

CONCEPÇÃO DE VIGAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS PARA ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Gustavo Lombardo ¹; Cássia Silveira de Assis ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O concreto reforçado com fibras é comumente utilizado com a finalidade de realizar o controle da retração plástica, garantir a inibição do desenvolvimento de fissuras e proporcionar tenacidade. Com o objetivo de beneficiar o desempenho da matriz de concreto convencional, sua aplicação é dada em variadas estruturas de uso comum. Compreendendo tal importância, este trabalho visa interpretar o comportamento mecânico do compósito, tendo-se o teor de fibras como parâmetro independente e condicionante da performance do CRF, com o intuito determinar o teor crítico e propiciar uma melhor compreensão das propriedades em estudo. Desta forma, a fim de caracterizar a capacidade resistente apresentada pelo mesmo, foram realizados ensaios laboratoriais e simulação computacional nos quais possibilitam a análise numérica e experimental. Assim, a partir da realização destes ensaios, observou-se que o comportamento de reforço pós fissuração foi proporcionado pelo compósito e a dosagem crítica que adequa o ganho e a perda das propriedades mecânicas em estudo, estabelecido 2% para as fibras utilizadas.*

Abstract. The fiber reinforced concrete is generally used with the purpose of performing the plastic retraction control, to ensure the inhibition of cracking development and to enable toughness. In order to benefit the performance of the bulk of usual concrete, its application is applied in many structures of common use. Concerned about this importance, this survey goals to explain the mechanic performance of the composite, studying the fiber content as an independent parameter and influencer of the analyzed outcomes, with the intention to set the critic content of fiber and to get a better understanding of the properties in analysis. Based on this assumption, with a view to define the performance shown by the composite, experimental tests and computational simulation were done which grant the numerical and experimental assay. Thereby, from these assays, the post-cracking reinforcement behavior was observed and the critical dosage that balances the gain and loss of the mechanic properties in study, established in 2% for both specimen of fiber.

1. Introdução

O concreto usualmente empregado é caracterizado por não apresentar resistência residual e demonstrar comportamento frágil quando submetido a esforços de tração. Em virtude disso, as fissuras formadas impedem a propagação de tensões de tração que, por sua vez, concentram-se na extremidade da falha. No instante que o valor dessa tensão supera a crítica do material, ocorre sua ruptura (FIGUEIREDO,2011). Com o propósito de coibir o comportamento frágil do concreto quando submetido a tais esforços, a inserção de variados tipos de fibras é realizada em sua matriz. Desta maneira, após o surgimento de falhas no material, as fibras atuarão como ponte de transferência de tensão e proporcionarão pseudo-ductilidade ao compósito.

Baseado na capacidade de reforço que as fibras propiciam ao compósito, o módulo de elasticidade, o fator de forma e teor das fibras e a aderência fibra-matriz são critérios relevantes para caracterização do desempenho resistente do compósito. Desta forma, estes fatores são avaliados neste trabalho de modo a qualificar as variações do comportamento mecânico.

A constatação dos testes laboratoriais que caracterizam tais mudanças é realizada com o objetivo de descrever a curva da resistência média em função do teor de fibras para cada verificação experimental respectiva, tendo-se então, a dosagem de fibras como parâmetro independente e preponderante para o detalhamento das propriedades em estudo. Com isso, surge a hipótese de que dado o teor ideal, a partir deste estado em diante, para maiores dosagens, ocorre a diminuição da capacidade resistente e de reforço que as fibras proporcionam. Sendo tal suposição validada pela análise dos resultados apresentados a partir dos ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

À vista disso, a fim de conferir ao concreto convencional desempenhos desenvolvidos pelo CRF, este trabalho visa compreender a dosagem que proporciona a melhor performance quanto ao comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, sendo este explorado a partir dos ensaios destrutivos e modelagem computacional, onde se determinam as variações da capacidade portante do compósito.

2. Objetivo

Este estudo teve como objetivo analisar e comparar experimentalmente as propriedades mecânicas do concreto convencional e concreto com adição de fibras, a fim de estabelecer o teor crítico de fibras.

