

DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS (RPC) COM FIBRAS SINTÉTICAS

Thaís L. C. da Silva

Universidade Católica de Petrópolis
thaislealss@hotmail.com

Prof. Robson Luiz Gaiofatto, D.Sc.

Universidade Católica de Petrópolis
robson.gaiofatto@ucp.br

RESUMO

De acordo com inúmeras vantagens já estudadas em relação à adição de fibra em concretos, este trabalho foi desenvolvido com a expectativa de se obter correlações entre o teor de fibras sintéticas adicionadas e a matriz do RPC e analisar a atuação das fibras no controle de fissuras. Existe uma grande carência de estudos sobre RPC reforçado com fibras sintéticas apesar de ser um assunto de grande importância na atualidade, principalmente devido às características positivas das fibras de polipropileno, que além de bastante econômicas, ainda são quimicamente inertes, não absorvem água, são imputrescíveis e não enferrujam. Foram realizados ensaios de resistência à tração e à compressão nos corpos-de-prova com idades de 7, 14 e 28 dias, com teores de 1, 3 e 5% de fibras. Os resultados de testes de tração e compressão mostraram que incorporação das fibras de polipropileno ocasionaram perdas de resistência, sendo que as de compressão foram bem mais notáveis. Os resultados gráficos dos testes de tração mostraram que houve uma grande melhora em relação à tenacidade e a ductilidade do material compósito reforçado com a fibra de polipropileno, sendo o teor de 5 % obteve maior absorção de energia até a fratura. Houve dificuldade de adensamento dos corpos-de-prova devido ao teor de fibra aplicado. Dificuldades de homogeneização também foram percebidas com baixos teores de fibra empregados. Análises microscópicas mostraram uma ótima aderência da fibra na matriz.

Palavras-chave: RPC, Fibras de polipropileno, Controle de fissuras.

1 INTRODUÇÃO

Conforme inúmeras vantagens obtidas no reforço do concreto convencional por intermédio de adição de fibras, este trabalho foi proposto com a expectativa de se obter, com a adição das fibras sintéticas, um RPC que modifique seu comportamento mecânico após a ruptura da matriz, melhorando assim, consideravelmente a capacidade de absorção de energia do concreto e diminuindo o seu nível de fragilidade.

De forma geral, existe uma grande carência de estudos sobre RPC reforçado com fibras sintéticas, e ainda são poucas as informações sobre o material. No entanto, o conhecimento do comportamento destas fibras na matriz do RPC é de grande importância, pois atualmente o concreto reforçado com fibra sintética mostra-se como um material promissor para a utilização como material de construção por vários motivos, dentre eles porque o polipropileno é quimicamente inerte, não absorve água, é imputrescível e não enferruja. A mistura destes

materiais se enquadra perfeitamente no conceito de compósitos fibrosos. No plano econômico, o aumento do uso da fibra se justifica pelo baixo custo e fácil disponibilidade. A resina de polipropileno é mais barata que outros polímeros, além disso, o processo de fabricação do fio de polipropileno também é mais barato. Soma-se a isto o fato de que o seu manuseio, tanto na fábrica como na obra, não oferece qualquer dano à saúde dos operários.

Este estudo tem o objetivo de desenvolver através de trabalho experimental, RPC com diferentes teores de fibra de polipropileno e estudar o seu desempenho, que consiste em análises gráficas dos testes de resistência à compressão e à tração, análises de propriedades como ductilidade, tenacidade e restrição à formação de fissuras. Também foram analisados os comportamentos relacionados ao material fresco, como trabalhabilidade e dificuldades de mistura, e do material endurecido, como a aderência das fibras na matriz e sua distribuição homogênea nos corpos de prova.

2 IMPORTÂNCIA DAS FIBRAS NO RPC

A ideia da utilização de fibras para melhorar o comportamento de materiais de construção é antiga e intuitiva. Segundo NAAMAN (1985), na Bíblia, no livro de Êxodos, constam-se relatos da adição de fibras de palha em tijolos de barro secos ao sol (adobe) e fibras de asbesto em cerâmicas com a finalidade de criar compósitos constituídos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (fibras). No caso do adobe, pretendia-se obter maior resistência à fissuração e menor fragmentação após a fissuração induzida por repetitivas alterações de temperatura e de umidade.

