que se distribuíssem bem no composto.

A pressão e a moldagem também seguiram o procedimento descrito na primeira etapa. Também, após as 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados em um tanque com água a 23° C, no qual permaneceram até o dia de sua ruptura.

2.2.3 Rupturas dos corpos de prova

Tanto para a dosagem 1, quanto para a dosagem 2, os CP's foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade em 2 fases: o 1º grupo aos 7 dias e o 2º grupo aos 28 dias. Os dois grupos contêm 30 CP's cada, 15 com fibras e 15 sem fibras.

Para a análise da compressão do CPR, utilizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, conforme a ABNT NBR 5739:2007.

Para a análise de tração, foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a ABNT NBR 7222:2010. Este ensaio analisa, de maneira indireta, a resistência à tração por aplicação de uma força no sentido perpendicular ao diâmetro do corpo de prova.

O módulo de elasticidade obtido foi conforme a ABNT NBR 8522:2008. O objetivo deste ensaio é verificar a deformação do corpo de prova em relação à tensão em determinado tempo de aplicação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os resultados dos valores médios dos ensaios de compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade aos 7 e aos 28 dias, sob cura imersos em água à 23º C.

Tabela 3 - Resultados dos testes sem fibras em 7 e em 28 dias.

	Sem fibras		
	Compressão Axial - Mpa	Tração - Mpa	Módulo Elasticidade – GPa
7 dias	43,18	6,36	34,97
28 dias	65,89	7,01	44,82

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 4 - Resultados dos testes com fibras em 7 e 28 dias.

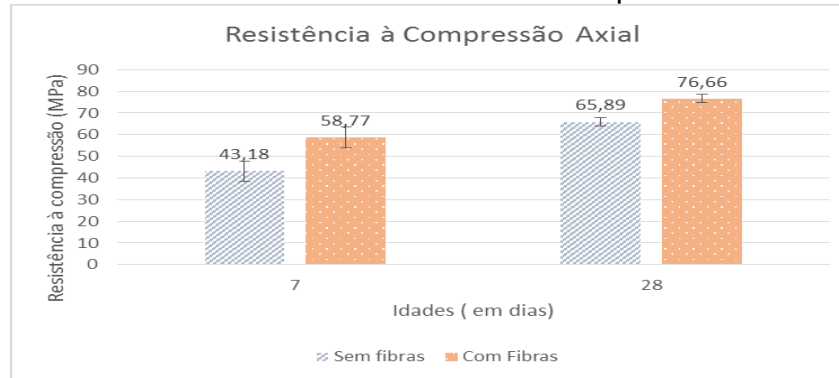
	Com Fibras		
	Compressão Axial - Mpa	Tração - Mpa	Módulo Elasticidade - GPa
7 dias	58,77	6,65	41,56
28 dias	76,66	9,17	43,77

Fonte: Autor, 2017.

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Na figura 5, podem ser observados os resultados de resistência à compressão para as duas composições do CPR, com e sem fibras para as idades de 7 e 28 dias.

Figura 5 - Gráfico dos resultados de Resistência à Compressão Axial



Fonte: Autor, 2017.

Observou-se uma tendência de crescimento com relação aos dias de cura, pois, como em todos os concretos, ocorre uma hidratação das partículas no decorrer do tempo, fazendo com que a sua resistência aumente, tanto no modelo com fibras, quanto no modelo sem fibras.

A mistura sem fibras, na idade de 7 dias, atingiu uma resistência à compressão de 43,18 MPa, já aos 28 dias, a sua resistência aumentou para 65,89 MPa, proporcionando um aumento de 52,6%. A mistura com fibras, aos 7 dias de idade, atingiu uma resistência à compressão de 58,77 MPa, já nos 28 dias, a sua resistência aumentou para 76,66 MPa, proporcionando um aumento de 30,44 %.