3. Justificativa

A principal função das fibras ocorre na fase pós-fissuração, na qual inibem a propagação das fissuras e proporcionam um aumento de resistência ao compósito por transferências de tensões. Outra função é a de fornecer tenacidade por meio de mecanismos de absorção de energia (BENTUR, MINDESS, 2007).

O volume crítico de fibras é aquele que proporciona resistência residual ao compósito cuja magnitude é igual à tensão de ruptura da matriz. Para volumes abaixo do crítico, a capacidade portante pós-fissuração diminui após a ruptura da matriz. Para volumes acima do crítico, o compósito pode aceitar níveis de carregamentos crescentes após a ruptura da matriz (FIGUEIREDO, 2000).

Para teores de fibra menores que um por cento, as fibras são utilizadas para reduzir fissuras por retração, podendo ser utilizadas em lajes e pavimentos. Para teores entre um e dois por cento, são utilizadas para prover benefício à resistência à ruptura e ao impacto, empregado em concreto projetado e estruturas que requerem capacidades de absorção energética e fadiga. Teores acima de dois por cento são empregados em compósitos que levem ao desempenho de strain-hardening. (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

4. Material e Métodos

4.1: Traço do Concreto

O traço utilizado fora definido pelo Método de Rothfuchs por pesquisa anterior a esta (Andressa Baena, 2016), sendo definido a partir das curvas granulométricas específicas de cada agregado, por meio dos ensaios de caracterização do material como massa específica (NBR NM 23 para cimento e NBR 9776 para agregados), módulo de finura (NBR 7211) e ensaio de peneiramento (NBR 7217).

O traço em questão tem como agregados a areia de quartzo, com dimensões de 0,425/0,300mm, 0,850mm e 1,4mm; areia média (de rio) e pedrisco. A sílica ativa (3 % da massa de cimento) utilizada como adição, aditivo plastificante na quantidade equivalente a

1% da massa de cimento e, consumo de 716,4 kg de cimento, no caso, de alta resistência inicial, para a produção de um metro cúbico de concreto.

4.2: Produção do concreto e modo de mistura das fibras

A produção do concreto é feita com ordem de mistura predeterminada com o objetivo de atingir em seu estado fresco, boa trabalhabilidade e consistência, requisitos essenciais para a mescla com as fibras, nas quais são incorporadas após o início de pega do cimento e todos os componentes já adicionados (Figura 1). A dispersão randômica delas é feita de maneira manual, até que sua distribuição regular seja garantida e uniformidade perceptível na matriz de concreto, respeitando tempos de pega.



Figura 1: Concreto em seu estado fresco.



Figura 2: Corpos de prova com variação nas dosagens de fibra de polipropileno.

Após a moldagem dos corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) de acordo com a NBR 5738:2015, os mesmos são colocados na câmara, adotando-se então, a cura tipo úmida (Figura 2), a fim de impedir a perda de água dos poros, a geração de tensões capilares e o surgimento de fissuras por retração. Outro procedimento realizado nos corpos de prova é retificação do topo, assegurando concentração uniforme das tensões na realização dos ensaios destrutivos das amostras.

4.3: Propriedades das fibras

Apresentam-se a seguir as propriedades de cada fibra utilizada neste trabalho sendo disponibilizadas pelo fornecedor, nas quais são consideradas para a análise do comportamento mecânico do compósito.

Tabela 1: Propriedades das fibras em uso na pesquisa.

Tipo de fibras	Diâmetro µm	Resistência à Tração / Mpa	Módulo de Elasticidade / Gpa	Absorção de água	Fator de forma
Polipropileno	689	600-650	9.5	Desprezível	74
Polietileno	800	550	8.5	zero	50

A partir das informações da Tabela 1, as propriedades a serem consideradas para a adequação das características físicas e químicas do concreto reforçado com fibras, são definidas por: módulo de elasticidade, energia de ligação com a matriz (aderência) e teor e fator de forma da fibra. As fibras utilizadas são do tipo macro já que no traço há a presença de agregados graúdos, dessa forma, evidencia-se a importância da análise de tais fatores a fim de garantir a interação efetiva fibra-matriz e a distribuição dos esforços.