O concreto normalmente contém muitas microfissuras, e a sua rápida propagação sob tensão aplicada é responsável pela baixa resistência a tração do material. O reforço do compósito da matriz do concreto por intermédio de adição de fibras é exemplo de investigação que tem sido desenvolvida na perspectiva da obtenção de um material resistente e com ductilidade (CARNIO, 2009).

Existe uma grande variedade de fibras para uso em matriz de cimento como, por exemplo: fibras de vidro, fibras de metal, fibra de carbono, fibra vegetal natural e fibras de polímeros (fibras sintéticas). A escolha da fibra é função das características que se deseja no compósito. (BIZ, 2001).

O comportamento da matriz do RPC é puramente linear e elástico, sendo então frágil, com baixa capacidade resistente das seções e baixas deformações quando submetidas a esforços de tração. Assim, praticamente não apresentam deformações plásticas. O reforço com fibras descontínuas e aleatórias distribuídas na matriz controla a abertura e propagação de fissuras no concreto, alterando o seu comportamento mecânico após a ruptura da matriz, melhorando consideravelmente a capacidade de absorção de energia do concreto e diminuindo o nível de fragilidade do material. Este controle na abertura das fissuras reduz de forma significativa danos provocados pelas diversas formas de retração, que acontecem em diversas fases da vida do concreto (GAIOFATTO, 1998). Isto ocorre porque as fibras atuam “costurando”, preservando a resistência mecânica das seções. Desta forma, dependendo de suas características, as fibras podem atuar tanto nas microfissuras, retardando o processo de coalescência, ou agir sobre as microfissuras, no trecho pós-pico de resistência, conferindo um aumento significativo da energia associada à ruptura do material. No primeiro caso, pode-se ter aumento na resistência do compósito, e no segundo caso, incremento de ductilidade e tenacidade.

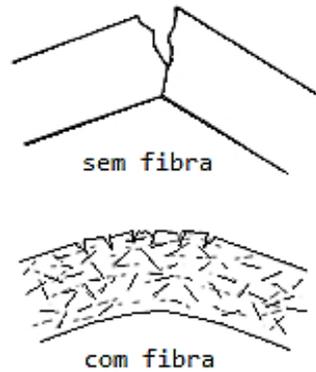


Figura 1 – Fibras atuando no controle de fissuração

Um fator a ser considerado na tentativa de otimizar a atuação das fibras é o efeito que diferentes teores de fibras podem promover no desempenho do material compósito. O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (RODRIGUES & MONTARDO, 1994). Entretanto, existe um volume crítico de fibras que é diretamente influenciado pela resistência da matriz, de forma que concretos mais resistentes demandarão mais volume de fibras para a manutenção da tenacidade (BIZ, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Foi utilizada uma composição de RPC 10 elaborado pelo laboratório de concreto da Universidade Católica de Petrópolis. As matérias primas utilizadas compuseram uma mistura fina (de partículas com diâmetro máximo de $297\mu\text{m}$) de aglomerantes (cimento e sílica) e agregados (areia e pó de quartzo) com relação $a/(c+s)$ igual a 0,2, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Composição do RCP 10

Material	Quantidade (Kg/m ³)	Diâmetro máximo (μm)
Cimento Portland Tipo V-ARI	873	177
Areia	480	297
Areia	480	177
Quartzo	105	74
Quartzo	61	44
Quartzo	42	37
Sílica ativa densificada	105	177
Sílica ativa não densificada	105	177
Água	218	-
Aditivo superplastificante	57	-
Relação $a/(c+s)$	0,2	-

3.2 Métodos

Após a mistura dos componentes secos (aglomerantes e agregados), foi adicionado o teor de água e de aditivo superplastificante para a hidratação do cimento. A adição desses componentes foi realizada em 2 etapas: inicialmente foi adicionado cerca de 70% da água juntamente com o aditivo, e, cerca de 30 segundos depois, foi adicionado o restante da água.

