

Jocimar Cesar Gava

**Comparação a resistência mecânica do
concreto desenvolvido a partir da incorporação de
diferentes teores de fibra de polipropileno.**

São Carlos

2021

Jocimar Cesar Gava

Comparação a resistência mecânica do concreto desenvolvido a partir da incorporação de diferentes teores de fibra de polipropileno.

Trabalho de conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Civil do Centro Universitário Central Paulista, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Victor Baldan

São Carlos

2021

Ao meu filho Filippo
(Quem sabe um futuro engenheiro)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me iluminado e me dado forças para vencer os momentos difíceis e por ter me dado graças em todos os momentos.

De forma especial, agradeço a Mariana R. L. Braga, minha esposa e amor da minha vida, por ter me apoiado e me aturado nos momentos mais difíceis, e também pelas alegrias e momentos felizes que passamos juntos, e de me proporcionar a coisa mais importante da minha vida, que é ser pai do nosso pequeno Filippo.

Agradeço também aos meus pais, Valdomiro Gava e Maria Sirlei Granato Gava, por terem me apoiado e me amparado nestes longos anos de faculdade, pois sem a força e os conselhos deles certamente não conseguiria fazer metade do que fiz. E também a meu irmão, Julio Cesar Gava, por servir de espelho e inspiração para mim durante a minha vida.

Agradeço meu professor orientador Victor Baldan, por ter me auxiliado, orientado e dado as direções certas deste trabalho, pois sem ele certamente este projeto não teria sido finalizado.

Agradeço infinitamente a todos os professores que ajudaram na minha formação, pois com o ensinamento e a participação efetiva nos estudos contribuíram na minha graduação. Por fim, agradeço também a todos os colegas de sala de aula, desejando-lhes sucesso e que tenham uma carreira brilhante.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fibra polimérica, denominada como FIBRA 02.....	12
Figura 2: Fibra polimérica posicionada na máquina de ensaio, antes do ensaio de tração.....	20
Figura 3: Betoneira CSM 250 litros.....	23
Figura 4: Concreto misturado, pronto para a moldagem.....	24
Figura 5: Slump test do concreto reforçado com fibras.....	25
Figura 6: Esquema de configuração do ensaio de duplo puncionamento.....	28
Figura 7: Corpo de prova 2/5F posicionado na prensa, para determinação das resistências à fissuração e residuais à tração.....	29
Figura 8: Diagrama de carga versus deslocamento vertical, identificando os pontos de carga para obtenção dos parâmetros.....	31
Figura 9: Esquema de realização do ensaio de flexão três pontos para medição do deslocamento de abertura de fissura.....	33
Figura 10: Corpo de prova 01-55 CP09 posicionado na prensa, para medição do deslocamento de abertura de fissura.....	33
Figura 11: Diagrama típico de cargas versus CMOD, identificando as cargas residuais.....	35
Figura 12: Curvas de força vs deslocamento do travessão para as dez fibras ensaiadas.....	41
Figura 13: Curvas de tensão vs deformação para as dez fibras ensaiadas.....	41
Figura 14: Fibra polimérica rompida, após ensaio de tração.....	42
Figura 15: Gráfico das resistências à compressão para a 1ª Chamada.....	44
Figura 16: Diagrama de carga versus deslocamento vertical para os corpos de prova cilíndricos.....	49
Figura 17: Corpo de prova 01-25-04 após o ensaio de duplo puncionamento.....	50
Figura 18: Gráfico da carga versus C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 7 dias.....	58

Figura 19: Gráfico da tensão <i>versus</i> C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 7 dias.....	59
Figura 20: Gráfico da carga <i>versus</i> C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 28 dias.....	59
Figura 21: Gráfico da tensão <i>versus</i> C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 28 dias.....	60
Figura 22: Corpo de prova 2/9B, após a realização do ensaio.....	60

RESUMO

Comparação a resistência mecânica do concreto desenvolvido a partir da incorporação de diferentes teores de fibra de polipropileno.

O foco do estudo foi o comportamento do concreto com a adição de fibras poliméricas, e busca aprimorar os conhecimentos de uso de materiais na construção civil. Suas Vantagens em relação ao concreto convencional, que dentre as principais está o aumento na resistência mecânica de tração e no controle de uma das maiores patologias desse material a fissuração. A importância do estudo da fibra de polipropileno com experimentos em laboratório permite observar o comportamento do material dentro do concreto convencional. É feito um estudo da influência da fibra com vários teores de fibra (2,5 kg/m³; 3,5 kg/m³; 4,5 kg/m³ e 5,5 kg/m³, apresentando a moldagem, confecção e verificação dos resultados, comparando os mesmos entre si. No total foram 4 traços para o plano experimental. o concreto utilizado para a fabricação dos corpos de prova tem uma resistência a compressão de 30MPa, totalizando 40 corpos de prova prismático e 16 corpos de prova cilíndrico (10X20 CM) e 24 corpos de prova cilíndrico (15 x 15 cm). Os resultados foram obtidos através de realização dos seguintes ensaios: Slump Test, tração na flexão, duplo punsionamento e compressão apresentados em forma de gráficos e planilha para uma melhor visualização. Com os quais observa-se que a fibra reduz a trabalhabilidade do concreto sendo necessário a adição de aditivos plastificantes.

Palavras-chave: Macrofibras poliméricas, Resistência Mecânica, Tração na Flexão

1. INTRODUÇÃO

Concreto, material estrutural amplamente utilizado em todo o mundo, tem sido assunto de pesquisas contínuas no ramo da construção. Embora esse compósito apresente diversas vantagens, como a alta resistência mecânica, a rapidez na execução, a fácil moldabilidade e o custo relativamente baixo, também apresenta determinadas limitações, como a baixa capacidade de deformação e a rápida propagação de fissuras quando submetido a esforços de tração (BARRAGÁN, 2002; FIGUEIREDO 2011a).

Com o intuito de minimizar tais limitações, o emprego de fibras para reforço de misturas cimentícias apresentou grande progresso nas últimas décadas. Diferentemente da armadura convencional, que é localizada e necessita prévia montagem, as fibras são misturadas diretamente ao concreto e distribuídas aleatoriamente, reduzindo tempo, mão-de-obra e custo de certas aplicações em relação ao processo tradicional (FIGUEIREDO,2011a).

A incorporação de fibras em misturas cimentícias promove uma melhora significativa em diversas propriedades mecânicas da matriz, com destaque para a tenacidade à flexão, a resistência à fadiga e ao impacto. Proporcionam um grande aumento na capacidade de absorção de energia e transferem tensões através das fissuras, reduzindo sua propagação e expansão (NATARAJA; DHANG; GUPTA, 2020; NUNES, 2006). Além disso, concreto reforçado com fibras apresenta maior ductilidade em relação às matrizes não reforçadas, que se tornam deficientes após a formação da primeira fissura. (FIGUEIREDO, 2011a; KIM; NAAMAN; EL TAWIL, 2008; LIM; OH, 1999).

As fibras podem ser classificadas como microfibras (diâmetro menor que 0,3mm) e macrofibras (diâmetro maior que 0,3mm). Enquanto a

primeira é utilizada principalmente para o controle de fissuração e combate ao incêndio, a segunda é utilizada, além do controle de fissuração, para o desempenho estrutural, funcionando como um reforço ao concreto ao concreto ao passo que podem fornecer aumento na resistência do material, na absorção de energia e na ductilidade pós-fissuração e, em alguns casos, simplificação dos processos construtivos (substituição ou diminuição de armaduras pelas fibras (BURATTI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011; LOPES, 2005).

As fibras utilizadas na matriz cimentícia podem ser de diferentes tipos de materiais, formas e tamanhos. Contudo, um dos principais aspectos e desvantagens referente a adição das fibras na dosagem do concreto é a perda de trabalhabilidade da mistura, podendo ser reparada com a utilização de aditivos que ajudam a deixar a mistura mais fluida.

1.1 Justificativa

Buscar novos conhecimentos na utilização de materiais na construção civil é de grande relevância, estudos e ensaios devem ser realizados com intuito de buscar novos resultados, alcançando objetivos até então desconhecidos com simples adição de um compósito.

A quantidade de fibras a ser inseridas, vai atingir em todos os aspectos do concreto. Fibras em excesso por exemplo gera diminuição da trabalhabilidade. Deve-se buscar utilizar o material de forma correta alcançando as principais contribuições que a mesma traz a matriz como: aumento da rigidez, ductilidade deixando de ter um comportamento frágil, resistência a tração, impacto e fadiga, dentre outras.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo principal incorporar fibras poliméricas na matriz cimentícia com diversos teores e através de ensaio em laboratório compará-los entre-si.

A partir do objetivo principal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar as propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade (ou módulo de Young) para a fibra. Para verificar tais propriedades realizou-se o ensaio de tração na fibra polimérica, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 16942:2021.

- Verificar o desempenho mecânico de concreto reforçado com fibras (CRF), utilizando a fibra, realizou-se os ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 5739, de tração por duplo puncionamento em corpos de prova cilíndricos, de acordo com a norma ABNT NBR 16939, determinando as resistências à fissuração e residuais e, de tração na flexão em corpos de provas prismáticos com dimensões nominais de 15 x 15 x 55 cm, conforme a norma ABNT NBR 16940, determinando à resistência a tração na flexão (LOP) e as resistências residuais nos elementos com concreto reforçado com fibras (CRFs).

2. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

2.1 – IDENTIFICAÇÃO DA FIBRA

Foi fornecido pelo cliente um único tipo de fibra polimérica a qual foi identificada de acordo com a Tabela 1. Na Figura 1 é possível visualizar uma imagem desta fibra, como recebida.



Figura 1: Fibra polimérica, denominada como FIBRA 02

A Tabela 1 exibe a identificação, a espessura (t), a largura (w), o comprimento (L) e o comprimento inicial da fibra (L_0), antes do ensaio, para as dez (10) fibras ensaiadas. O comprimento inicial do corpo de prova, no caso a fibra, foi medido utilizando-se um paquímetro com resolução de 0,01 mm.

Tabela 1 – Identificação e dimensional para as fibras ensaiadas em tração

Identificação da Comptest	Espessura,	Largura,	Comprimento,	Comprimento
	t (mm)	w (mm)	L (mm)	inicial, L ₀ (mm)
Serve 02-01	0,167	0,383	51,00	19,00
Serve 02-02	0,193	0,298	51,10	18,90
Serve 02-03	0,180	0,300	51,60	19,10
Serve 02-04	0,186	0,265	51,00	19,80
Serve 02-05	0,190	0,307	51,60	19,60
Serve 02-06	0,203	0,299	51,20	19,90
Serve 02-07	0,188	0,239	51,30	19,20
Serve 02-08	0,193	0,257	51,10	19,70
Serve 02-09	0,176	0,272	51,10	19,30
Serve 02-10	0,186	0,277	51,40	19,50

2.1 – IDENTIFICAÇÃO DOS CPS

Foram moldados dezesseis (16) corpos de provas cilíndricos (\varnothing 10 x 20 cm, para ensaio de compressão), vinte e quatro (24) corpos de prova cilíndricos (\varnothing 15 x 15 cm, para ensaio de duplo puncionamento) e, quarenta (40) corpos de prova prismáticos (com dimensões nominais de 15 x 15 x 55 cm (LxAxC), para ensaio de tração na flexão), os quais foram identificados de acordo com as Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente. Vale salientar que a moldagem de todos os corpos de prova deste trabalho foi realizada nos dias 31/08/2021 e 01/09/2021 no local da obra.