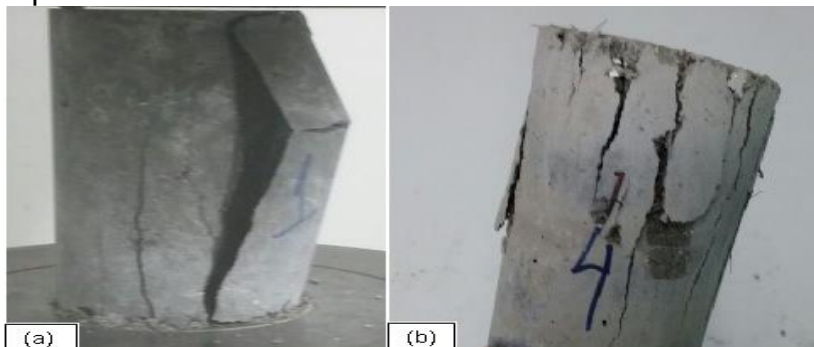
Ao comparar os dois modelos, pôde-se observar que a utilização de fibras no CPR proporcionou um aumento de resistência à compressão, sendo maior nos primeiros dias de idade e a resistência aumenta em um ritmo menor após os 7 dias.

Vanderlei e Giongo (2006) postula que esse aumento maior no modelo com fibras nos primeiros dias se dá pela diminuição da fragilidade do material, e que as fibras atuam como pontes de transferência de tensões, fazendo com que esse modelo redistribua as tensões de forma homogênea, assim, aumentando a sua resistência mecânica.

As duas misturas aparentaram ser iguais quanto à forma de rompimento, apresentando poucas fissuras no sentido vertical, todavia, o modelo que utiliza fibras se mostrou mais dúctil, com mais deformações antes da ruptura, conforme Figura 8.

Sendo assim, comprova-se que a adição de fibras em CPR proporciona maior ductilidade.

Figura 6 – (a) Corpo de prova sem fibras após rompimento (b) Corpo de prova com fibras após rompimento



Fonte: Autor, 2017.

3.1.1 Análise estatística

Com o intuito de analisar os resultados estatisticamente, adotou-se o método do teste de hipótese de comparação de médias com variâncias desiguais, que caracteriza-se como um teste mais rigoroso para análise de duas variáveis. Foram analisados os resultados de compressão com fibras e sem fibras e comparados nas idades de 7 e 28 dias. Pode-se observar na tabela 5 e tabela 6 os valores do *p-value* da amostra.

Tabela 5 - Resultados de Desvio Padrão e *p-value* das amostras aos 7 dias rompidas por compressão axial.

	Idade	Resistência Média	Desvio Padrão	P-value
Sem Fibras	7 dias	43,18	4,67	0,000613
Com Fibras	7 dias	58,77	4,75	

Fonte: Autor (2017).

Tabela 6 - Resultados de Desvio Padrão e *p-value* das amostras aos 28 dias rompidas por compressão axial.

	Idade	Resistência Média	Desvio Padrão	p-value
Sem Fibras	28 dias	65,89	1,79	1,768x10 ⁻⁵
Com fibras	28 dias	76,66	1,89	

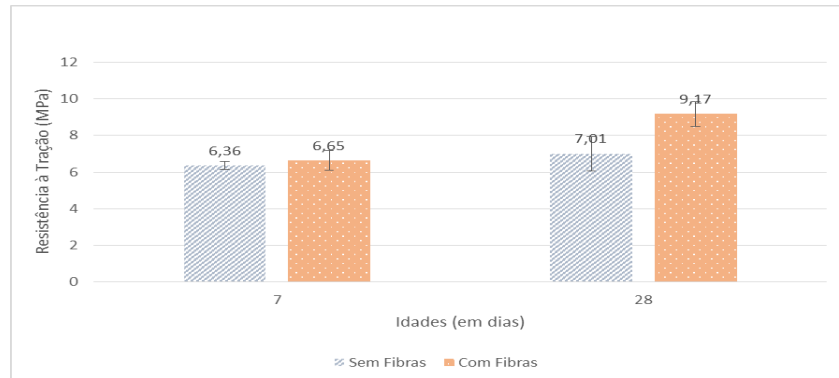
Fonte: Autor (2017).