Fibras de polipropileno com características que são mostradas na tabela 2 foram adicionadas às composições em teores iguais a 1, 3 e 5% em relação ao peso dos aglomerantes. A incorporação das fibras no concreto foi realizada após a mistura e homogeneização do concreto.

Tabela 2 – Características das fibras de polipropileno empregadas

Material	Densidade	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Frequência de ondulação (%)
Polipropileno (PP)	0,91	25	1,1	25

Concluído o processo de mistura, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. O adensamento foi realizado com barra de ferro de 8 mm, em três camadas de 30 golpes cada, girando a barra para a melhor expulsão do ar existente nos corpos-de-prova. Os mesmos foram levados para a câmara úmida, onde permaneceram por 24 horas, e em seguida as formas foram retiradas. A cura foi realizada em câmara climatizada a uma temperatura de 90 °C e umidade relativa igual a 100% por 72 horas. Em seguida, foi desligada a câmara, e as amostras permaneceram na mesma por mais 24 horas para resfriar e, logo após foram levados para tanques onde os mesmos ficaram imersos em água a temperatura ambiente.

Foram realizados ensaios de resistência à tração, de acordo com a norma NBR 7222, ensaios de resistência à compressão, de acordo com a norma NBR 5739 em corpos de prova com idades de 7, 14 e 28 dias.



Figura 2: Fibras de polipropileno empregadas

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de Resistência

O comportamento do RPC com diferentes teores de fibra relacionado à resistências de tração e compressão pode ser comparada após análises gráficas computacionais. Foi feita uma média de resistência de todos os corpos-de-prova com os mesmos teores de fibra para cada idade do RPC ensaiada.

Na tabela 3 observa-se o comportamento típico do RCP 10 com 0% de fibra que foram obtidos em testes no laboratório.

Tabela 3 – Resultados dos testes com 0% de fibra

Fibra (%)	Idade (dias)	Resistência à tração (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
0	7	5,6	120
0	14	7,4	131
0	28	8,2	147

A média dos resultados para o teor de 1% de fibra, da tabela 4, mostrou pouca variação de resistência nos testes compressão quando comparamos aos testes com 0% de fibra, não apresentando assim nenhuma mudança significativa entre os dois teores empregados. Os testes de tração mostraram uma queda de resistência pouco notável, que não contribuem sensivelmente para a obtenção de conclusões.

Tabela 4 – Média dos resultados dos testes com 1% de fibra

Fibra (%)	Idade (dias)	Resistência à tração (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
1	7	6,7	135
1	14	6,8	139
1	28	5,9	111

Em relação à média dos resultados com 3% de fibra (tabela 5), houve uma queda bastante considerável na resistência à compressão, o que poderia significar uma perda entre 40 e 50% da resistência do RPC relacionado com os testes de 0 ou 1 % de fibra das tabelas 3 e 4, respectivamente. Os resultados de tração obtiveram uma nova queda de resistência, ainda pouco notável quando comparada com os mesmos testes com 1% de fibra, mas que quando comparados aos testes com 0% de fibra, já se pode notar uma perda que chegou a ser de cerca de 20% da resistência, aos 28 dias.

Tabela 5 - Média dos resultados dos testes com 3% de fibra.

Fibra (%)	Idade (dias)	Resistência à tração (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
3	7	4,7	82
3	14	6,4	91
3	28	6,4	64

Como se pode ver agora na tabela 6, os testes com 5% de fibra apresentaram um comportamento bastante similar aos resultados com 3% de fibra que foram mostrados na tabela 5, podendo assim afirmar que ambas as resistências (tração e compressão) foram praticamente diminuídas igualmente quando comparadas a resultados de testes sem fibra da tabela 3.

Tabela 6 – Média dos resultados dos testes com 5% de fibra.

Fibra (%)	Idade (dias)	Resistência à tração (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
5	7	6	70
5	14	6,7	64
5	28	6	72

4.2 Resultados relacionados à ductilidade e tenacidade

O grande avanço que se observou no RCP com fibras foi a possibilidade do material absorver energia até a sua fratura, aumentando suas possibilidades de aproveitamento como material estrutural.