Tabela 2 - Identificação dos corpos de prova cilíndricos para ensaio de compressão

Identificação	Data da moldagem
01-25A	
01-25B	
01-25C	04/10/21
01-25D	
01-35A	
01-35B	
01-35C	06/10/21
01-35D	
01-45A	
01-45B	
01-45C	08/10/2021
01-45D	
01-55A	
01-55B	
01-55C	11/10/2021
01-55D	

Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova cilíndricos para ensaio de duplo puncionamento

Identificação da COMPTEST	Data da moldagem
01-25-01	04/10/2021
01-25-02	04/10/2021
01-25-03	04/10/2021
01-25-04	04/10/2021
01-25-05	04/10/2021
01-25-06	04/10/2021
01-35-01	06/10/2021
01-35-02	06/10/2021
01-35-03	06/10/2021
01-35-04	06/10/2021
01-35-05	06/10/2021
01-35-06	06/10/2021
01-45-01	08/10/2021
01-45-02	08/10/2021
01-45-03	08/10/2021
01-45-04	08/10/2021
01-45-05	08/10/2021
01-45-06	08/10/2021
01-55-01	11/10/2021
01-55-02	11/10/2021

01-55-03	11/10/2021
01-55-04	11/10/2021
01-55-05	11/10/2021
01-55-06	11/10/2021

Tabela 4 - Identificação dos corpos de prova prismáticos (CRFs) para ensaio de tração na flexão

Identificação da COMPTEST	Data da moldagem
01-25-01	04/10/2021
01-25-02	04/10/2021
01-25-03	04/10/2021
01-25-04	04/10/2021
01-25-05	04/10/2021
01-25-06	04/10/2021
01-25-07	04/10/2021
01-25-08	04/10/2021
01-25-09	04/10/2021
01-25-10	04/10/2021
01-35-01	06/10/2021
01-35-02	06/10/2021
01-35-03	06/10/2021
01-35-04	06/10/2021

01-35-05	06/10/2021
01-35-06	06/10/2021
01-35-07	06/10/2021
01-35-08	06/10/2021
01-35-09	06/10/2021
01-35-10	06/10/2021
<hr/>	
01-45-01	08/10/2021
01-45-02	08/10/2021
01-45-03	08/10/2021
01-45-04	08/10/2021
01-45-05	08/10/2021
01-45-06	08/10/2021
01-45-07	08/10/2021
01-45-08	08/10/2021
01-45-09	08/10/2021
01-45-10	08/10/2021
<hr/>	
01-55-01	11/10/2021
01-55-02	11/10/2021
01-55-03	11/10/2021
01-55-04	11/10/2021
01-55-05	11/10/2021
01-55-06	11/10/2021
01-55-07	11/10/2021
01-55-08	11/10/2021

01-55-09	11/10/2021
01-55-10	11/10/2021

3. METODOLOGIA

3.1 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DA FIBRA

A resistência à tração (R_m) corresponde à máxima carga de ruptura ($P_{m\acute{a}x}$) obtida no ensaio estabelecido pela norma ABNT NBR 13385, dividida pela área da seção transversal da fibra (A), sendo calculada pela equação 1.

$$R_m = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \text{ (Eq. 1)}$$

Vale salientar que a área da seção transversal da fibra (A) é calculada em função do diâmetro equivalente (d_e) sendo calculada conforme equação 2.

$$A = \frac{\pi \cdot (d_e)^2}{4} \text{ (Eq. 2)}$$

Sendo:

- A é a área da seção transversal da fibra, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

- d_e é o diâmetro equivalente da fibra, expresso em milímetros (mm).

Uma vez que a fibra ensaiada possui seção transversal retangular, o diâmetro equivalente (d_e) é calculado de acordo com a equação 3.

$$d_e = \sqrt{\frac{4 \cdot w \cdot t}{\pi}} \quad (Eq. 3)$$

Onde:

- d_e é o diâmetro equivalente da fibra, expresso em milímetros (mm);
- w é a largura da fibra, expresso em milímetros (mm);
- t é a espessura da fibra, expressa em milímetros (mm).

Por fim, calculou-se o fator de forma, de acordo a equação 4. Vale salientar que esse parâmetro é relação entre o comprimento (L) e o diâmetro equivalente (d_e) da fibra.

$$\lambda = \frac{L}{d_e} \quad (Eq. 4)$$

Em que:

- λ é o fato de forma da fibra (adimensional);
- L é o comprimento individual da fibra, expresso em milímetros (mm);
- d_e é o diâmetro equivalente da fibra, expresso em milímetros (mm).

As medidas da largura (w), espessura (t) foram realizadas utilizando um micrômetro com resolução de 0,001 mm, conforme estabelece a norma ABNT NBR 16942 [1]. Já o comprimento (L) foi medido com paquímetro com resolução de 0,01 mm.

Os ensaios de tração foram realizados em dez (10) fibras poliméricas, coletadas aleatoriamente, na condição de como recebidas pelo cliente, no dia 01/10/2021. Vale salientar que durante os ensaios a temperatura da sala foi mantida em 21° C com umidade relativa de 55,8%, conforme recomenda a norma ABNT NBR 13385 [2]. A velocidade para a realização dos ensaios foi de 10 mm/min.

Na Figura 2 é possível observar uma das fibras posicionadas na máquina de universal de ensaios, antes do ensaio de tração.

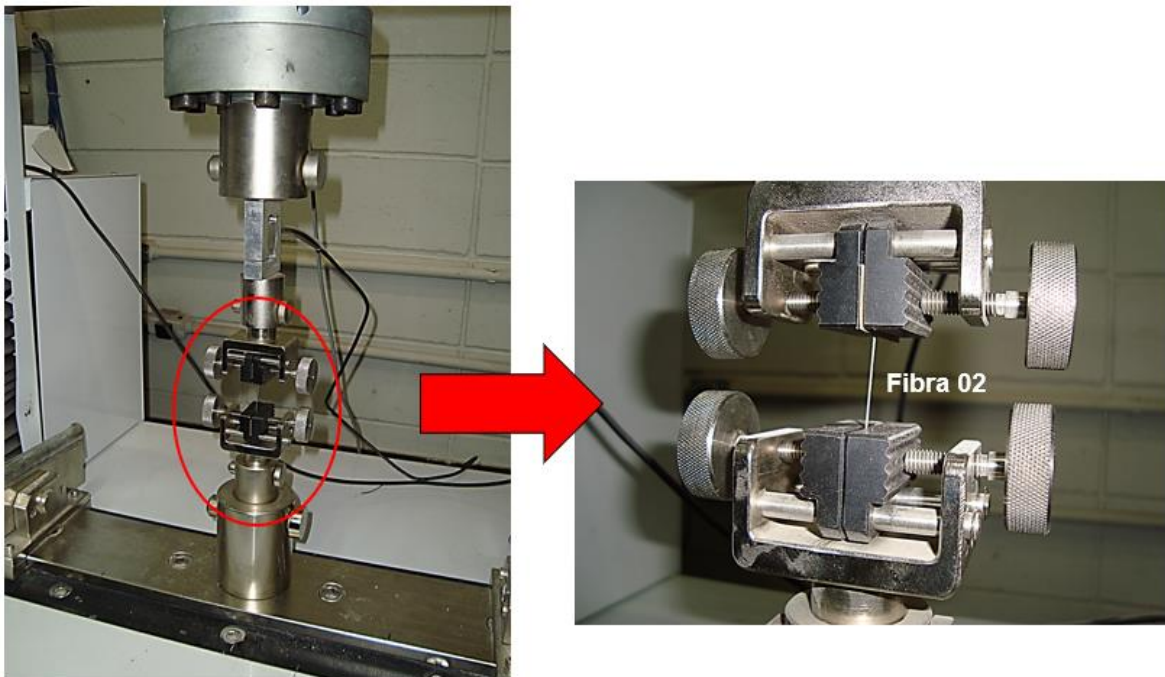


Figura 2: Fibra polimérica posicionada na máquina de ensaio, antes do ensaio de tração

3.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE OU MÓDULO DE YOUNG

Para a determinação do módulo de elasticidade (E) da fibra polimérica recebida pelo cliente, é necessário converter previamente a curva carga por alongamento do ensaio, previsto na ABNT NBR 13385 [2] em uma curva tensão (σ) por deformação específica (ϵ).

Após a etapa da plotagem do gráfico, para a determinação do módulo de elasticidade, traçou-se uma linha reta secante, na região linear da curva, que corresponde às tensões correspondentes a 10 % e 30 % da tensão máxima e suas deformações respectivas. O módulo de elasticidade é obtido a partir da razão entre a variação da tensão e a variação da deformação nesse intervalo.

3.3 ENSAIO DE ABATIMENTO (SLUMP TEST)

A consistência do concreto está relacionada com suas próprias características, com a mobilidade da massa e a coesão entre seus componentes. Modificando a proporção de água adicionada ou empregando aditivos, sua plasticidade é alterada, variando a deformação do concreto perante esforços.

A consistência é um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade do concreto, sendo que esta última depende também de características da obra e dos métodos adotados para o transporte, lançamento e adensamento do concreto. A trabalhabilidade é uma propriedade do concreto recém-misturado que determina a facilidade e a homogeneidade com a qual o material pode ser utilizado.

O ensaio do abatimento do concreto, também conhecido como Slump Test, é realizado para verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado plástico, no início da descarga do caminhão betoneira, buscando medir sua

consistência e avaliar se está conforme com os valores apresentados no pedido ou nota fiscal.

A medida máxima e mínima do abatimento foi definida pelo cliente, em função das propriedades desejadas de trabalhabilidade, sendo desejado, para a realização da concretagem do piso industrial, o valor entre 10 e 14 cm (Slump = 12 ± 2 cm ou Slump = 120 ± 20 mm). Vale destacar que o teste foi conduzido de acordo com a norma ABNT NBR 16889.

3.3.1 PREPARO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVAS

O preparo do CRF foi realizado com base nas recomendações preconizadas no “Anexo B da ABNT NBR 16942:2021 [2] e o ensaio para determinação da resistência a compressão de acordo com a ABNT NBR 5739:2018 [3]. Para determinação das resistências à tração na flexão (LOP) e as resistências residuais (Fr) foi utilizada a NBR 16490.

3.3.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Para composição do concreto foi utilizado cimento CP V ARI e teor de argamassa do ajustado em 53% e a resistência a tração na flexão (LOP) de $4,3 \pm 0,3$ MPa, conforme a recomendação do Anexo B da NBR 16942:2021 para o concreto de referência. Como agregado graúdo foi utilizado brita 1 e agregado miúdo areia grossa. Após estudos e pesquisas na literatura, o traço em massa final para compor o CRF foi de 1:1,87:2,55 (cimento, areia, brita1) e a relação água cimento adotado foi de 0,5 kg/kg, sendo que para esta dosagem o consumo

de cimento foi 403,62 kg/m³. As quantidades dos materiais utilizados no preparo do concreto estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 5 - Quantidade de materiais utilizados no preparo do concreto

Tipo	Quantidade	Consumo por m ³
Cimento CP V ARI	40,00 kg	403,62 kg
Areia Grossa	74,80 kg	754,77 kg
Brita 1	102,00 kg	1029,23 kg
Agua	20,00 kg	201,81 kg
Fibras	0,24971 kg	2,5 kg
Fibras	0,3,492 kg	3,5 kg
Fibras	0,44967 kg	4,5 kg
Fibras	0,54983 kg	5,5 kg

3.3.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

O concreto foi preparado em betoneira de eixo inclinado com capacidade nominal de 250 litros. O modo de preparo foi de acordo com as recomendações do Anexo B da NBR 16942. Na figura 3 betoneira utilizada no preparo.



Figura 3: Betoneira CSM 250 litros.



Figura 4: Concreto misturado, pronto para a moldagem.

Após a mistura, foi conferido se o abatimento estava em $120\pm 20\text{mm}$ (figura 4) e em seguida foram realizados as moldagens dos corpos de provas cilíndricos e prismáticos.



Figura 5: Slump test do concreto reforçado com fibras.

Os corpos de provas foram mantidos nas formas e posteriormente desmoldados, identificados e mantidos em cura úmida até a data do ensaio conforme as recomendações da NBR 5738.