4.4: Dosagens das fibras

Os teores de fibras utilizados são variados em relação ao volume do traço em 0,5%, 1,5%, 3% 4,5% e 6%. Desta maneira, com o propósito de analisar a alteração do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, considera-se neste trabalho a dosagem como fator principal para a caracterização dos desempenhos e variações. Diante de tais considerações, supõe-se que, para análise de cada ensaio, dada a melhor resistência média e respectiva dosagem, deste estado em diante, ocorrerão perda de capacidade resistente e reforço pós-fissuração. Sendo assim, a partir do estudo experimental do comportamento apresentado pelo compósito, tanto no estado fresco como no estado endurecido do concreto, é possível constatar o teor mais favorável para o conjunto de propriedades mecânicas, ou seja, a dosagem crítica.

4.5: Ensaios destrutivos dos corpos de prova

Submeteram-se corpos de prova cilíndricos (10x20) aos ensaios: compressão (Figura 3), (ABNT NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos); Tração por compressão e diametral (Figura 4), (NM-8/94 –Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral) (Figura 5), com o objetivo de verificar o desempenho para as variadas dosagens e a análise do comportamento de strain-hardening apresentado pelo concreto com adição de fibras; Módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão), realizado no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, para o Concreto Referência e teores de 1,5% e 4,5% da fibra de polietileno. Para isso, posicionaram-se três extensômetros nos corpos de prova a fim de medir as deformações no momento em que se procede o ensaio. Assim, determinam-se tais valores nos instantes das tensões em 0,5 MPa e em 30% da tensão de ruptura. A partir da descrição da norma, define-se o módulo de elasticidade amostral.

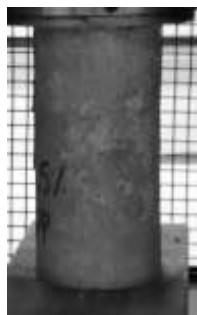


Figura 3: Ensaio de compressão. Figura 4: Ensaio de tração por compressão diametral. Figura 5: Ensaio de Módulo de Elasticidade.

Com a finalidade de se ter confiabilidade estatística dos dados experimentais, realizaram-se os ensaios com cinco corpos de prova para cada amostragem, sendo esta representada pelos variados teores em análise e concreto referência. Desta forma, é possível caracterizar a performance do compósito na realização dos testes através de uma função $\bar{R}(TF)$, sendo \bar{R} , a resistência média dada em MPa, e TF, o respectivo teor de fibras, em porcentagem. Em razão deste último alterar o comportamento do compósito, considera-o como parâmetro independente, ou seja, fator que ocasiona a melhoria ou não da capacidade portante do concreto reforçado com fibras.

4.6: Modelagem computacional

Com o intuito de caracterizar a distribuição dos esforços para o ensaio de flexão numa amostra prismática de concreto com o teor crítico de fibras estabelecido a partir dos ensaios laboratoriais (15x15x50 cm), (Figura 6) e correlacionar ao reforço estrutural proporcionado

pelas fibras, sendo tais aspectos verificados a partir da simulação de modelagem computacional com o software ANSYS.

A simulação foi realizada com o auxílio da ferramenta Transient Structural do software e as propriedades físicas e mecânicas da amostra são baseadas nos resultados obtidos provenientes dos ensaios destrutivos e densidade da mesma, detalhadas nas configurações.

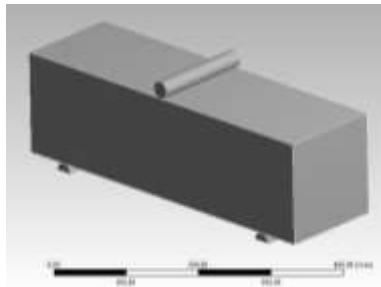


Figura 6: Vista isométrica do modelo prismático.

A partir da aplicação de uma força de 50 kN pelo cutelo superior, verifica-se a capacidade resistente apresentada pela amostra, fundamentando-se nos dados obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório, compara-os com a do concreto reforçado com fibras.

5. Resultados

5.1: Estado fresco do concreto

Com as variadas dosagens em análise, observaram-se as mudanças da trabalhabilidade e consistência da matriz através de percepção visual e táctil, ou seja, de maneira qualitativa, desde o início do processo de inserção das fibras, até o instante da moldagem dos corpos de prova. Desta maneira, constatou-se a redução de trabalhabilidade de modo mais significativo para os teores de 4,5% e 6% em relação aos dois tipos de fibras utilizadas e a necessidade de maior despendimento de energia para realizar a mescla de forma a propiciar distribuição uniforme na matriz.