Como o *p-value* ficou menor do que 5%, pode-se dizer que há 95% de probabilidade de o tratamento com fibras ter maior resistência à compressão do que o sem fibras, para as idades de 7 dias e de 28 dias.

3.2 RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na figura 7, podem ser observados os resultados de resistência à tração por compressão diametral para as duas composições do CPR, com e sem fibras para as idades de 7 e 28 dias.

Figura 7 - Gráfico dos Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Autor, 2017.

Os resultados mostram que a mistura com fibras teve uma resistência à tração por compressão diametral maior em relação à sem fibras. Observa-se que, nos 7 dias de idade, as fibras não interferem significativamente nos resultados, já que a média das duas misturas ficaram muito próximas. Aos 7 dias, na mistura sem fibras, a resistência foi de 6,36 MPa e na mistura com fibras 6,65 MPa, houve um aumento na faixa de 4,5%. Comparando esses dois modelos aos 28 dias, nota-se um aumento de resistência à tração de 30,8% na mistura com fibras.

Quanto a forma de ruptura dos modelos, observou-se que ocorria paralelamente ao eixo de aplicação da força, e, praticamente, sem vazios, o que indica que houve um aumento de densidade do material.

3.2.1 Análise estatística

Adotou-se, para a análise de resistência à tração por compressão diametral, o método do teste de hipótese de comparação de médias com variâncias desiguais, o mesmo método utilizado para análise da resistência à compressão, que é um teste mais rigoroso para análise de duas variáveis. Foram analisados os resultados de tração por compressão diametral com fibras e sem fibras e comparados nas idades de 7 e de 28 dias. Nas tabelas 7 e 8, são apresentados os resultados.

Tabela 7 - Resultados de Desvio Padrão e *p-value* das amostras aos 7 dias rompidas por compressão diametral.

	Idade	Resistencia Média	Desvio Padrão	<i>p-value</i>
Sem Fibras	7 dias	6,36	0,24	0,153786
Com Fibras	7 dias	6,65	0,53	

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 8 - Resultados de Desvio Padrão e *p-value* das amostras aos 28 dias rompidas por compressão diametral.

	Idade	Resistencia Média	Desvio Padrão	<i>p-value</i>
Sem Fibras	28 dias	7,01	0,94	0,002125
Com fibras	28 dias	9,17	0,69	

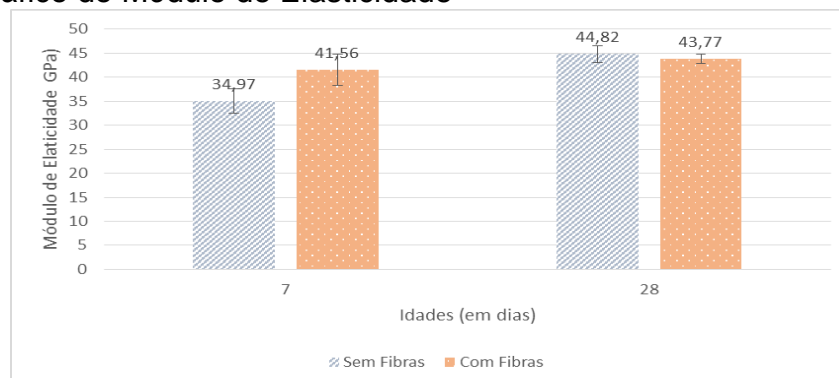
Fonte: Autor, 2017.

Pode-se dizer que, para os 7 dias, os resultados são iguais, pois seu *p-value* foi de 0,153786, ficando acima de 5%. Já as amostras aos 28 dias apresentaram outro comportamento, já que elas se tornam diferentes entre si, por seu *p-value* estar menor que 5% (*p-value* = 0,002125). Então, verifica-se que há 95% de probabilidade de o tratamento com fibras ter maior resistência à tração do que o sem fibras, para a idade de 28 dias.