3.4 CURA

De acordo com a norma ABNT NBR 5738, após a moldagem, os corpos de provas ficaram armazenados em superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que possa perturbar o concreto. Vale salientar que durante as primeiras 26 h todos os corpos de prova cilíndricos

ficaram armazenados em local protegido de intempéries, com a finalidade de minimizar a perda de água do concreto.

Antes de serem devidamente armazenados, todos os corpos de prova foram desmoldados, após o período de cura inicial e, identificados, a fim de manter sua rastreabilidade. Imediatamente após sua identificação, todos os corpos de prova (cilíndricos Ø 10 x 20 cm e Ø 15 x 15 cm e, os prismáticos 15 x 15 x 55 cm) foram curados submersos, até o momento do ensaio, em solução saturada de hidróxido de cálcio (cal hidratada), a uma temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ \text{C}$. Vale destacar que os corpos de provas não ficaram empilhados.

Por fim, todos esses corpos de prova mencionados foram retirados do local de cura nos respectivos dias dos ensaios e conservados ao ar até o momento do ensaio.

3.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

O controle de qualidade do concreto requer a realização de uma série de ensaios para comprovar que o material entregue na obra está de acordo com parâmetros de aceitação/projeto. Dentre eles, podemos citar os testes de abatimento, espalhamento e os ensaios de resistência do concreto, este último imprescindível para garantir a resistência à compressão e, por consequência, a qualidade da estrutura.

O ensaio de resistência à compressão é capaz de indicar eventuais variações da qualidade de um concreto, seja com relação à dosagem, seja quanto a seus insumos e, é uma propriedade do concreto diretamente ligada à segurança e à estabilidade estrutural. Desde o momento em que o concreto é

preparado na concreteira até a aplicação na obra, há uma série de fatores que podem colocar em risco sua resistência e desempenho. Entre eles, é possível destacar o atraso no caminhão-betoneira, que ultrapassa os limites previstos em norma, as mudanças climáticas e/ou até mesmo a adição excessiva de água na mistura em uma tentativa de assegurar maior trabalhabilidade.

Desta forma, a realização de testes laboratoriais para confirmar se a resistência do concreto fornecido é a mesma prevista em projeto é de suma importância. Tal controle de qualidade é fundamental para garantir a vida-útil da estrutura, bem como a segurança dos funcionários da obra e de todas as outras pessoas, proprietárias ou não, que irão usufruir do empreendimento no futuro.

Para determinar a resistência do concreto (F_{ck}), realizou-se ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos, $\varnothing 10 \times 20$ cm, em concreto simples, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 5739. Nesse teste, os corpos de prova foram submetidos a um carregamento axial que aumentou progressivamente a carga aplicada, sem choques, até a ruptura da amostra, utilizando uma velocidade de $0,75 \pm 0,15$ MPa/s.

Vale ressaltar também que após as desmoldagens, os corpos de prova foram identificados e armazenados conforme norma ABNT NBR 5738 [5]. Após o período de cura, as bases dos corpos de prova foram preparadas em retífica, a fim de garantir a planicidade e a perpendicularidade com o eixo longitudinal do corpo de prova. Desta forma, as superfícies ficaram lisas e livres de ondulações e abaulamentos. Por fim, após o preparo das bases, realizou-se, para cada corpo de prova, as medidas do diâmetro e altura com o uso de um paquímetro.

3.6 DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À FISSURAÇÃO E RESIDUAIS À TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇIONAMENTO

O ensaio de duplo puncionamento foi idealizado por Chen (1970) para medir indiretamente a resistência à tração do concreto convencional. A partir dessa ideia, foi proposto por Saludes (2006) o ensaio de duplo puncionamento. Posteriormente as primeiras pesquisas, no ano de 2010, o ensaio foi normalizado na Espanha pela AENOR UNE 83515 (2010). Atualmente, esse ensaio é normalizado pela ABNT NBR 16939, sendo publicada em 18/02/2021 com o seguinte título: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento - Método de ensaio.

O ensaio realiza um duplo puncionamento com dois discos de carga, centralizados no topo e no fundo do corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 6 (a).

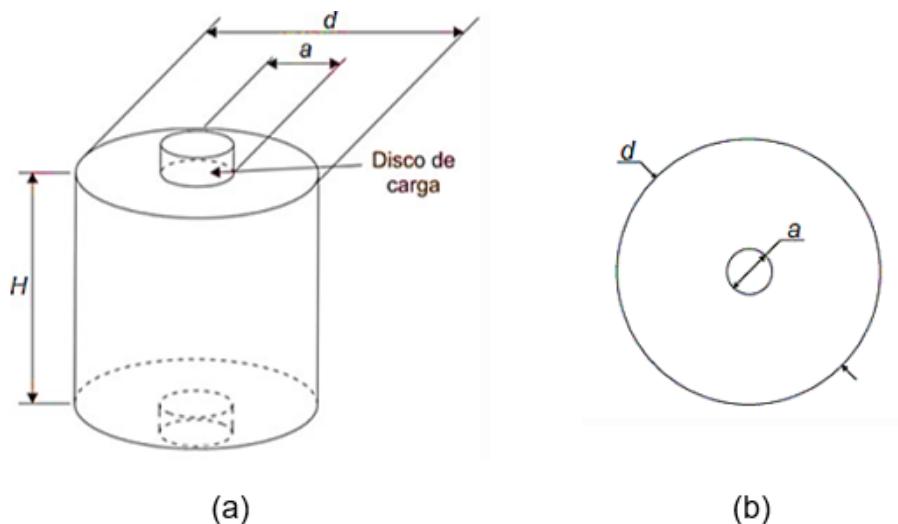


Figura 6: Esquema de configuração do ensaio de duplo puncionamento

Fonte: ABNT NBR 16939

Utilizou-se dois discos de carga, conforme preconiza a norma do ensaio, sendo os diâmetros iguais a 1/4 do diâmetro e as alturas iguais a 1/5 da altura dos corpos de prova, os quais foram posicionados centralizados nos pratos da máquina de ensaio, conforme pode ser observado na Figura 6 (b). Na Figura 7 é possível observar um dos corpos de prova cilíndricos (\varnothing 15 x 15 cm) posicionado na máquina de ensaio antes da realização do teste.



Figura 7: Corpo de prova 2/5F posicionado na prensa, para determinação das resistências à fissuração e residuais à tração

Sobre os planos concorrentes no eixo do cilindro são induzidas tensões de tração através da força aplicada. Dessa forma, o padrão de fraturas do corpo de prova ocorre paralelamente a estes planos. O carregamento foi realizado com velocidade de deslocamento vertical de 0,50 mm/min, sendo finalizado quando o deslocamento vertical medido atingiu 4 mm após a carga de fissuração (Pf).

Para a determinação da resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração), (f_t) utilizou-se a seguinte equação:

$$f_t = \frac{4 \times P_f}{9 \times \pi \times a \times H}$$

Em que:

f_t - é a resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração), expressa em megapascals (MPa);

P_f - é a carga que produz a fissuração, expressa em newtons (N);

a - é o diâmetro do disco de aplicação da carga, expresso em milímetros (mm);

H - é a altura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Já para o cálculo das resistências residuais ($f_{R,\delta p}$) para diferentes níveis de deslocamento vertical (δp), contado a partir da carga de fissuração (P_f), deve ser feito pela seguinte equação:

$$f_{R,\delta p} = \frac{4 \times P_{\delta p}}{9 \times \pi \times a \times H}$$

Onde:

$f_{R,\delta p}$ - é a resistência residual correspondente a um deslocamento vertical δp , expressa em megapascals (MPa);

$P_{\delta p}$ - é a carga residual correspondente a um deslocamento vertical δp , expressa em newtons (N);

A - é o diâmetro do disco de aplicação da carga, expresso em milímetros (mm);

H - é a altura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Vale salientar que os valores das resistências residuais foram determinados para os níveis de deslocamento vertical pós-fissuração (δ_p) conforme pode ser visualizado na Figura 8.

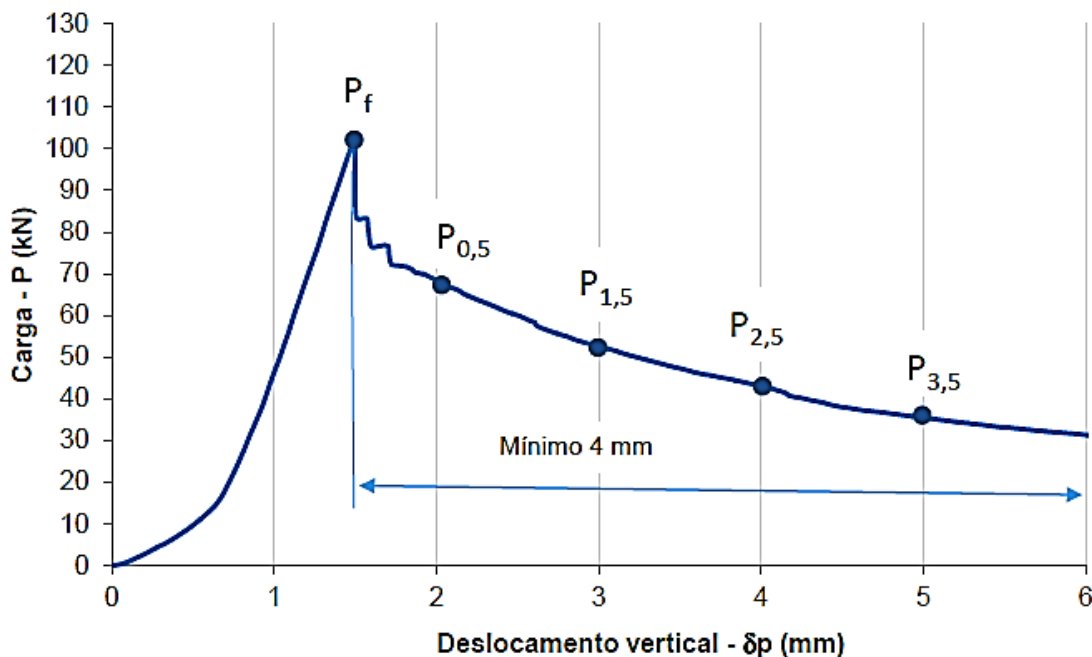


Figura 8: Diagrama de carga versus deslocamento vertical, identificando os pontos de carga para obtenção dos parâmetros

Fonte: ABNT NBR 16939 [2]

Após o período de cura, as bases dos corpos de prova foram preparadas em retífica, a fim de garantir a planicidade e a perpendicularidade com o eixo longitudinal do corpo de prova, além de garantir que não houvessem quaisquer irregularidades na zona de contato com os discos. Desta forma, as superfícies ficaram lisas e livres de ondulações e abaulamentos. Por fim, após o preparo das bases, realizou-se, para cada corpo de prova, as medidas do diâmetro e altura com o uso de um paquímetro, conforme as diretrizes da norma NBR 16939 [2].

As dimensões do diâmetro e da altura dos corpos de prova visualizadas nas Tabelas 6 e 7 do item 4.2 deste relatório

Para ambos teores, os ensaios de duplo de puncionamento foram realizados aos 28 dias.

3.7 DETERMINAÇÕES DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Para avaliar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, o método utilizado foi baseado na norma ABNT NBR 16940:2021: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio.

Este procedimento experimental prescreve ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos de concretos reforçados com fibras, cujas dimensões são 15 x 15 x 55 cm e/ou 10 x 10 x 40 cm.

Todos os corpos de prova moldados receberam entalhes centralizados em sua face inferior, a qual ficava apoiada nos cutelos da base da prensa. As dimensões da altura dos corpos de prova e a profundidade do entalhe podem ser visualizadas nas Tabelas 13 e 14 deste relatório. A função do entalhe é induzir o posicionamento da fissura. A carga foi aplicada por apenas um cutelo superior, centralizado em relação ao vão de ensaio. O deslocamento vertical do cutelo superior foi a variável de controle do ensaio. O esquema da execução do ensaio está mostrado nas Figuras 9 e 10.