Ao fazer comparações entre os gráficos testes de tração com 0, 1, 3 e 5 % de fibra percebeu-se que na maioria dos casos foram obtidos comportamentos similares para os teores empregados, o que demonstra que os corpos-de-prova examinados apresentaram certas características padrão nos ensaios.

Fazendo a análise das figuras 3 e 4, que correspondem às análises gráficas de corpos-de-prova de RPC submetidos a ensaios de tração por compressão diametral, pode-se perceber que, em ambas as figuras, a curva formada pelo corpo-de-prova com 0% de fibra, mesmo apesar de ter atingido a maior resistência, mostra-se extremamente frágil, também se rompe quase que imediatamente após o início do rompimento da primeira fissura (onde é atingida a força máxima). Fazendo a análise das curvas de ambas as figuras correspondentes ao corpo-de-prova com 1%, podemos afirmar que estas se assemelham às curvas de 0%, porém, com inclinação vertical bem mais acentuada e retilínea, demonstrando seu ganho de tenacidade em relação à curva de 0%. Agora, em relação às curvas de 3 e 5%, observa-se que, além ganho de tenacidade comparado com a curva 0 %, ambas tem um enorme ganho de ductilidade, e mostram que, após atingir a tensão máxima, continuam absorvendo energia até a fratura e, modificando assim, os seus comportamentos mecânicos. Relacionando todas as curvas da figura 3, observa-se claramente que o corpo-de-prova com 5% de fibra, por ter mais quantidade de fibras, atua melhor “costurando” a matriz e impedindo que ela se rompa bruscamente.

Houve também a percepção da ocorrência de duas fases no gráfico das curvas com fibras: uma elástica linear até 70% ou 90% da força máxima e uma fase de amolecimento onde a tensão decresce com abertura da fissura principal. Algumas vezes, nos corpos-de-prova com 3 e 5% percebeu-se também que, antes da força máxima, houve uma fase de encruamento, onde o material passa para a fase plástica na curva. As curvas correspondentes ao teor de 1% também apresentou fase de encruamento algumas vezes, mas com menos intensidade.