3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na figura 8, podem ser observados os resultados de módulo de elasticidade para as duas misturas de CPR, sem fibras e com fibras, para as idades de 7 e 28 dias.

Figura 8- Gráfico do Módulo de Elasticidade



Fonte: Autor, 2017.

O módulo de elasticidade é uma propriedade física do material e se dá pela deformação quando submetido a um carregamento. Observa-se uma diferença no módulo de elasticidade aos 7 dias, um aumento de 18,8% com a inserção das fibras,

isto demonstra a ductilidade do material nas primeiras idades para o compósito com fibras.

Aos 28 dias observa-se que houve uma pequena queda deste valor, o que se pode concluir que as fibras não interferiram aos 28 dias.

3.2.1 Análise estatística

Nesta etapa, adotou-se o mesmo método dos itens anteriores para a análise do módulo de elasticidade. Analisaram-se os resultados do módulo de elasticidade com fibras e sem fibras e estes foram comparados nas idades de 7 e 28 dias. Os resultados podem ser vistos nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Resultados de Desvio Padrão e *p-value* das amostras aos 7 dias analisando o módulo de elasticidade.

	Idade	Resistencia Média	Desvio Padrão	<i>p-value</i>
Sem Fibras	7 dias	34,97	2,56	
Com Fibras	7 dias	41,56	3,29	0,004771

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 10 - Resultados de Desvio Padrão e *p-value* das amostras aos 28 dias analisando o módulo de elasticidade.

	Idade	Resistencia Média	Desvio Padrão	<i>p-value</i>
Sem Fibras	28 dias	44,82	1,71	
Com fibras	28 dias	43,77	0,97	0,126131

Fonte: Autor, 2017.

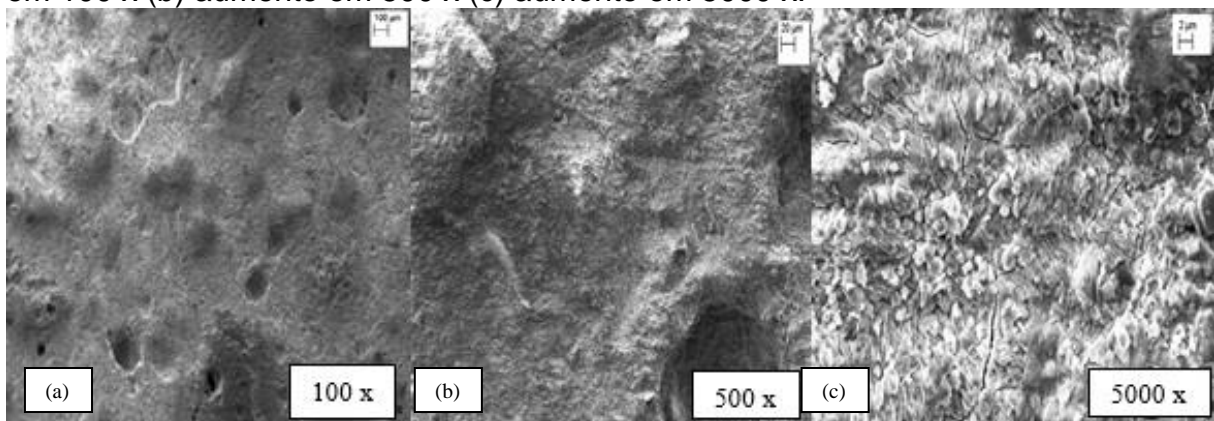
Como o *p-value* aos 7 dias foi de 0,004771, ficando abaixo de 5%, pode-se dizer que há 95% de probabilidade de a mistura com fibras ter maior módulo de elasticidade do que a sem fibras. Já as amostras aos 28 dias mostraram comportamento diferente, elas se tornam iguais entre si, por seu *p-value* estar maior do que 5% (*p-value* = 0,126131), na faixa de 12,61%.