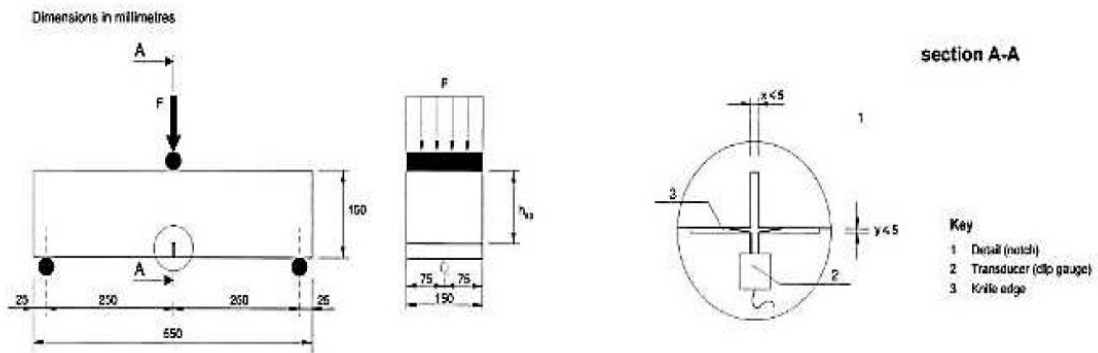


Figura 9: Esquema de realização do ensaio de flexão três pontos para medição do deslocamento de abertura de fissura

Fonte: ABNT NBR 16940

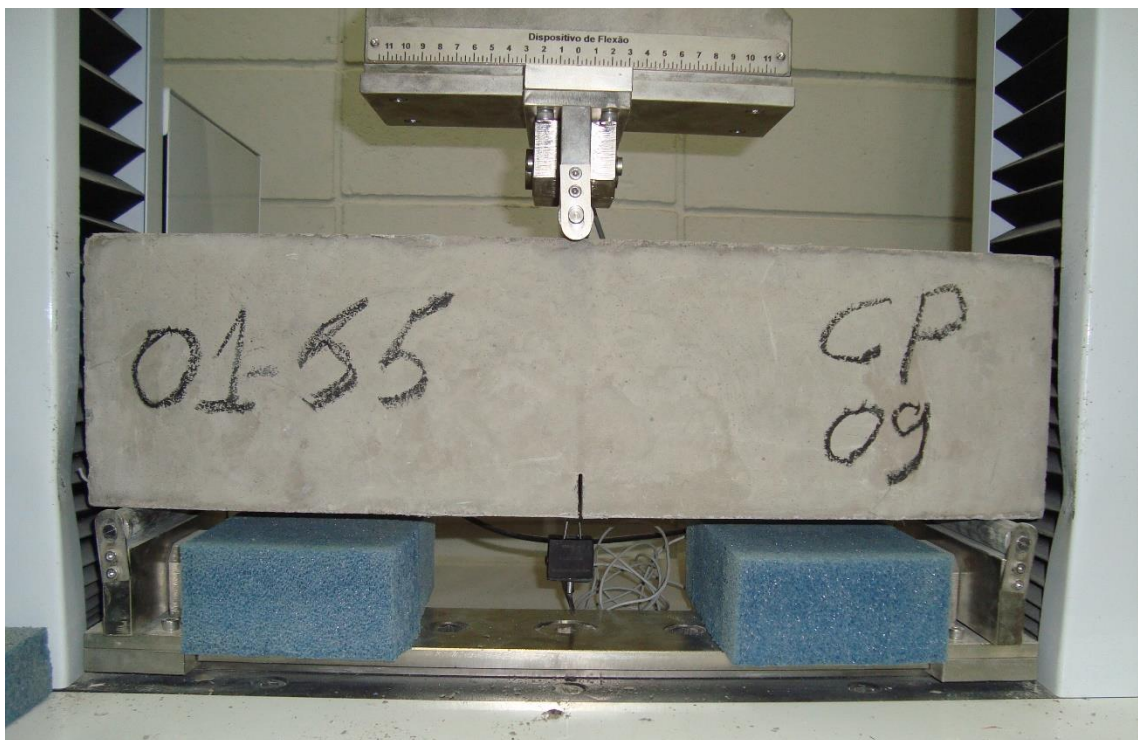


Figura 10: Corpo de prova 01-55 CP09 posicionado na prensa, para medição do deslocamento de abertura de fissura

Foram utilizadas duas velocidades de aplicação de carga: no primeiro trecho, correspondente ao intervalo de abertura de fissura entre 0 e 0,10 mm, a

velocidade da abertura da fissura foi de 0,05 mm/min. Na segunda, entre 0,10 e 4,0 mm, a velocidade foi de 0,20 mm/min.

Para a determinação da resistência máxima à tração do CRF ou também chamado de limite de proporcionalidade, abreviado por LOP (f_L) utilizou-se a seguinte equação:

$$f_L = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2}$$

Onde:

f_L - é o LOP, limite de proporcionalidade, expresso em newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

F_L - é a carga correspondente ao LOP, expressa em newtons (N);

l - é o comprimento do vão, expresso em milímetros (mm);

b - é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h_{sp} - é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Já para o cálculo das resistências residuais à tração na flexão (f_{R,i}) utilizou-se a seguinte equação:

$$f_{R,i} = \frac{3F_i l}{2bh_{sp}^2}$$

Em que:

$F_{R,j}$ - é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao $CMOD = CMOD_i$ (com $i = 1, 2, 3, 4$), expressa em newtons por milímetro quadrado (N/mm^2);

F_i - é a carga correspondente ao $CMOD = CMOD_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), expressa em newtons (N);

l - é o comprimento do vão, expresso em milímetros (mm);

b - é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h_{sp} - é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

A Figura 11 ilustra a determinação da resistência residual à tração $f_{R,i}$.

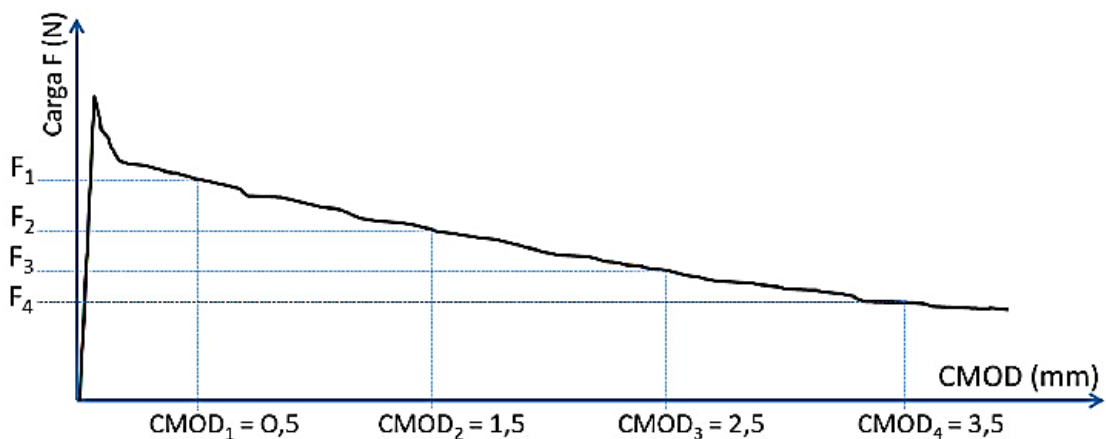


Figura 11: Diagrama típico de cargas versus $CMOD$, identificando as cargas residuais

Fonte: ABNT NBR 16940

Para a realização do ensaio de tração na flexão foram moldados 40 corpos de prova prismáticos 15 x 15 x 55 cm (LxAxC) (vide Tabela 4), seguindo as diretrizes da norma NBR 16940.

Após o período de cura, para os corpos de prova prismáticos, um dia antes da data da realização do ensaio, realizou-se a confecção dos entalhes, conforme as recomendações da norma NBR 16940. Para esses mesmos corpos de prova foi realizado a colagem das chapas de fixação do clip-gage no mesmo dia do ensaio. Por fim, após a etapa, realizou-se, para cada corpo de prova prismático, as medidas da largura, altura, comprimento e da distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova com o uso de um paquímetro, conforme as diretrizes da norma NBR 16940 [3].

Para ambos teores, os ensaios de tração na flexão foram realizados aos 7 e 28 dias.

4. RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO NAS FIBRAS

A Tabela 6 exibe os resultados dos cálculos para a determinação do diâmetro equivalente (d_e), do fator de forma (λ) e da área da seção transversal para as dez (10) fibras ensaiadas.

Tabela 6 – Diâmetro equivalente, fator de forma e área da seção transversal para as fibras ensaiadas

Identificação da Comptest	Diâmetro equivalente, d_e (mm)	Fator de forma, λ	Área da seção transversal, A (mm²)
Serve 02-01	0,285	178,714	0,064
Serve 02-02	0,271	188,834	0,058
Serve 02-03	0,262	196,788	0,054
Serve 02-04	0,251	203,580	0,049
Serve 02-05	0,273	189,343	0,058
Serve 02-06	0,278	184,175	0,061
Serve 02-07	0,239	214,479	0,045
Serve 02-08	0,251	203,339	0,050
Serve 02-09	0,247	206,978	0,048
Serve 02-10	0,256	200,684	0,052

A Tabela 7 exibe os resultados dos ensaios de tração para as dez (10) fibras ensaiadas.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de tração

Identificação da Comptest	Força Máx. (N)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento Força Máx. (%)	Alongamento Ruptura (%)
Serve 02-01	11,610	181,51	8,1	108,3
Serve 02-02	15,269	265,49	8,9	109,0
Serve 02-03	14,397	266,61	8,2	108,4
Serve 02-04	12,095	245,39	6,3	107,1
Serve 02-05	13,820	236,92	8,1	110,9
Serve 02-06	11,620	191,45	6,0	106,5
Serve 02-07	11,054	246,01	6,8	107,0
Serve 02-08	12,516	252,33	7,5	113,1
Serve 02-09	11,008	229,95	6,2	109,5
Serve 02-10	10,127	196,55	4,5	104,6
Média	12,35	231,22	-	-
Desvio padrão	1,65	30,88	-	-

As Tabelas 8 e 9 exibem, respectivamente, os resultados do módulo secante e inicial para as dez (10) fibras ensaiadas.

Tabela 8 – Resultados para determinação do módulo secante

Identificação da Comptest	Tensão	Tensão	Deformação	Deformação	Módulo
	a 10%	a 30%	a 10% ^a	a 30% ^b	secante
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)
Serve 02-01	19,48	54,13	1,27	2,42	3019,62
Serve 02-02	25,49	79,53	0,56	1,97	3825,23
Serve 02-03	25,35	79,17	0,47	1,65	4568,28
Serve 02-04	27,45	74,17	0,46	1,43	4843,59
Serve 02-05	24,10	72,10	0,57	1,92	3539,57
Serve 02-06	20,15	56,66	0,44	1,43	3687,99
Serve 02-07	24,28	73,07	0,47	1,58	4376,96
Serve 02-08	22,42	74,66	0,36	1,26	5781,27
Serve 02-09	23,19	68,47	0,39	1,22	5462,80
Serve 02-10	19,16	60,36	0,30	1,05	5503,50
Média	23,11	69,23	0,529	1,59	4460,88
Desvio padrão	2,64	8,64	0,259	0,39	890,33

^a – Valor da deformação correspondente a 10% da tensão (carga) máxima obtida no ensaio;

^b – Valor da deformação correspondente a 30% da tensão (carga) máxima obtida no ensaio.