Relacionando-se às aplicações reais, destaca-se a inviabilização destes teores, pelo motivo de maior dificuldade de mistura, já que compromete a trabalhabilidade da mesma e em tal contexto utiliza-se também armadura de aço.

5.2: Resultados dos ensaios destrutivos

Analisando-se tal variação para o ensaio de compressão dos corpos de prova, comparou-se em relação ao concreto referência o teor que apresenta melhor resistência, assim, foi possível aferir que para a fibra de polipropileno, o mesmo é definido por aproximadamente 1% (Gráfico 1) e para a fibra de polietileno, tal característica ocorre em 1,5% do teor de fibras (Gráfico 2), corroborando com a bibliografia em estudo. Tal resistência apresentada nestes teores quantifica-se de forma aproximada em 52 MPa, para os dois tipos de fibra.

Identificou-se também que, quanto maior a dosagem utilizada, a capacidade resistente do compósito é prejudicada, indicando que as fibras deixam de fornecer tenacidade e ganho deste aspecto, afetando de modo danoso tais propriedades. A perda de eficácia portante sucede-se em decorrência do volume de fibras ser maior do que o volume crítico a ser utilizado na mistura. Desta maneira, atribui-se a este fato a falta de argamassa e maior quantidade de ar incorporado nas amostras do compósito.

No mesmo ensaio, para os corpos de prova sem adição de fibras, verificou-se que os mesmos “explodiram” em várias partes (Figura 7), de modo que a base apresentou formato cônico,

resistindo tensões mais elevadas. Este fator é caracterizado pela baixa fragilidade da zona de transição da matriz e pela utilização da adição de sílica no traço do concreto, na qual diminui tal ineficiência. Porém, quando esta debilidade está presente nas amostras, a ruptura do corpo de prova ocorre com tensões menores que o necessário para romper os constituintes do mesmo.



Figura 7: Corpo de prova após o ensaio de compressão. Figura 8: Aderência das fibras na matriz.

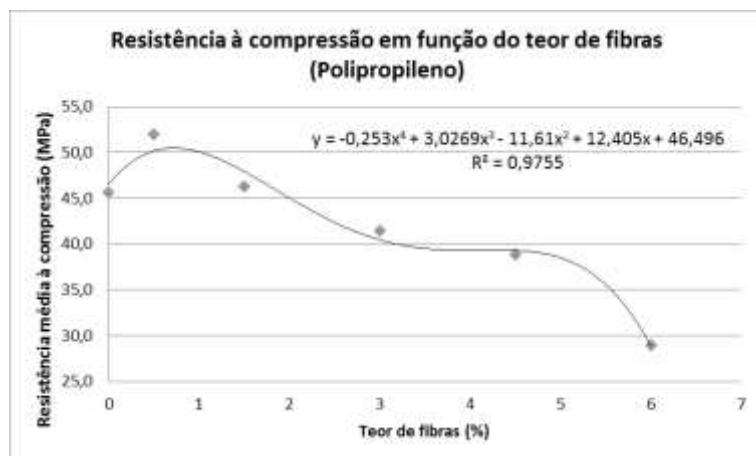


Gráfico 1: Resistência à compressão em função do teor de fibras (Polipropileno).

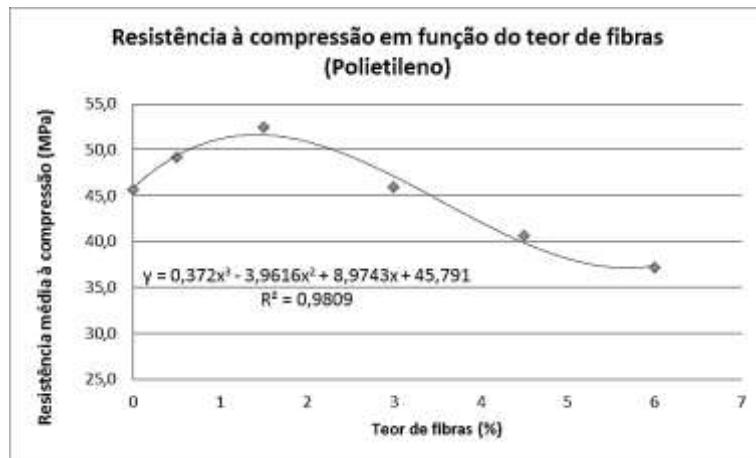


Gráfico 2: Resistência à compressão em função do teor de fibras (Polietileno).

