



ARRANCAMENTO DE FIBRAS METÁLICAS COM GANCHO EM MODO II A PARTIR DE MATRIZES DE CONCRETO

Marcus Vinícius Canteri Gonçalves e Pablo Augusto Krah

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Fibras que cruzam planos de cisalhamento tem uma elevada capacidade de carga pois atuam como pinos. Esse comportamento foi descrito por diversos pesquisadores que buscavam compreender os mecanismos envolvidos no cisalhamento direto de um concreto reforçado com fibras. Os métodos para realizar um ensaio do tipo pino com fibras em interfaces de concreto são complexos e necessitam a moldagem de estruturas de concreto com geometrias especiais e em diversas etapas de concretagem, que dificulta a análise de elevados volumes de dados amostrais de cisalhamento puro em fibras individuais. Em Krah 2020, o autor inova com um novo método de ensaio de arrancamento em modo II usando um aparato de ensaio próprio que consegue realizar ensaios de arrancamento de fibras únicas com grande eficiência e quantidades de amostras. O presente artigo explora o método desenvolvido por Krah 2020 e replica o ensaio de arrancamento em modo II realizado. 10 fibras de aço foram arrancadas de um prisma de concreto estrutural e foi registrado uma força média de arrancamento de 189,62 N, com desvio padrão de 36,77 N. Esses dados resultaram em um coeficiente de variação (CV) de 19%. Em ensaios de cisalhamento puro usando os métodos tradicionais, o CV varia entre 20% e 55%, ou seja, por meio dessa pesquisa, verifico a elevada eficiência do método.

Palavras-chave: Concreto. Fibras metálicas. Ensaio de arrancamento.



ABSTRACT

Fibers crossing shear planes exhibit a high load-bearing capacity as they function like pins. This behavior has been described by various researchers aiming to understand the mechanisms involved in the direct shear of fiber-reinforced concrete. The methods for conducting pin-type tests with fibers in concrete interfaces are complex and require the molding of concrete structures with special geometries and in multiple stages of concreting, which complicates the analysis of large volumes of shear data on individual fibers. In Krah1 2020, the author introduces an innovative pull-out test method in Mode II using a custom testing apparatus that enables highly efficient testing of single fibers with substantial sample quantities. This article explores the method developed by Krah1 2020 and replicates the Mode II pull-out test conducted. Ten steel fibers were pulled out from a structural concrete prism, resulting in an average pull-out force of 189.62 N with a standard deviation of 36.77 N. These data yielded a coefficient of variation (CV) of 19%. In traditional pure shear tests, the CV ranges between 20% and 55%, indicating the high efficiency of the method demonstrated through this research.

Keywords: Concrete. Metallic fibers. Pull out test.



1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil por ser barato, fluido e extremamente resistente a esforços de compressão. No entanto, sua resistência à tração é baixa. Esse problema é solucionado com o uso de barras de aço para o reforço.

Mesmo assim, a flexibilidade na distribuição das barras nos elementos estruturais é restrita. A ideia é a utilização das fibras com boa resistência à tração que se distribuem uniformemente nos elementos, e servem como reforço para o concreto. Em certos casos, sendo possível substituir em partes o aço convencional (FIB MODEL CODE, 2010). Os materiais normalmente utilizados são fibra de aço, fibra de vidro, basalto e polipropileno (BENTUR; MINDESS, 2006). Estas adições proporcionam uma melhora na tração da estrutura. A tensão suportada pelas fibras foi verificada nos resultados dos arrancamentos, analisando a força empregada média dos arranques, com fins de uso das fibras em concreto para aumentar a resistência de tração, cisalhamento e diminuição das trincas, fissuras nas lajes, vigas e outros elementos estruturais.

Em 2021, foi publicada a norma brasileira de concreto com fibras ABNT NBR 16935 (2021) que proporciona procedimentos estruturais para caracterização do material e dimensionamento dos elementos estruturais. O presente artigo mostra os resultados dos ensaios de arrancamento de tipo 2, utilizando fibras de aço DRAMIX 3D 45/30 BL. A contribuição das fibras no cisalhamento requer mais aprofundamento nas pesquisas para poder compreender os fenômenos mecânicos envolvidos. Nesse contexto, o ensaio de cisalhamento direto (Krahl 2020) foi utilizado para obter esses resultados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Diversas pesquisas na área foram produzidas para entender os mecanismos envolvidos no cisalhamento direto do concreto. A adição de fibras no traço permite uma redução e até mesmo a eliminação do uso de outros elementos de reforço para aumentar a resistência à tração e ao cisalhamento do elemento de concreto. A função das fibras é fazer uma ligação entre as partes do concreto que estão fissurando e se afastando.