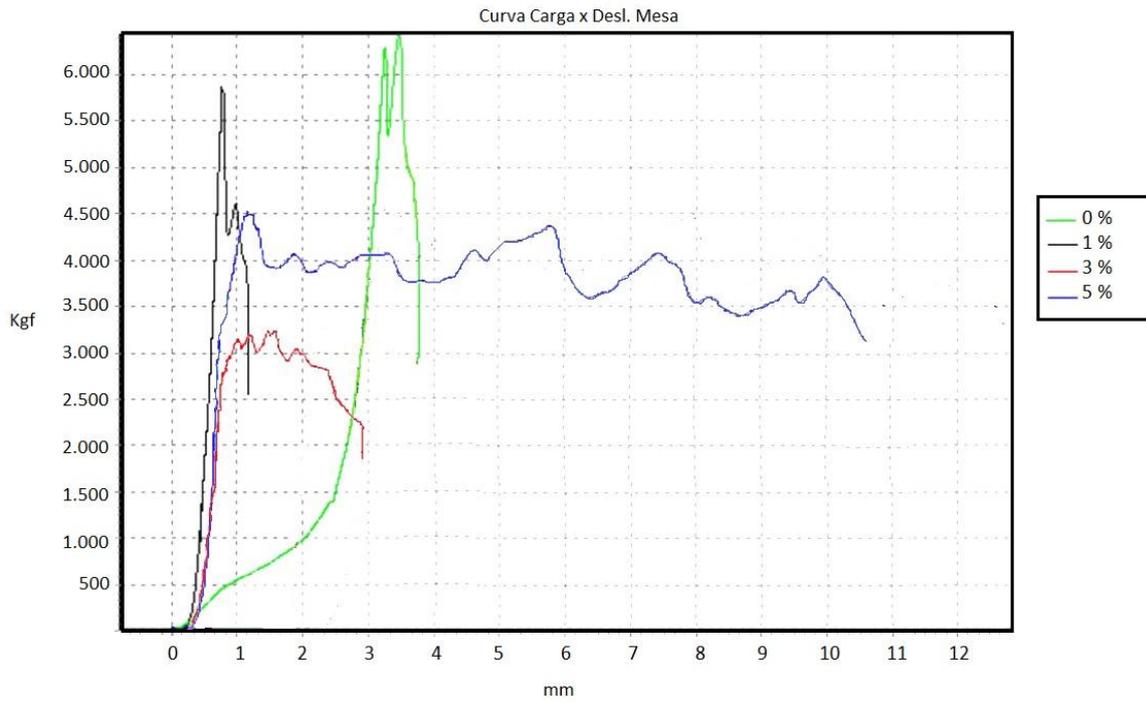


Figura 3: Gráfico carga x deslocamento da mesa – tração 1

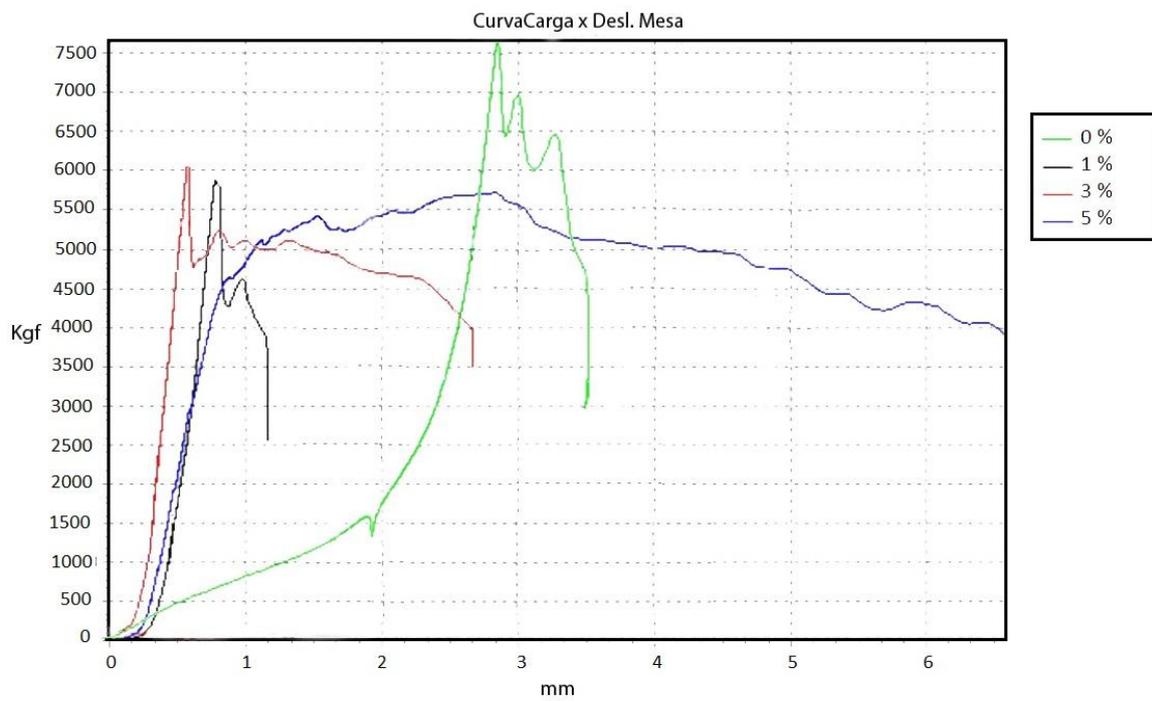


Figura 4: Gráfico carga x deslocamento da mesa – tração 2

4.3 Resultados do RPC no estado fresco e endurecido

Em termos de trabalhabilidade, nenhum teor de fibra afetou consideravelmente a plasticidade do RPC. O que se observou foi a maior dificuldade no adensamento do corpo-de-prova com fibras, em um fator que aumentou proporcionalmente com o aumento do teor de fibra.

Houve dificuldade na homogeneização das fibras nos corpos-de-prova com teores iguais a 1 e 3% de fibra. Ao realizar os ensaios de compressão e tração foi observada a má distribuição das fibras em alguns corpos-de-prova, o que pode ser um fator que justifique o motivo de alguns resultados abaixo da média obtida. Com o RPC de teor 5% não se observou problemas com homogeneização devido ao grande volume de fibras adicionado.