Tabela 9 – Resultados para determinação do módulo inicial

Identificação da Comptest	Tensão	Tensão	Deformação	Deformação	Módulo
	a	a	a 0,05%	a 0,25%	inicial
	0,05% ^c	0,25% ^d	(%)	(%)	(MPa)
	(MPa)	(MPa)			
Serve 02-01	*	*	*	*	*
Serve 02-02	2,02	10,22	0,090	0,243	5348,50
Serve 02-03	1,04	11,98	0,058	0,225	6532,47
Serve 02-04	2,54	13,17	0,076	0,232	6790,10
Serve 02-05	1,83	9,69	0,077	0,240	4809,27
Serve 02-06	1,68	9,19	0,075	0,221	5155,29
Serve 02-07	1,60	11,28	0,073	0,229	6196,03
Serve 02-08	0,67	17,10	0,046	0,274	7193,18
Serve 02-09	0,44	11,91	0,047	0,223	6509,82
Serve 02-10	3,45	14,48	0,077	0,226	7412,97
Média	1,70	12,11	0,062	0,211	5594,76
Desvio padrão	0,88	2,37	0,025	0,072	2038,14

^c – Valor da tensão correspondente a 0,05% da deformação máxima obtida no ensaio;

^d– Valor da tensão correspondente a 0,25% da deformação máxima obtida no ensaio.

* - Desconsiderou-se o resultado da amostra Serve 02-01, nos valores da média e desvio padrão.

Nas Figuras 12 e 13 é possível observar, respectivamente, os gráficos de força, em Newton (N) vs o deslocamento do travessão, em milímetro (mm) e, da tensão, em megapascal (MPa) vs a deformação, em porcentagem (%) para as dez (10) fibras ensaiadas.

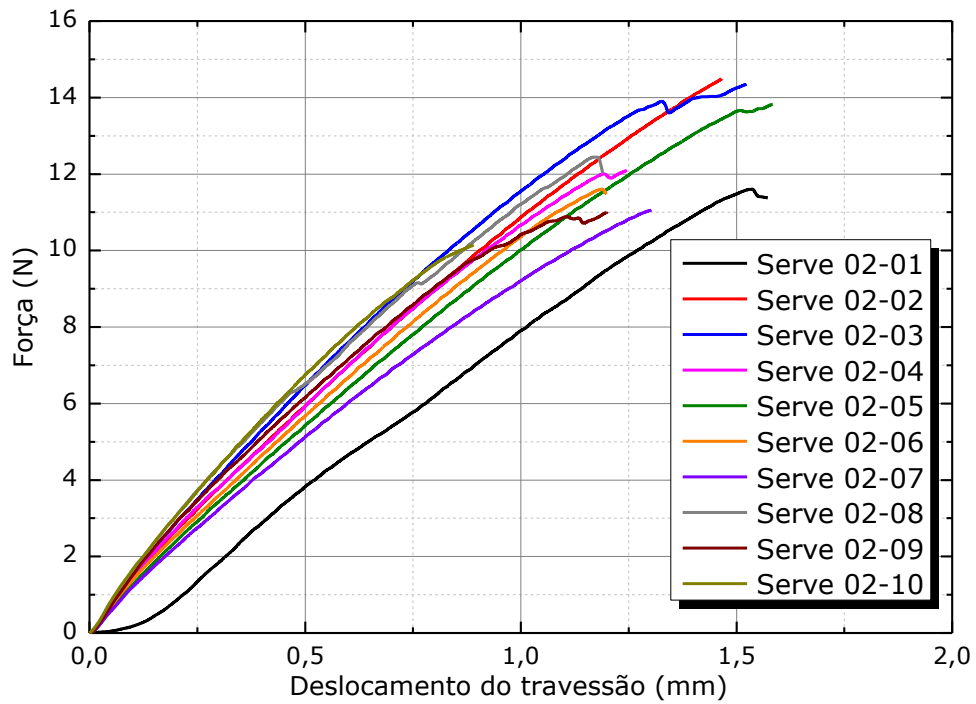


Figura 12: Curvas de força vs deslocamento do travessão para as dez fibras ensaiadas

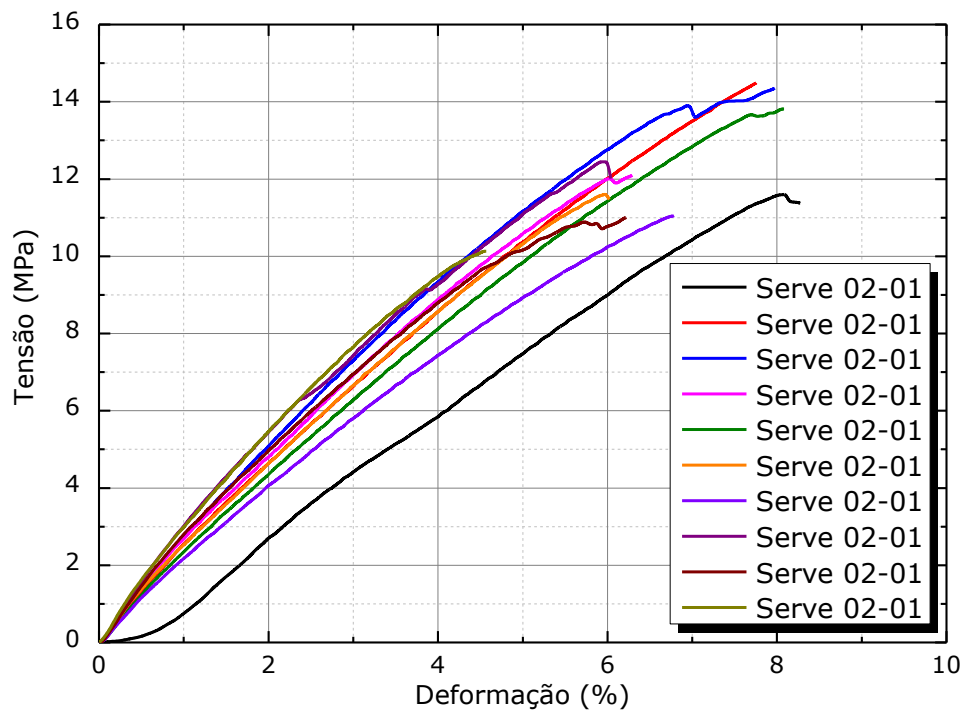


Figura 13: Curvas de tensão vs deformação para as dez fibras ensaiadas

A partir dos resultados dos ensaios de tração pode-se dizer que, para a fibra ensaiada, a resistência à tração é igual a 231,22 MPa o módulo de elasticidade secante igual 4,46 GPa e o módulo tangente inicial igual a 5,59 GPa.

Na Figura 14 é possível observar a fibra após o ensaio de tração.

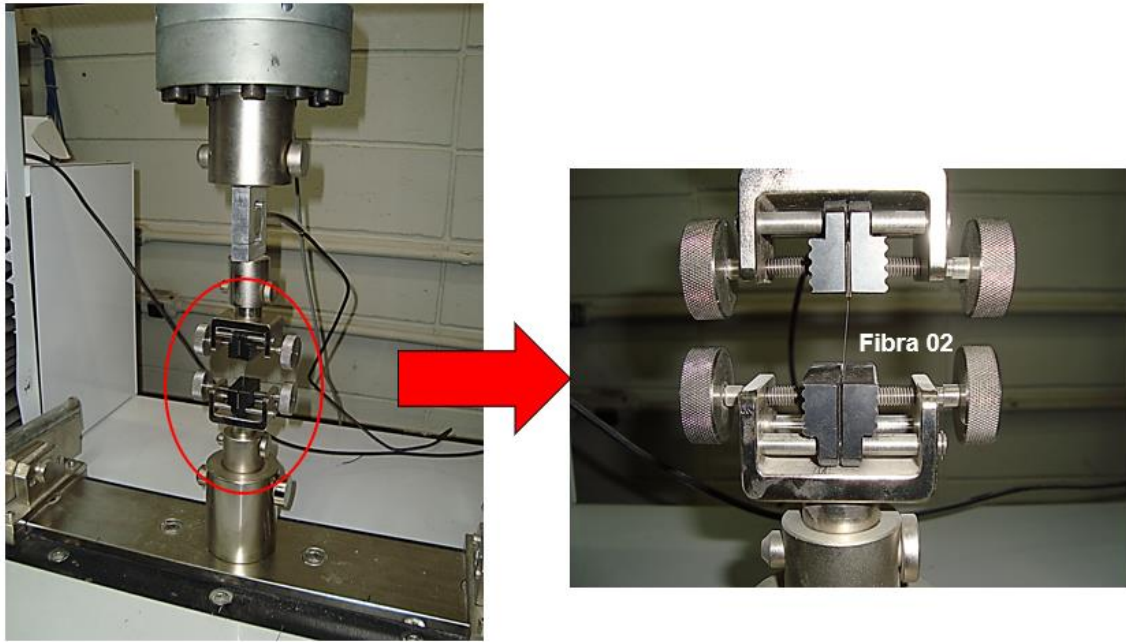


Figura 14: Fibra polimérica rompida, após ensaio de tração

4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Na Tabela 10 é possível observar, respectivamente, os resultados dos ensaios de compressão axial para os seguintes teores de fibra, 2,5; 3,5, 4,5 e 5,5 Kg/m³, Nestas Tabelas o valor da tensão máxima, em megapascal. Vale destacar que para cada teor de fibra as terminações A são referentes aos ensaios de compressão realizados com 7 dias e as letras B, C e D referente aos testes de compressão realizados aos 28 dias. A Figura 15 exibe, respectivamente, um gráfico de barras com os valores das resistências à compressão (aos 28 dias) para cada teor, comparando com o valor do f_{ck} , que foi de 30 MPa, para cada um dos teores realizadas. Vale destacar que foi utilizado o maior valor da resistência.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de compressão (Fck)

Corpo de prova	Tensão (MPa) 7 dias	Corpo de prova	Tensão (MPa) 28 dias
01-25A	25,6	01-25B	41,6
		01-25C	40,1
		01-25D	41,2

Corpo de prova	Tensão (MPa) 7 dias	Corpo de prova	Tensão (MPa) 28 dias
01-35A	23,7	01-35B	45,1
		01-35C	47,0
		01-35D	43,7

Corpo de prova	Tensão (MPa) 7 dias	Corpo de prova	Tensão (MPa) 28 dias
01-45A	21,8	01-45B	38,9
		01-45C	39,2
		01-45D	38,6

Corpo de prova	Tensão (MPa) 7 dias	Corpo de prova	Tensão (MPa) 28 dias
01-55A	25,3	01-55B	38,9
		01-55C	38,5
		01-55D	36,2

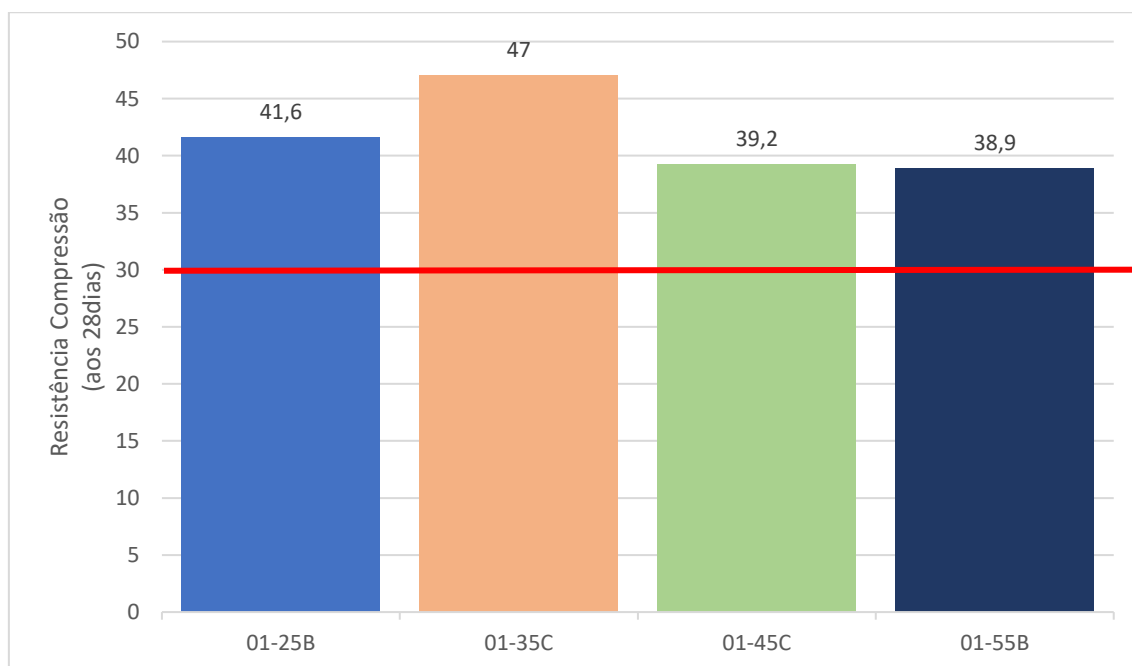


Figura 15: Gráfico das resistências à compressão para a 1ª Chamada

4.3 DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À FISSURAÇÃO E RESIDUAIS À TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇIONAMENTO

Na Tabela 11 é possível observar, respectivamente, a identificação dos corpos de prova, as medidas dos diâmetros e das alturas médias, os valores da carga de fissuração (P_f) e as resistências à tração por duplo puncionamento (f_t) para os corpos de prova cilíndricos de 15 x 15 cm. Todos os CRFs foram ensaiados com idade de 28 dias.