3.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA

A análise microscópica foi realizada com microscópio eletrônico de varredura, da marca Zeiss, modelo EVO MAIO do laboratório CERTEC, no Iparque da Unesc. Foram analisadas as estruturas aos 7 e aos 28 dias, com e sem fibras. Os aumentos foram definidos para melhor visualização da quantidade de vazios internos.

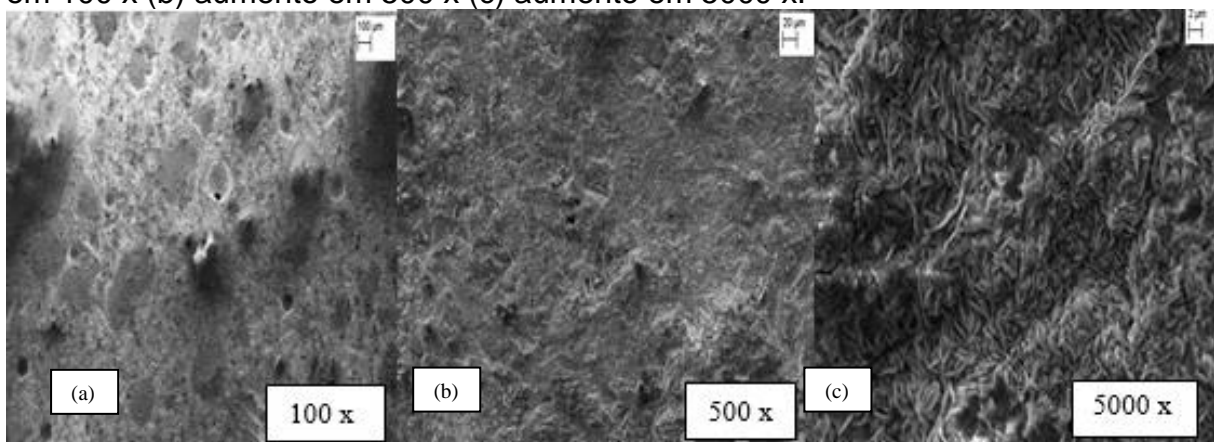
As figuras 9 e 10 apresentam a microestrutura do concreto de pós reativos nas idades 7 dias e 28 dias, respectivamente, sem a adição de fibras metálicas. Observa-se que existem poucos vazios internos na estrutura. Aos 28 dias a mistura demonstra baixíssima quantidade de poros.

Figura 9 – Imagem da microestrutura do CPR idade 7 dias sem fibras (a) Aumento em 100 x (b) aumento em 500 x (c) aumento em 5000 x.



Fonte: Autor, 2017.

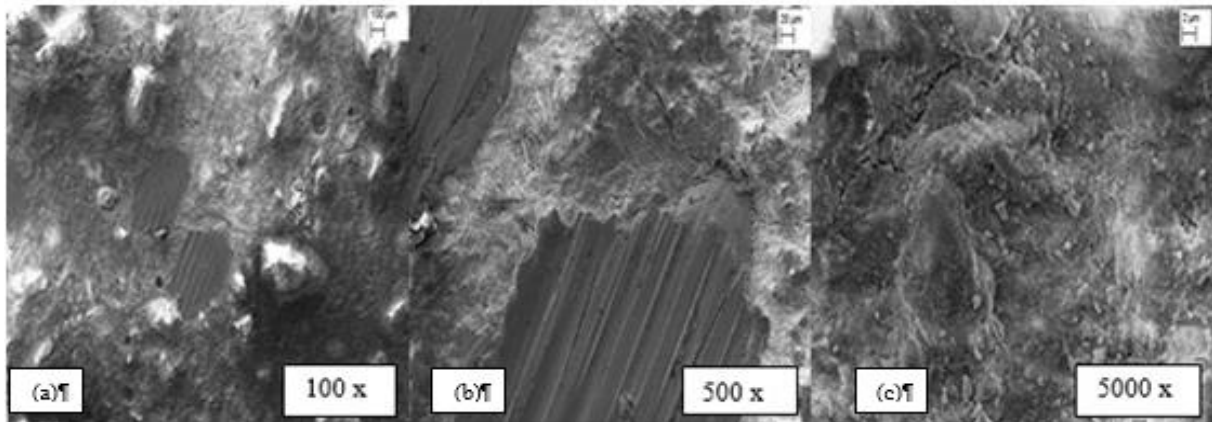
Figura 10 – Imagem da microestrutura do CPR idade 28 dias sem fibras (a) Aumento em 100 x (b) aumento em 500 x (c) aumento em 5000 x.