Figura 5: Corpo-de-prova com 5% de fibra com rompimento por tração

Foi feita também uma análise simples em microscópio óptico, com aumento de 30x, onde pode ser observada a capacidade de aderência da fibra na matriz do RPC.

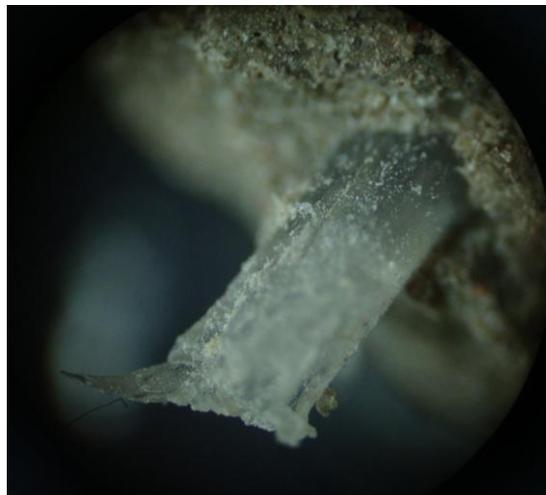


Figura 6: Fibra rompida por tração

Na figura 6 podemos ver que, mesmo a fibra rompida, continua bem fixa à matriz do RPC.

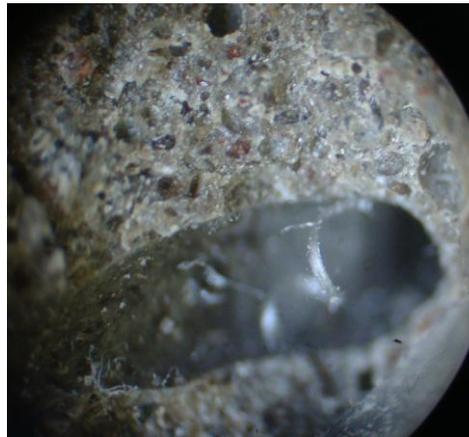


Figura 7: Fibra arrancada da matriz

Observando a figura 7 nota-se que a fibra foi arrancada da matriz, deixando em seu lugar um espaço vazio cheio de “fios” que demonstrando que realmente existe bastante resistência contra o seu arrancamento.

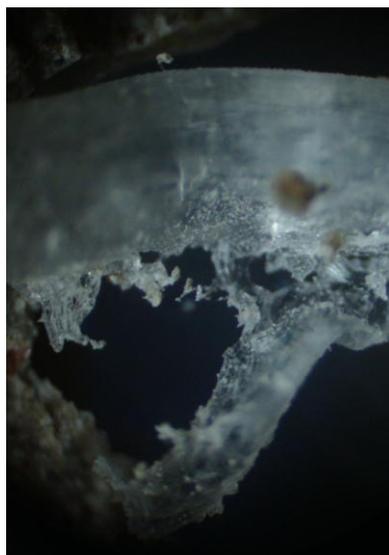


Figura 8: Fibra estraçalhada devido ao esforço que foi submetida

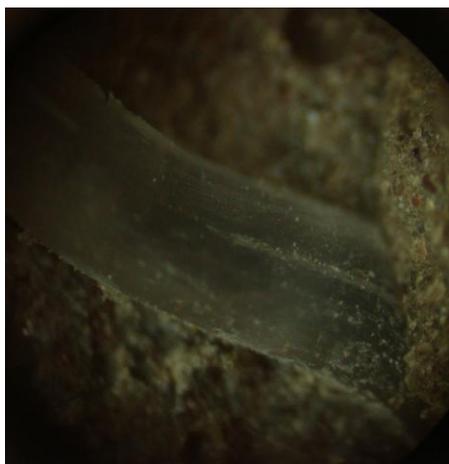


Figura 9: Fibra bem aderida na matriz

5 CONCLUSÃO

Em relação aos testes de resistência à tração e compressão, o teor de 1% de fibras sintéticas não alterou nenhuma característica do RPC quando o mesmo foi comparado com resultados de testes de corpos-de-prova sem fibra. A incorporação de 3% gerou uma perda de até 50% da resistência à compressão e uma perda de até 20% da resistência à tração, quando foram comparados ao concreto sem a fibra. O teor de 5% manteve praticamente constante os resultados da incorporação de 3%.