Vale ressaltar que o diâmetro do disco, a , utilizado nos cálculos das resistências para todos os corpos de prova foi igual a 37,5 mm.

Tabela 11 – Dimensões e resultados das resistências à tração por duplo puncionamento para os corpos de provas na idade de 28 dias

Identificação	Diâmetro	Altura	Carga de	Resistência à
Comptest	médio,	média,	fissuração	fissuração
	D_m	H_m	P_F	f_L
	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
01-25-01	149,5	154,3	129971,0	3,18
01-25-02	149,5	146,7	135981,0	3,50
01-25-03	151,5	148	135678,0	3,46
01-25-04	150,0	147,7	125606,0	3,21
01-25-05	149,5	150,3	133575,0	3,35
01-25-06	149,5	154,7	137908,0	3,36

Identificação	Diâmetro	Altura	Carga de	Resistência à
Comptest	médio,	média,	fissuração	fissuração
	D_m	H_m	P_F	f_L

	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
01-35-01	150	149	123742,0	3,13
01-35-02	149,5	152,3	106275,0	2,63
01-35-03	149,5	152,7	143866,0	3,56
01-35-04	149	166	138397,0	3,15
01-35-05	148,5	159,3	142054,0	3,36
01-35-06	149,5	151,3	131697,0	3,28

Identificação	Diâmetro	Altura	Carga de	Resistência à
Comptest	médio,	média,	fissuração	fissuração
	D_m	H_m	P_F	f_L
	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
01-45-01	150,5	150,7	146637,5	3,67
01-45-02	149,5	149	110130,0	2,79
01-45-03	151,5	149,7	154468,5	3,89
01-45-04	150,5	149,3	149825,1	3,78
01-45-05	150	150	150001,4	3,77
01-45-06	150,5	148,7	154641,8	3,92

Identificação	Diâmetro	Altura	Carga de	Resistência à
Comptest	médio,	média,	fissuração	fissuração
	D_m	H_m	P_F	f_L

	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
01-55-01	150,5	149,7	128273,618	3,23
01-55-02	150,5	152,7	138206,381	3,42
01-55-03	150	152,7	147370,017	3,64
01-55-04	150,5	150,3	154468,459	3,88
01-55-05	149	149,7	150368,679	3,79
01-55-06	149,5	150,3	151846,381	3,81

Na Tabela 12 é possível observar as resistências à tração por duplo puncionamento (f_t) e as cargas e as resistências residuais ($f_{R,\delta p}$) para as cargas de P0,5 ($f_{R,0,5}$), P1,5 ($f_{R,1,5}$), P2,5 ($f_{R,2,5}$) e P3,5 ($f_{R,3,5}$) para os corpos de prova.

Tabela 12 – Resultados das resistências à tração por duplo puncionamento e das resistências residuais para os corpos de. Idade 28 dias.

Identificação	f_t	P0,5	P1,5	P2,5	P3,5	$f_{R,0,5}$	$f_{R,1,5}$	$f_{R,2,5}$	$f_{R,3,5}$
Comptest	(MPa)	(N)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-25-01	3,18	16077,782	58917,269	100496,614	831,001	0,39	1,44	2,46	0,02
01-25-02	3,50	14032,547	55298,52	96724,174	776,444	0,36	1,42	2,49	0,02
01-25-03	3,46	15306,66	56653,804	99236,473	42,581	0,39	1,44	2,53	0,00
01-25-04	3,21	15616,706	57742,955	100306,994	4718,544	0,40	1,48	2,56	0,12
01-25-05	3,35	15498,276	57631,179	100239,13	13,972	0,39	1,45	2,52	0,00

01-25-06	3,36	14063,152	56138,836	98516,582	108,449	0,34	1,37	2,40	0,00
Média	3,34	15099,2	57063,8	99253,3	1067,6	0,38	1,43	2,49	0,03

Identificação	f _t	P0,5	P1,5	P2,5	P3,5	f _{R,0,5}	f _{R,1,5}	f _{R,2,5}	f _{R,3,5}
Comptest	(MPa)	(N)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-35-01	3,13	13461,7	52808,2	91936,3	163,0	0,34	1,34	2,33	0,00
01-35-02	2,63	11594,9	49987,3	88459,1	82,0	0,29	1,24	2,19	0,00
01-35-03	3,56	16295,3	56884,0	99402,1	140511,1	0,40	1,41	2,46	3,47
01-35-04	3,15	14698,4	53921,3	94343,6	132968,9	0,33	1,23	2,14	3,02
01-35-05	3,36	17899,5	60265,2	102734,8	29,9	0,42	1,43	2,43	0,00
01-35-06	3,28	6922,1	41301,2	80555,2	120576,4	0,17	1,03	2,01	3,01
Média	3,19	13478,7	52527,9	92905,2	65722,0	0,3	1,3	2,3	1,6

Identificação	f _t	P0,5	P1,5	P2,5	P3,5	f _{R,0,5}	f _{R,1,5}	f _{R,2,5}	f _{R,3,5}
Comptest	(MPa)	(N)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-45-01	3,67	14640,6	57125,5	96871,8	140256,2	0,37	1,43	2,43	3,51
01-45-02	2,79	13216,8	52122,8	91170,6	14890,1	0,33	1,32	2,31	0,38
01-45-03	3,89	14061,1	57408,9	100324,3	140870,5	0,35	1,45	2,53	3,55
01-45-04	3,78	15315,3	59905,9	103394,1	144988,7	0,39	1,51	2,61	3,66
01-45-05	3,77	14528,2	57780,8	100775,3	143477,1	0,37	1,45	2,53	3,61
01-45-06	3,92	13298,6	57243,5	101480,6	141828,4	0,34	1,45	2,58	3,60
Média	3,64	14176,8	59105,6	99002,8	30269,5	0,4	1,4	2,5	3,1

Identificação	f_t	P0,5	P1,5	P2,5	P3,5	$f_{R,0,5}$	$f_{R,1,5}$	$f_{R,2,5}$	$f_{R,3,5}$
Comptest	(MPa)	(N)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-55-01	3,23	11592,1	48850,7	89833,3	11327,3	0,29	1,23	2,26	0,29
01-55-02	3,42	14727,8	59359,0	102595,7	14158,9	0,36	1,47	2,54	0,35
01-55-03	3,64	13996,6	57815,6	101073,4	142505,1	0,35	1,43	2,50	3,52
01-55-04	3,88	14061,1	57408,9	100324,2	140870,3	0,35	1,44	2,52	3,54
01-55-05	3,79	23261,3	57868,7	100813,9	142401,9	0,59	1,46	2,54	3,59
01-55-06	3,81	14858,8	57253,9	100304,9	142067,9	0,37	1,44	2,52	3,57
Média	3,63	15416,33	56426,15	99157,6	98888,6	0,39	1,41	2,48	2,47

Na Figura 16 é possível observar os gráficos da carga P versus o deslocamento vertical para os corpos de prova cilíndricos 15 x 15 cm, para a idade de 28.

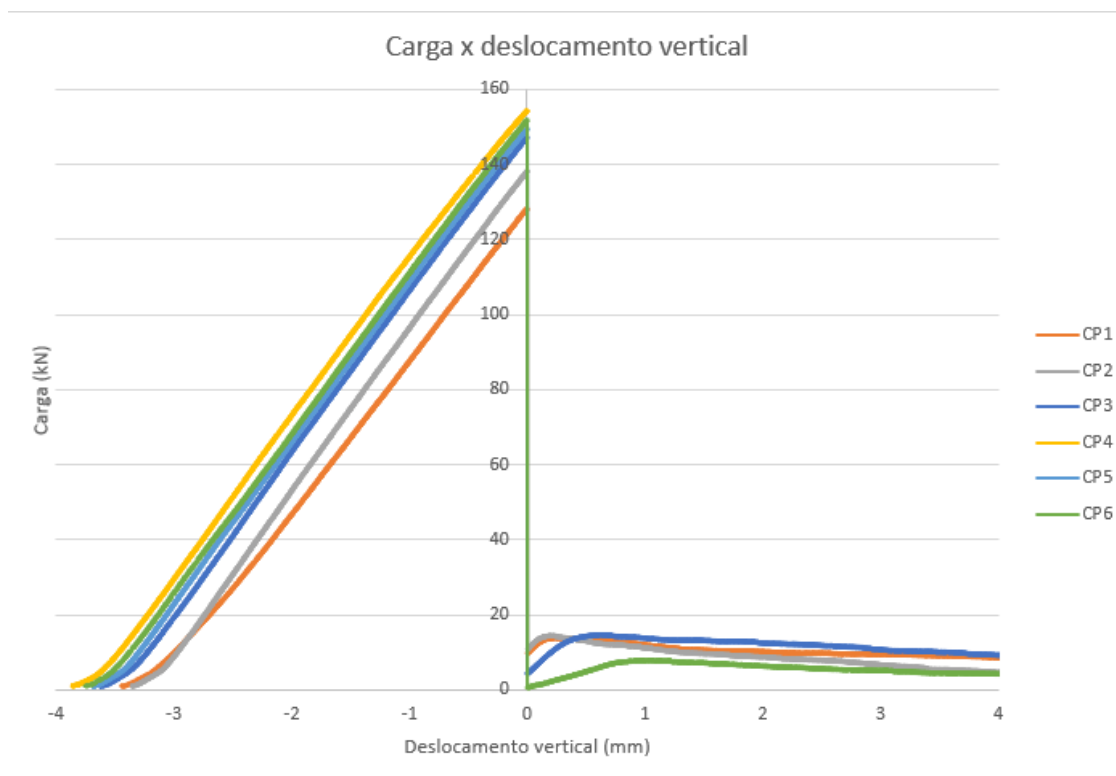


Figura 16: Diagrama de carga versus deslocamento vertical para os corpos de prova cilíndricos

A Figura 17 exibe um corpo de prova após a realização do ensaio de duplo puncionamento.



Figura 17: Corpo de prova 01-25-04 após o ensaio de duplo puncionamento

4.4 Determinação das resistências à tração na flexão

Nas Tabelas 13 e 14 é possível observar, respectivamente, a identificação dos corpos de prova, o comprimento, largura (b), altura (h_{sp}), a distância do vão do ensaio (l), os valores obtidos das cargas correspondentes ao LOP (F_L) e limite de proporcionalidade (f_L ou LOP) para os corpos de prova prismáticos de 15 x 15 x 55 cm todos os CRFs foram ensaiados com idade de 7 e 28 dias.