Como descrito em Krahl (2020), fibras metálicas podem ser submetidas a três modos de rompimento, em modo I, a fibra é submetida à tração direta., já em modo II, a fibra sofre um cisalhamento puro, e tem um comportamento de um pino, segurando as duas interfaces de concreto. O modo III é um misto entre a tração pura (modo I) e o cisalhamento puro, (modo II).

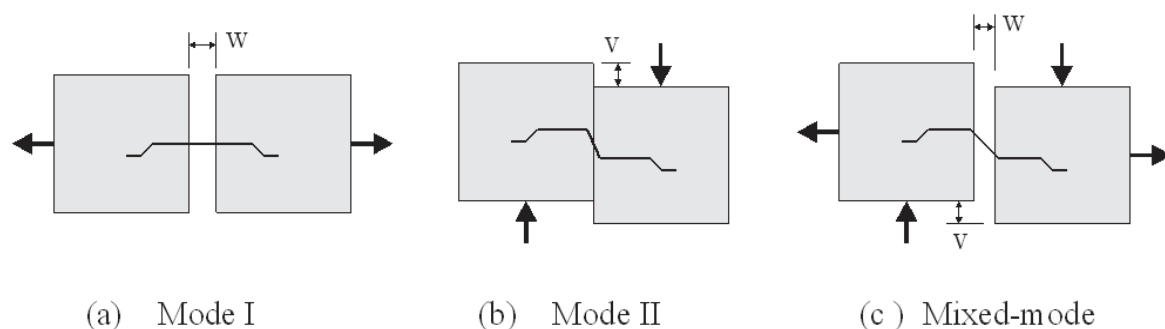


Figura 2.1 – Modos de rompimentos de uma fibra metálica. Fonte: Krahl 2020.

O arrancamento de uma única fibra, é um método confiável para entender os mecanismos envolvidos no cisalhamento. Em Krahl (2020) é enfatizado a escassez de literatura envolvendo ensaios de arrancamento puro de fibras em modo II.

Em um dos estudos que consideram o cisalhamento puro em seus experimentos, Lee (2007), observou o arrancamento das fibras e o rompimento delas. Outro fenômeno observado foi a abrasão da matriz de concreto na região em que a fibra atua como um pino, fenômeno conhecido como *snubbing effect* (H. Wu, 1992), que consiste em um aumento na interface de esforços e como consequência, a tensão de arrancamento.

Esse aparato montado por Lee (2007), consiste em duas matrizes de concreto armado em formato de L, (Figura 2.2a). As fibras são posicionadas dentro de um molde e fixadas em uma chapa de madeira que divide a amostra em duas partes simétricas. Cada parte é concretada separadamente, e o tempo de cura é aguardado para que a outra peça seja concretada. Essa estrutura forma um plano deslizante com as fibras de aço fixas no meio na estrutura. Uma carga é aplicada no plano normal à estrutura

e uma célula de carga registra esses dados. O deslocamento é medido entre as chapas das extremidades.

Outro grupo de pesquisadores, Soetens e Matthys (2012) montou um aparato de testes usando 3 peças de concreto. O processo de moldagem das formas para o ensaio é feito em duas etapas. Primeiro a matriz central é concretada com as extremidades das fibras fixadas. Um plástico filme separa a matriz principal dos planos deslizantes, que são moldados após a cura da primeira parte. Os planos são fixados com parafusos e porcas em uma estrutura rígida. A carga é aplicada na matriz central e o deslocamento é medido entre o ponto de aplicação de força e os suportes (Figura 2.2b).