Para o ensaio de tração por compressão diametral, diferentemente do ensaio de compressão, identificou-se que para as maiores resistências atingidas, o respectivo teor de fibras é maior. Deste modo, observa-se que para a fibra de polipropileno o teor é representado em 2,5% e tensão de aproximadamente 7,5 MPa (Gráfico 3). Já para as fibras de polietileno, este aspecto ocorre para o teor de 1,5% e 5,2 MPa (Gráfico 4).

Da mesma forma para o ensaio de compressão, verificou-se a perda de capacidade resistente com o aumento da dosagem de fibras, constatando a menor utilização destas porcentagens de fibra, já que a principal função desta é atuar à tração, efeito no qual o concreto possui maiores fragilidades.

Neste ensaio verificou-se que o fenômeno de strain-hardening ocorreu de forma preponderante na realização do mesmo. Tal fenômeno decorre a partir do ganho de resistência após a fissuração da matriz, até atingir a tensão máxima pós-fissuração. Sendo assim, esta propriedade beneficia a matriz de concreto, já que após fissurado o compósito continua absorvendo energia, o que é vantajoso para as estruturas de uso comum já que a ruptura do mesmo não acontecerá de forma abrupta, fornecendo maior segurança à mesma.

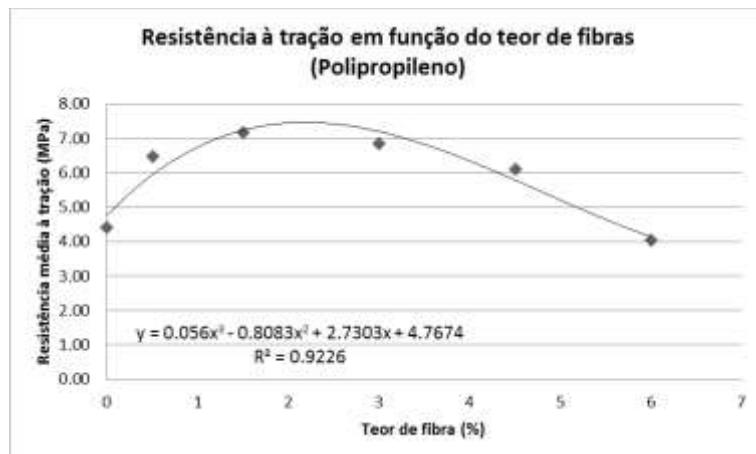


Gráfico 3: Resistência à tração em função do teor de fibras (Polipropileno).

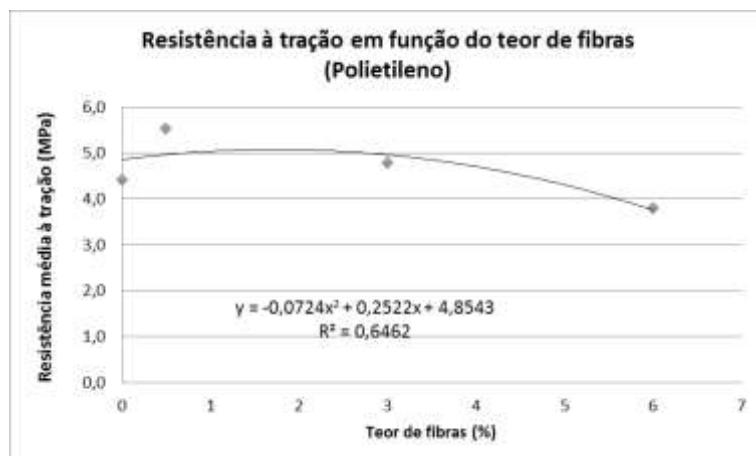


Gráfico 4: Resistência à tração em função do teor de fibras (Polietileno).