Tabela 13 – Dimensões e resultados do limite de proporcionalidade para os corpos de provas moldados com Idade de 7 dias

Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-25-01	550x153x24,2	150,0	128,8	500	11590,8	3,49
01-25-02	550x150x24,4	150,0	125,6	500	10949,4	3,47
Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-35-01	550x153x24,7	150,0	128,3	500	11744,5	3,57
01-35-02	550x150x24,1	150,0	125,9	500	10159,6	3,20
Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-45-01	550x152x24,2	152,0	128,7	500	10419,8	3,10
01-45-02	550x151x24,4	151,0	127,9	500	11218,9	3,39

Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-55-01	550x150x24,2	150,0	129,1	500	14478,3	4,34
01-55-02	550x152x24,4	152,0	129,9	500	13272,1	3,88

Tabela 14 – Dimensões e resultados do limite de proporcionalidade para os corpos de provas moldados com Idade de 28 dias

Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-25-03	551x150x24,7	150,0	126,9	500	15542,2	4,83
01-25-04	551x151x24,6	151,0	125,8	500	15688,6	4,92
01-25-05	551x150x25,0	150,0	126,6	500	15054,5	4,70
01-25-06	550x151x24,6	151,0	126,8	500	14634,0	4,52
01-25-07	551x151x24,9	151,0	128,7	500	14328,0	4,30
01-25-08	551x151x24,6	151,0	127,6	500	15090,4	4,60
01-25-09	550x151x24,9	151,0	126,6	500	14195,6	4,40
01-25-10	551x151x24,6	151,0	127,8	500	14645,3	4,45

Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-35-03	551x151x24,7	151,0	127,7	500	12729,8	3,88
01-35-04	551x151x24,6	151,0	126,0	500	12789,7	4,00
01-35-05	551x152x25,0	152,0	127,0	500	12804,3	3,92
01-35-06	550x152x24,6	152,0	127,9	500	14819,0	4,47
01-35-07	551x151x24,9	151,0	126,7	500	13777,7	4,26
01-35-08	551x151x24,6	151,0	129,2	500	13029,9	3,88
01-35-09	550x152x24,9	152,0	126,7	500	13932,7	4,28
01-35-10	551x152x24,6	152,0	129,6	500	13926,8	4,09

Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h_{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F_L (N)	Limite de proporcionalidade f_L (MPa)
01-45-03	551x152x24,7	152,0	125,5	500	12538,9	3,93
01-45-04	551x150x24,6	150,0	126,2	500	13562,8	4,26
01-45-05	551x152x25,0	152,0	126,4	500	13610,1	4,20
01-45-06	550x150x24,6	150,0	125,5	500	13835,6	4,39
01-45-07	551x150x24,9	150,0	128,2	500	16310,0	4,96
01-45-08	551x151x24,6	151,0	125,5	500	15139,7	4,77
01-45-09	550x151x24,9	151,0	127,3	500	16234,8	4,98
01-45-10	551x151x24,6	151,0	126,4	500	15122,4	4,70

Identificação Comptest	Comprimento x altura x entalhe (mm)	Largura, b (mm)	Altura, h _{SP} (mm)	Distância do vão, l (mm)	Carga ao LOP, F _L (N)	Limite de proporcionalidade f _L (MPa)
01-55-03	551x151x24,7	151,0	127,9	500	16971,3	5,15
01-55-04	551x150x24,6	150,0	126,9	500	12648,7	3,93
01-55-05	551x150x25,0	150,0	126,9	500	16655,3	5,17
01-55-06	550x152x24,6	152,0	125,6	500	12240,1	3,83
01-55-07	551x152x24,9	152,0	128,3	500	16034,5	4,81
01-55-08	551x151x24,6	151,0	125,1	500	15191,6	4,82
01-55-09	550x151x24,9	151,0	130,6	500	15170,3	4,42
01-55-10	551x152x24,6	152,0	129,5	500	16401,8	4,83

Nas Tabelas 15 e 16 é possível observar as resistências a tração (f_L) e as resistências a tração residuais nas aberturas (CMOD) de 0,5mm (f_{R1}), 1,5mm (f_{R2}), 2,5mm (f_{R3}), 3,5mm (f_{R4}) e as relações entre elas, para os corpos de prova prismáticos.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão e as resistências residuais para os corpos de prova com idade de 7 dias

Identificação Comptest	f _L (MPa)	f _{R1} (MPa)	f _{R2} (MPa)	f _{R3} (MPa)	f _{R4} (MPa)	f _{R1} / f _L (MPa)	f _{R3} / f _L (MPa)	f _{R4} / f _L (MPa)
01-25-01	3,49	1,80	1,94	2,12	2,14	0,52	0,61	0,61
01-25-02	3,47	1,41	1,28	1,33	1,30	0,41	0,38	0,37
Média	3,48	1,60	1,61	1,73	1,72	0,46	0,50	0,49

Identificação	fL	fR1	fR2	fR3	fR4	fR1	fR3	fR4
						/ fL	/ fL	/ fL
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-35-01	3,57	1,32	1,17	1,30	1,26	0,37	0,36	0,35
01-35-02	3,20	0,82	0,65	0,66	0,60	0,25	0,21	0,19
Média	3,39	1,07	0,91	0,98	0,93	0,31	0,29	0,27

Identificação	fL	fR1	fR2	fR3	fR4	fR1	fR3	fR4
						/ fL	/ fL	/ fL
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-45-01	3,10	1,52	1,41	1,55	1,60	0,49	0,50	0,51
01-45-02	3,39	1,54	1,44	1,57	1,63	0,45	0,46	0,48
Média	3,25	1,53	1,42	1,56	1,61	0,47	0,48	0,50

Identificação	fL	fR1	fR2	fR3	fR4	fR1	fR3	fR4
						/ fL	/ fL	/ fL
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-55-01	4,34	2,30	2,13	2,24	2,23	0,53	0,52	0,51
01-55-02	3,88	1,84	2,03	2,25	2,17	0,48	0,58	0,56
Média	4,11	2,07	2,08	2,24	2,20	0,50	0,55	0,54

Tabela 16 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão e as resistências residuais para os corpos de prova moldados com idade de 28 dias

Identificação	f _L	f _{R1}	f _{R2}	f _{R3}	f _{R4}	f _{R1}	f _{R3}	f _{R4}
						/ f _L	/ f _L	/ f _L
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-25-03	4,83	1,50	1,98	2,02	2,11	0,31	0,42	0,44
01-25-04	4,92	1,77	1,54	2,08	2,10	0,36	0,42	0,43
01-25-05	4,70	1,65	1,63	2,11	2,11	0,35	0,45	0,45
01-25-06	4,52	1,64	1,58	2,15	2,03	0,36	0,48	0,45
01-25-07	4,30	1,17	1,83	2,07	2,07	0,27	0,48	0,48
01-25-08	4,60	1,51	1,97	2,08	2,08	0,33	0,45	0,46
01-25-09	4,40	1,67	1,89	2,15	2,1	0,38	0,49	0,48
01-25-10	4,45	1,21	1,77	2,01	2,15	0,27	0,45	0,48
Média	4,59	1,65	1,77	2,08	2,10	0,33	0,45	0,46

Identificação	f _L	f _{R1}	f _{R2}	f _{R3}	f _{R4}	f _{R1}	f _{R3}	f _{R4}
						/ f _L	/ f _L	/ f _L
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-35-03	3,88	1,02	0,76	0,72	0,71	0,26	0,19	0,18
01-35-04	4,00	1,60	1,05	1,05	1,03	0,40	0,26	0,26
01-35-05	3,92	1,33	0,88	0,93	0,83	0,34	0,24	0,21
01-35-06	4,47	1,52	1,38	1,48	1,37	0,34	0,33	0,31
01-35-07	4,26	1,47	1,17	1,17	1,12	0,35	0,28	0,26

01-35-08	3,88	0,97	0,67	0,68	0,72	0,25	0,17	0,19
01-35-09	4,28	1,35	0,61	0,64	0,59	0,31	0,15	0,14
01-35-10	4,09	1,37	0,95	0,97	1,02	0,34	0,24	0,25
Média	4,10	1,33	0,93	0,96	0,92	0,32	0,23	0,22

Identificação	f _L	f _{R1}	f _{R2}	f _{R3}	f _{R4}	f _{R1}	f _{R3}	f _{R4}
						/ f _L	/ f _L	/ f _L
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-45-03	3,93	1,30	1,34	1,45	1,54	0,33	0,37	0,39
01-45-04	4,26	1,42	1,41	1,57	1,51	0,33	0,37	0,36
01-45-05	4,20	1,51	1,71	1,94	1,91	0,36	0,46	0,45
01-45-06	4,39	1,71	1,95	2,16	2,17	0,39	0,49	0,49
01-45-07	4,96	2,05	2,26	2,50	2,58	0,41	0,50	0,52
01-45-08	4,77	1,45	1,53	1,62	1,42	0,30	0,34	0,30
01-45-09	4,98	1,59	1,64	1,90	1,77	0,32	0,38	0,36
01-45-10	4,70	2,24	2,54	2,75	2,64	0,48	0,59	0,56
Média	4,52	1,66	1,80	1,98	1,94	0,37	0,44	0,43

Identificação	f _L	f _{R1}	f _{R2}	f _{R3}	f _{R4}	f _{R1}	f _{R3}	f _{R4}
						/ f _L	/ f _L	/ f _L
Comptest	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
01-55-03	5,15	2,10	2,15	2,22	1,97	0,41	0,43	0,38
01-55-04	3,93	1,06	1,07	1,25	1,24	0,27	0,32	0,32
01-55-05	5,17	2,69	2,97	3,17	2,82	0,52	0,61	0,54

01-55-06	3,83	1,38	1,47	1,59	1,53	0,36	0,42	0,40
01-55-07	4,81	1,53	1,73	1,78	1,68	0,32	0,37	0,35
01-55-08	4,82	1,91	2,08	2,27	2,22	0,40	0,47	0,46
01-55-09	4,42	1,62	1,52	1,75	1,62	0,37	0,40	0,37
01-55-10	4,83	1,73	1,91	2,09	2,07	0,36	0,43	0,43
Média	4,62	1,75	1,86	2,01	1,89	0,37	0,43	0,41

Nas Figuras 18 e 19 é possível observar, respectivamente, os gráficos da carga em função do C_{MOD} e da resistência à tração por flexão em função do C_{MOD} para os corpos de prova moldados, para as idades de 7 e 28 dias. Já nas Figuras 20 e 21 é possível observar, respectivamente, os gráficos da carga em função do C_{MOD} e da resistência à tração por flexão em função do C_{MOD} para os corpos de prova moldados, para as idades de 7 e 28 dias.