Fonte: Autor, 2017.

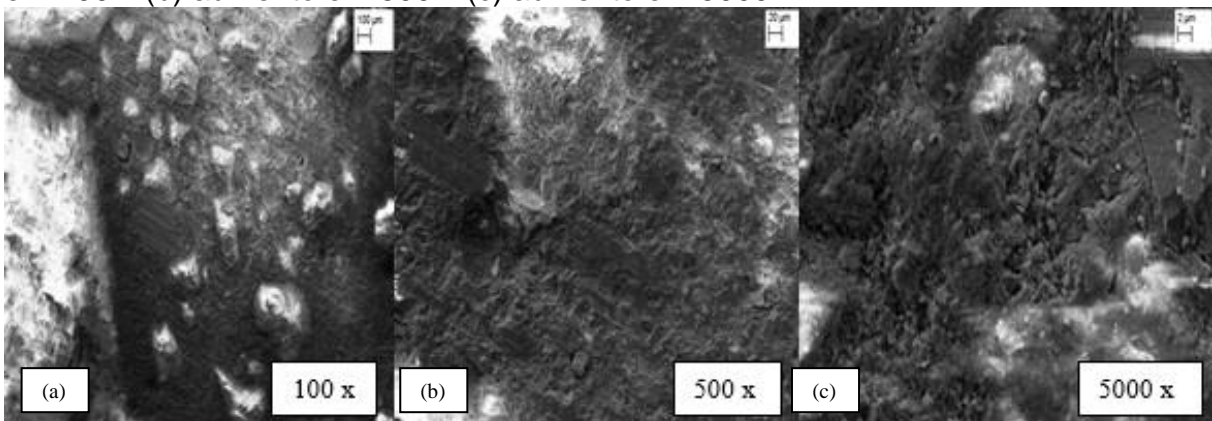
As Figuras 11 e 12 representam as misturas com fibras, nas idades de 7 e de 28 dias, respectivamente. Pode-se observar, nas imagens, que a fibra ocupa grande parte da região. Para esse ensaio, a fibra foi polida. A quantidade de vazios é ainda menor se comparada com o modelo sem fibras.

Figura 11 – Imagem da microestrutura do CPR idade 7 dias com fibras (a) Aumento em 100 x (b) aumento em 500 x (c) aumento em 5000 x.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 12 – Imagem da microestrutura do CPR idade 28 dias com fibras (a) Aumento em 100 x (b) aumento em 500 x (c) aumento em 5000 x.



Fonte: Autor, 2017.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, fica evidente que o concreto de pós reativos é uma mistura que tem muito potencial para atingir grandes resistências, mediante a maior caracterização dos materiais utilizados e também com a consideração do empacotamento das partículas, que mostra ser um fator importante para que esta mistura atinja boa trabalhabilidade, alta resistência à compressão e à tração, maior durabilidade e ductilidade.

Foi possível, também, concluir que a mistura é bem fluida e tem um endurecimento rápido se não moldado imediatamente.