As análises dos gráficos de tração seguiram um padrão praticamente constante quando foram comparadas entre si. Os corpos-de-prova com 0% de fibra são extremamente frágeis, e se rompem logo após o início da primeira fissura. Os corpos-de-prova com 1% de fibra, apesar de não mudar muito o comportamento do gráfico comparado com os de 0%, já apresentam um enorme ganho de tenacidade por apresentar sua trajetória inicial bem mais acentuada. A curva referente aos materiais com 3% de fibra mostra que, além do ganho de tenacidade igual ao material de 1%, ainda modificou o seu comportamento mecânico, onde após atingir a sua tensão máxima, o mesmo continua absorvendo energia, e deixando assim de ser um material frágil e se tornando dúctil ou deformável. O comportamento do RPC com 5% de fibra, principalmente, mostra características importantíssimas que materiais de construção precisam. O RPC com teor de 5% de fibra apresentou, além do mesmo ganho de tenacidade dos outros teores fibrosos, ainda reforçou bastante as suas características dúcteis, absorveu muita energia após a abertura da primeira fissura, fazendo com que o material continuasse sua trajetória bastante tempo antes de se romper realmente. Isso ocorreu por causa das fibras que atuaram “costurando” as fissuras, preservando assim a resistência mecânica das seções e retardando o rompimento total da peça.

Ainda em relação aos gráficos, conclui-se que o RPC com qualquer teor de fibra empregada apresentou duas fases: uma elástica linear até cerca de 70 ou 90% da força máxima e uma fase plástica onde a tensão decresce com a abertura da fissura principal. Nos corpos-de-prova com 3, e principalmente com 5%, também pode-se adicionar uma fase, que ocorre um encruamento. Este encruamento também ocorreu no RPC com 1% de fibra, mas com bastante menos intensidade.

As porcentagens de fibra empregadas não afetaram muito a trabalhabilidade do material compósito, mas uma dificuldade na fase do adensamento do material foi percebida. Essa dificuldade se agravou com o aumento das fibras.

As maiores dificuldades de homogeneização foram obtidas no RPC com teor de 1% de fibra, o que certamente colaborou para a falta de padrão dos resultados dos testes.

Concluiu-se também que, por intermédio de análises microscópicas, as fibras garantem uma ótima aderência na matriz do material compósito.

6 AGRADECIMENTOS

Thaís Leal Corrêa da Silva é bolsista PIBIC do CNPq e agradece ao laboratório de concreto da Universidade Católica de Petrópolis pelo suporte fornecido para esse trabalho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 5738/03 – Procedimento para moldagem de corpo de prova** - Rio de Janeiro, 2003.
- [2] _____ – **NBR 5739/94 – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto** – Rio de Janeiro, 1994.
- [3] _____ - **NBR 7222/94 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 1994
- [4] BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. 2001. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Concentração de Edificações, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- [5] BRANDÃO, J. H. **Análise Experimental e Numérica de Cascas de Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras**. 2005. 144 f. Tese (Doutorado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [6] CARNIO, M. A. **Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto reforçado com Baixos Teores de Fibra**. 2009. 167 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia De Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- [7] GAIOFATTO, R.L. **As diversas formas de retração** – Anais do III Congresso de Engenharia Civil da UFJF, Juiz de Fora, 1998.
- [8] MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2000.
- [9] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2006.
- [10] NAAMAN, A. E. (1985). **Fiber Reinforcement for Concrete**. Concrete International, v.7, n.3, p.21-25, March.
- [11] NEOMATEX COMÉRCIO DE FIBRAS E TÊXTEIS TÉCNICOS LTDA. (São Paulo). **Durus - macrofibra sintética estrutural para concreto: ficha técnica do produto**. Taboão da Serra, 2009. 1 p. Disponível em:

<http://www.construtec.ind.br/site/produtos/Macrofibra_Durus.pdf>. Acesso em: 05 set. 2010.

[12] RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos**. 2002. Trabalho apresentado ao 44º Congresso Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, 2002.