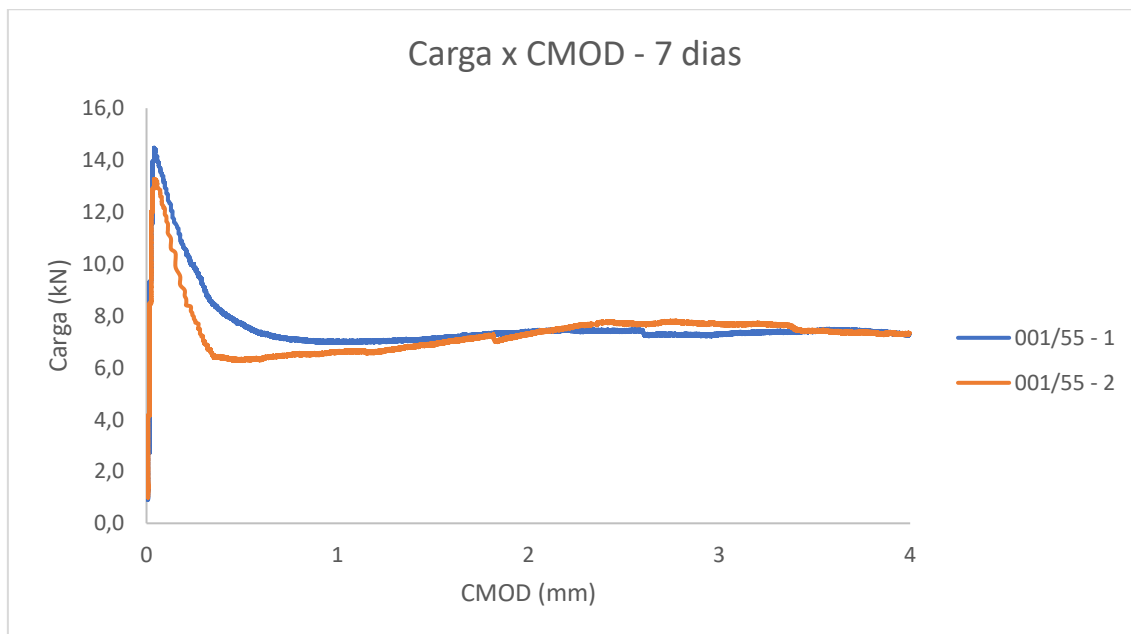


Figura 18: Gráfico da carga *versus* C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 7 dias

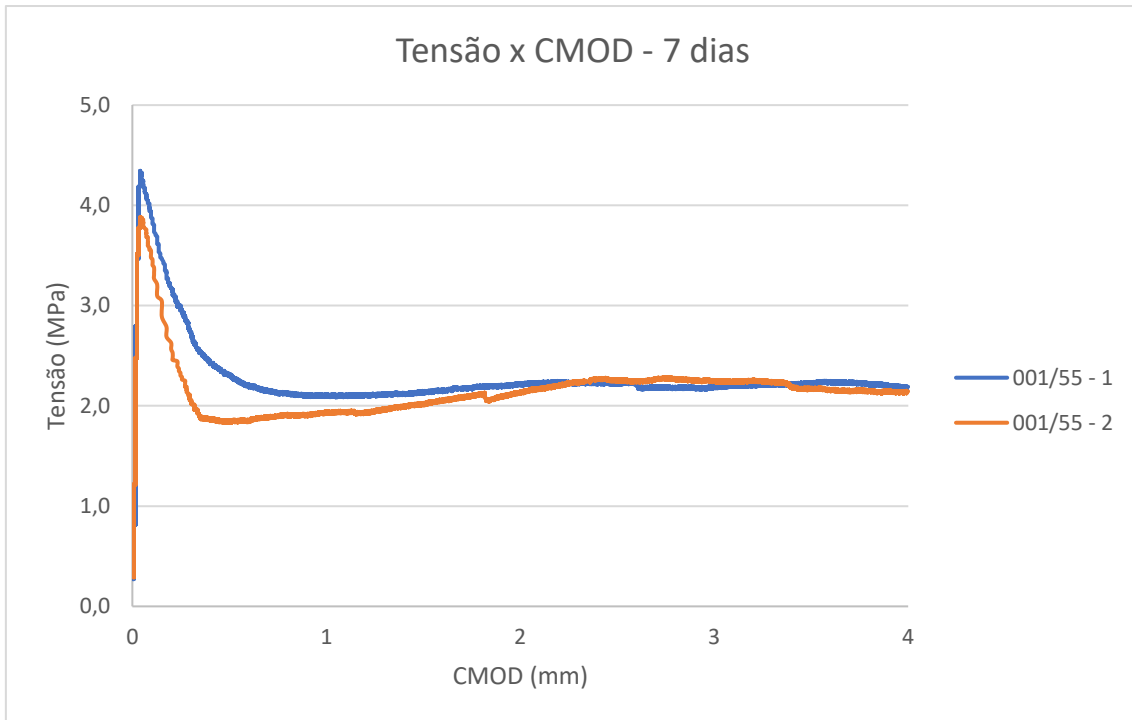


Figura 19: Gráfico da tensão *versus* C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 7 dias

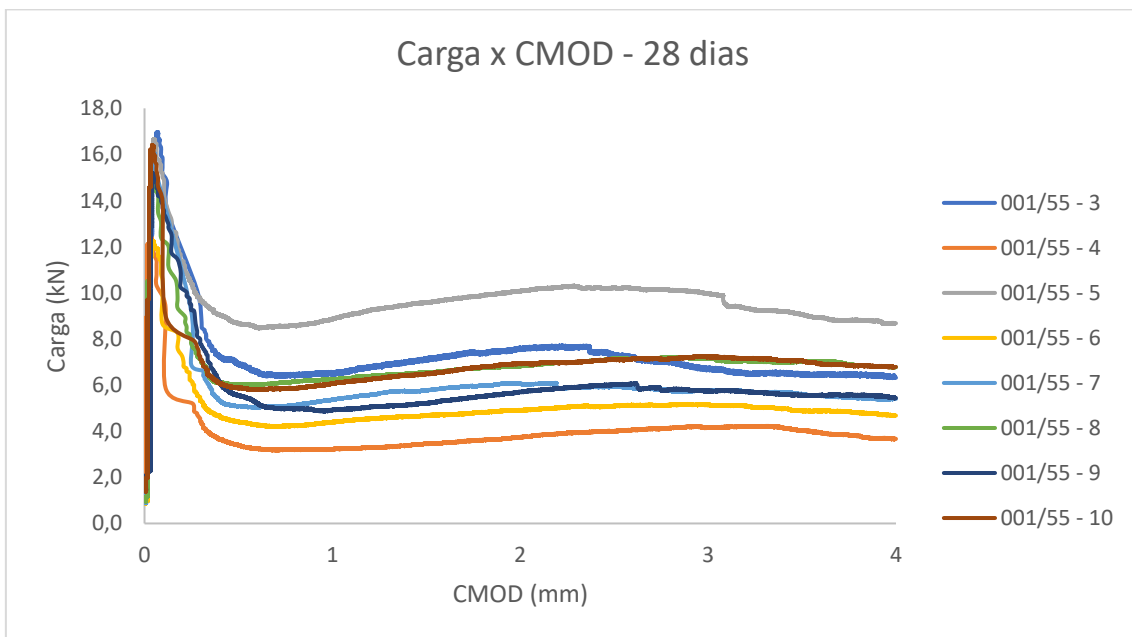


Figura 20: Gráfico da carga *versus* C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 28 dias

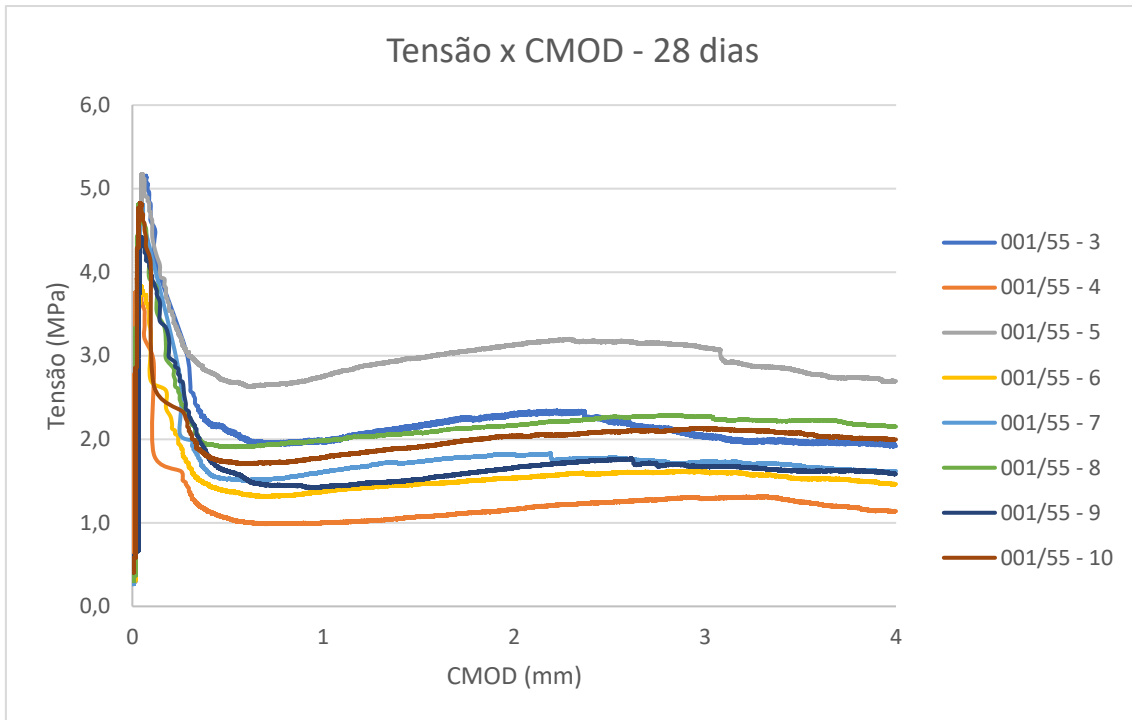


Figura 21: Gráfico da tensão *versus* C_{MOD} para os corpos de prova moldados, idade 28 dias

A Figura 22 exibe um corpo de prova após a realização do ensaio de tração na flexão.



Figura 22: Corpo de prova 2/9B, após a realização do ensaio

5. CONCLUSÃO

A pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento do concreto em seu estado plástico e endurecido, quando incorporados fibras poliméricas, com diferentes teores. Sendo assim, pode-se obter as seguintes conclusões:

A incorporação das fibras no concreto, em seu estado plástico, reduz sua fluidez e sua trabalhabilidade, na proporção direta do aumento do teor de fibras, sendo pouco relevante o efeito do tipo de fibra.

As fibras proporcionaram reforço mecânico nos compósitos, principalmente nas propriedades relacionada ao impacto e pós-primeira fratura, tenacidade na flexão e resistência residual. Esse comportamento se deve a melhor aderência percebida e a deformação plástica sofrida pela fibra, uma vez que as fibras não apresentaram a mesma aderência pós-ruptura e nem deformação apreciável.

Segundo testes realizados em laboratório com os corpos de prova nas condições de 2,5, 3,5, 4,5 e 5,5 Kg/m³ de fibra, o emprego de fibras poliméricas à formulação de concretos é tecnicamente viável. Todos os concretos produzidos atenderam a resistência mínima de 30 MPa. A dosagem dos insumos (areia + cimento + brita + água) foi à mesma em todas as misturas, sendo a dosagem das fibras a responsável pelas alterações nos valores obtidos. No que diz respeito ao ensaio de compressão, o melhor resultado foi obtido no concreto com 3,5 Kg/m³ de fibra polimérica. No ensaio de resistência à tração na flexão o maior valor obtido foi com o concreto com adição de 5,5 Kg/m³.

Ao realizarmos os ensaios de duplo puncionamento os resultados não foram satisfatórios, porque alguns corpos de prova não chegaram a se romper devido ao limite de carga máxima que a máquina poderia aplicar, tornando assim o comparativo pouco confiável.

Em virtude dos dados obtidos, os empregos das fibras têm grandes benefícios. Dentro das porcentagens propostas, a mais recomendada é a 5,5kg/m³, sendo essa a detentora dos melhores resultados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16939. **Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16940. **Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16889. **Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015 Versão Corrigida:2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655. **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015 Versão Corrigida:2015.

ASOCIACIÓN ESPANOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83515: Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona**. Barcelona, 2010. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16942. **Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13385. **Fibra manufaturada - Determinação da carga de ruptura e do alongamento de ruptura - Ensaio dinâmométricos - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995.

BARRAGÁN, B. E. **Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear**. 2002. 151p. 1v. Tese (doutorado) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2002.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macrosynthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2713–2722, 2011.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C./ SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macrosynthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 5, p. 2713-2722, 2011.

CHEN, W. F. **Double punch test for tensile strength of concrete**. *ACI Mater Journal*, V. 67, n. 2, p. 993-995, 1970.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**, São Paulo, n. 53, p.14-19, mar. 2009. Trimestral.

SALUDES, S. R. **Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (Ensayo Barcelona)**. Minor Thesis, UPC, Barcelona, Espana, 2006.