Após a realização do ensaio de tração por compressão diametral, verificou-se a partir da fissuras geradas a uniformidade da distribuição das fibras na matriz, e a transferência de tensões fibra-matriz. Para os corpos de prova do concreto referência, foi possível identificar a homogeneidade da mistura e seus componentes (Figura 9). Já para as amostras com adição de fibras verificou-se que os mesmos apenas se fissuram e não se dividem ao meio, evidenciando a eficácia da aderência das mesmas.



Figura 9: Corpo de prova sem adição de fibras após o ensaio de tração por compressão diametral.

A partir da verificação da máxima tensão do compósito sem que o mesmo sofra deformações permanentes, ou seja, módulo de elasticidade (Gráfico 5) através deste ensaio, foi possível analisar que para a fibra de polietileno, tal capacidade diminui conforme o aumento do teor utilizado. Logo, é possível afirmar que para teores maiores, a tensão máxima do Concreto reforçado com fibras, até que se atinja o regime plástico, é reduzido. Observa-se também que para o concreto sem adição de fibras tal propriedade é caracterizada pelo melhor desempenho, quantificada em 37 GPa.

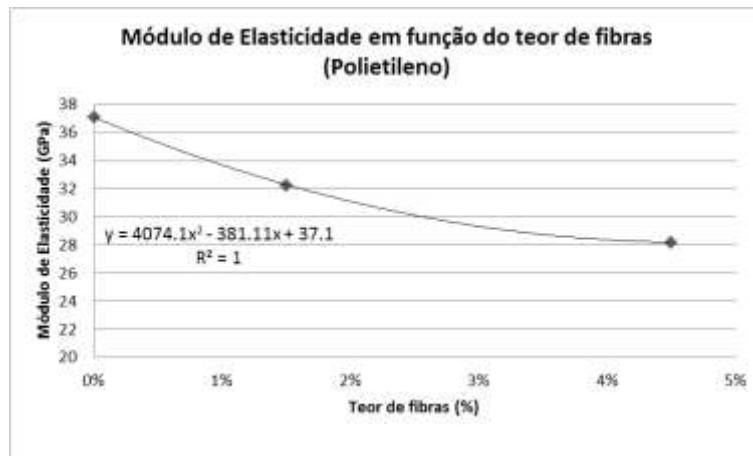


Gráfico 5: Módulo de elasticidade em função do teor de fibras (Polietileno).

5.3: Análise do volume crítico de fibras

Proveniente dos ensaios realizados em amostras do concreto reforçado com fibras, a análise do volume crítico de fibras evidencia-se de modo relevante, uma vez que este parâmetro altera as propriedades mecânicas do mesmo. Assim, avaliou-se o teor crítico, caracterizado pelo reforço estrutural, no qual favorece a capacidade resistente e pós-fissuração.

Tal parâmetro foi determinado em teores no intervalo de 1,5% a 2,5%, quando submetidos a esforços de tração, já que o melhor desempenho ocorre nestas condições. Logo, sabendo-se da fragilidade do concreto quanto a este fenômeno, verifica-se a necessidade da utilização de dosagens por volta desta. Porém, a partir do comportamento mecânico apresentado, observa-se que a mesma não ocorre para o melhor estado quanto ao ensaio de compressão e módulo de elasticidade para a fibra de polietileno. Desta forma, notou-se a necessidade de compatibilização em relação às características apresentadas. Assim, o teor crítico identificado que melhor beneficia o compósito, de modo a adequar acréscimo e perda das propriedades mecânicas, é estabelecido em 2%, sendo que a partir deste estudo, padroniza-o para os dois tipos de fibras.