Os estudos experimentais realizados neste trabalho permitem concluir que:

- A idade do concreto influência de forma significativa na resistência à compressão, sendo que aos 7 dias os resultados foram menores do que aos 28 dias.
- A mistura sem fibras, aos 28 dias, apresentou um aumento de 52,6% e a mistura com fibras de 30,44%, na resistência, comparadas com os 7 dias, assim como no concreto convencional;
- As fibras metálicas atuam na resistência à compressão. Ao analisar-se os resultados do CPR com e sem fibras, ocorre um acréscimo na resistência à compressão, tanto nas idades de 7 quanto nas de 28 dias, nas misturas com fibras. Isso se deve às pontes de tensões que elas geram na estrutura interna, impedindo o aparecimento das primeiras fissuras e proporcionando maior ductilidade. A maior resistência à compressão foi na amostra com fibras e aos 28 dias, com valor de 76,66 MPa (16,34% maior do que a sem fibras). As fibras, também, apresentaram grande desempenho nas primeiras idades, alcançando uma faixa de resistência à compressão bem maior do que a mistura sem fibras (36,10 % maior na mistura com fibras comparada com a sem fibras);
- A adição das fibras metálicas proporciona, também, maior aumento da tração aos 28 dias, estando na faixa de 9,17 MPa, enquanto a sem fibras ficou com 7,01 MPa;
- Nota-se que, aos 7 dias, os modelos com e sem fibras não obtiveram grandes diferenças de resistência à tração por compressão diametral. A amostra sem fibras apresentou valor de 6,36 MPa e a amostra com fibras apresentou valor de 6,65 MPa;
- As fibras não provocam interferências significativas no módulo de elasticidade, principalmente, aos 28 dias, em que houve uma pequena redução do valor nos corpos de provas que continham fibras. Os valores foram de 44,82 GPa (sem fibras) e de 43,77 GPa (com fibras);
- A pressão aplicada de 1,8 tf pode não ter influenciado, por ser uma carga baixa para se conseguir uma redução maior dos vazios. Essa pressão foi limitada, pois houve abertura dos moldes e perda de material. Em bibliografias sobre o assunto, relatam-se pressões em torno de 10 tf;
- O concreto de pós reativos apresentou uma microestrutura diferente do concreto convencional, são poucos vazios internos, o que gera uma mistura mais

densa e com baixa porosidade, conferindo, neste tipo de material, alta resistência e durabilidade.

Alemanha, França e Japão são países que já possuem manuais de instruções específicos de utilização do CPR. Contudo, no Brasil, ainda faltam estudos para esse material, logo, são necessárias pesquisas para aproveitar o máximo potencial e alcançar excelentes durabilidades e propriedades mecânicas.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Usar o método do empacotamento das partículas para conseguir que cada material ocupe seu espaço dentro da mistura;
- Realizar ensaios com diferentes tipos de areia, cimento e pressões para analisar a influência de cada elemento nas resistências;
- Fazer análise granulométrica dos componentes;
- Submeter os corpos de prova em cura térmica para analisar diferenças de resistência;
- Utilizar outros materiais, como GGBS (escória de alto forno) e pó de mármore, com menores quantidades de cimento, tornando-o um concreto ecoeficiente.
- Avaliar as vantagens com relação ao custo do material para aplicação em obras.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Talita Cristina C. Soares de. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. 102 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaios de cimento - Especificações. Rio de Janeiro, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

BINA, Paulo. Concreto de pós reativos: uma revolução no conceito do concreto. **Revista techne**, São Paulo, n. 8, p.50-51, jan/fev, 1999.

BIZ, Carlos Eduardo. **Concreto de pós reativos**. 2001. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CHRIST, Roberto. **Contribuição ao estudo do concreto de pós reativos**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011. 92 p.

MACHADO, Felipe Gabriel et al. Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de pós reativos com adição de celulose nanofibrilada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 60., 2016, Águas de Lindóia. **Anais...** . Águas de Lindóia: CBC, 2016. p. 2504 - 2513.

SILVA, Brudo do Vale et al. Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: part 1. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 6, n. 5, p.715-736, out. 2013.

TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. Congresso Ibracon, São Paulo, 2011. 44 p.

VANDERLEI, Romel Dias; GIONGO, José Samuel. **Análise experimental do concreto de pós reativos:** dosagem e propriedades mecânicas. 2006. Universidade Estadual de Maringá, São Carlos, 2006. 34 p.