5.5: Modelagem computacional

Através da simulação de modelagem computacional foi possível avaliar a distribuição de tensões normais ao longo do eixo longitudinal do corpo de prova. Analisando-se tal distribuição (Figura 10), verificou-se a ocorrência de tensões de tração quantificadas em aproximadamente 4,7 MPa, de forma mais intensa na parte inferior da amostra, como esperado. Nos ensaios destrutivos, para os corpos de prova submetidos à tração, as resistências médias para o teor crítico é maior do que a obtida pela simulação, logo, quando submetidos a estes esforços, o CRF em estudo confere ao compósito capacidade portante e resistente pós fissuração. A partir do instante que se aproximam e ultrapassam as resistências limites do compósito, há formação de fissuras e rompimento da amostra. Assim, com a adição de fibras ao compósito, a fissuração será coibida. Já os esforços solicitantes continuarão se distribuindo a partir da ponte de transferência de tensões proporcionada pelas fibras, fazendo com que os mesmos não se concentrem na fissura. Dessa forma, sua ruptura não ocorre de forma abrupta, apresentando certa ductilidade até seu estado limite.

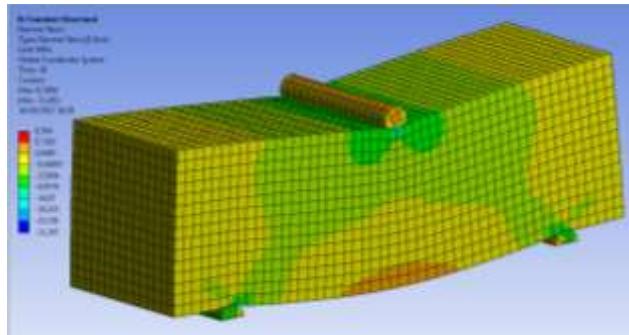


Figura 10: Distribuição das tensões normais do corpo de prova prismático.

6. Conclusão

Fundamentado nas dosagens em estudo, concluiu-se que a partir dos ensaios destrutivos dos corpos de prova, a hipótese de que para elevados teores (4,5% e 6%) há perda de capacidade resistente e reforço pós-fissuração dos compósitos fora validada. No estado fresco do concreto sua trabalhabilidade e consistência são prejudicadas, o que inviabiliza a utilização prática dos mesmos.

A partir da análise experimental, verificou-se que ao contrário das amostras sem adição de fibras, os corpos de prova que as continham não apresentaram ruptura abrupta, e sim, de forma gradativa, ou seja, primeiro houve o surgimento de fissuras na matriz, depois, o rompimento da mesma e, por fim o reforço resistente pós fissuração, tal característica é classificada por Strain-hardening, evidenciando certa ductilidade fornecida ao mesmo. Notou-se também, a equivalência de capacidade portante para os dois tipos de fibras quando comparadas ao mesmo tipo de ensaio, pois as maiores resistências atingidas foram aproximadas, porém diferindo-se nos respectivos teores.

O teor crítico de fibras foi definido a partir da análise do comportamento mecânico apresentado nos gráficos, estabelecido no teor de 2%, sendo determinado após a análise das maiores resistências médias para os respectivos teores de cada ensaio. Portanto, a dosagem crítica estabelecida é aquela que proporciona o ganho de capacidade resistente do compósito aos esforços de tração e perda mínima quanto ao módulo de elasticidade e esforços de compressão.

Na simulação de modelagem computacional verificaram-se tensões de tração na parte inferior da amostra, região crítica para formação de fissuras, onde a capacidade de reforço será proporcionada pelas fibras quando inseridas na matriz de concreto.

7.Referências Bibliográficas

A. BENTUR, S. MINDESS. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Second Edition. 2007.

CT 303 – Comitê Técnico Uso de Materiais Não-Convencionais para Estruturas de Concreto. Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras –1^aEdição. 2016

CALLISTER WILLIAM D. Materials Science and Engineering: an Introduction. 8th Edition. Chapter 16: Composites,p.645.2012.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto reforçado com fibras. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.2011

J.C. GÁLVEZ. On the prediction of the orientation fator and fibre distribution of steel and macro-synthetic for fibre-reinforced concrete. Science Direct.2015.

MEHTA P., MONTEIRO J.M. PAULO. Concrete. Microstructure, properties and materials.Third edition. Chapter 12: Progress in concrete technology. 2006.

SALVADOR, RENAN PÍCOLO. Análise comparativa de métodos de ensaio para a caracterização do comportamento de concreto reforçado com fibras. Tese de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.2012.

SHASHA WANG. Effect of high strain on compressive behavior of strain-hardening cement composite in comparison to that of ordinary fiber-reinforced concrete. Science Direct.2016.