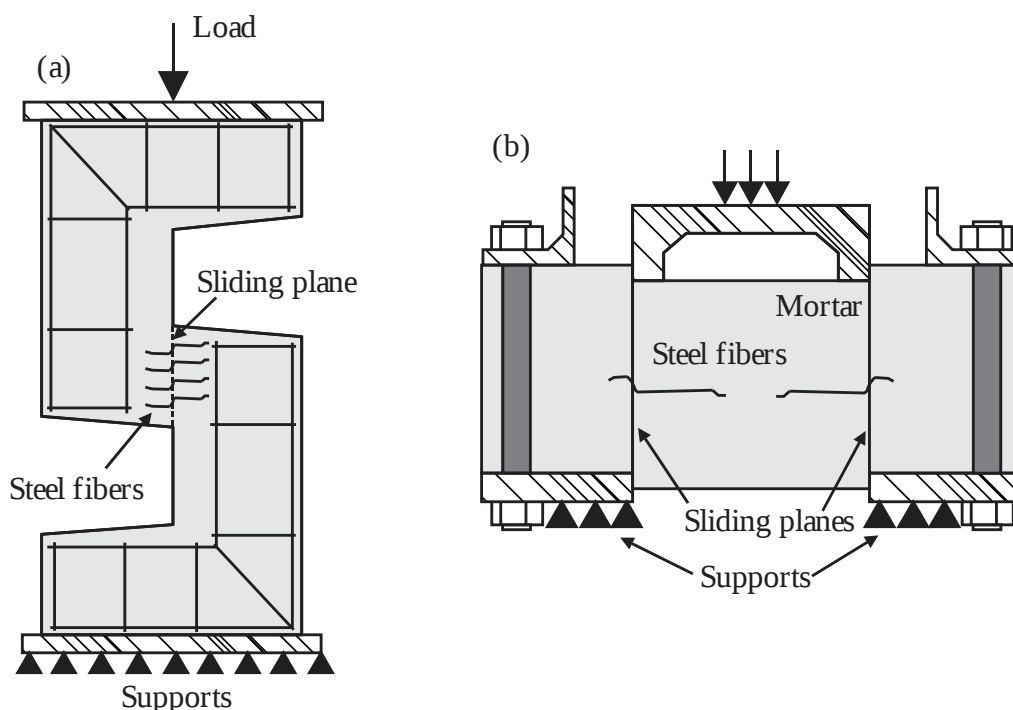


Figura 2.2 - Aparatos de ensaio de cisalhamento de fibras metálicas. Lee (a), Soetens e Matthys (b). Fonte: Krahl 2020.

O arrancamento de fibras metálicas com gancho em modo II foi proposto inicialmente em Krahl 2020, no qual foi desenvolvido um método inovador para ensaios de arrancamento em fibras únicas. O ensaio simula o comportamento de pino das fibras, e o arrancamento desse modo permite estudar os efeitos do cisalhamento puro nas fibras de aço (Figura 2.3).

Esse método permite o ensaio de várias fibras em sequência, pois podem ser fabricadas em um único prisma de concreto.

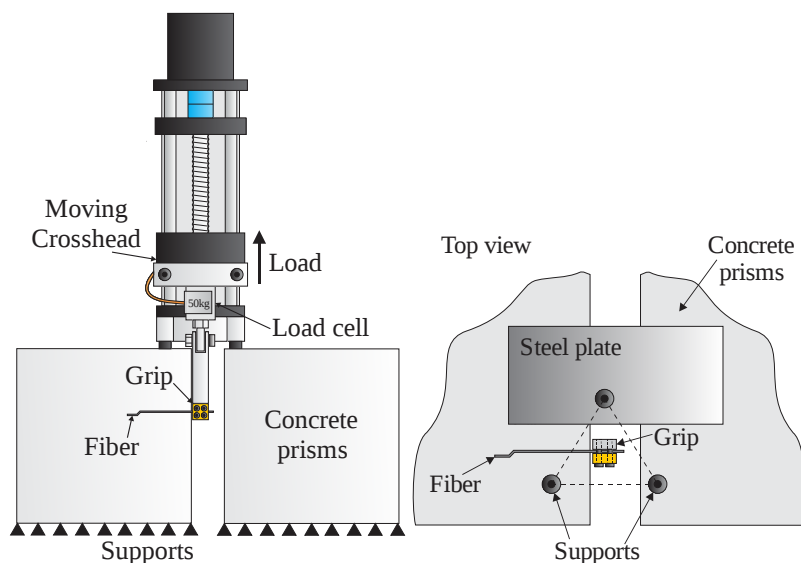


Figura 2.3 – Aparato de ensaio de arrancamento com garras em modo II. Fonte: Krahel 2020.

3. METODOLOGIA

Ensaio dos agregados

A norma técnica ABNT NBR 7211:2005 especifica os requisitos exigidos para recepção e produção dos agregados graúdos e miúdos destinados à produção de concretos. A granulometria dos agregados utilizados no concreto foi apurada pelo ensaio de peneiramento de acordo com a norma NBR 7215:1997 e resultou nas seguintes curvas granulométricas (Figura 3.1)

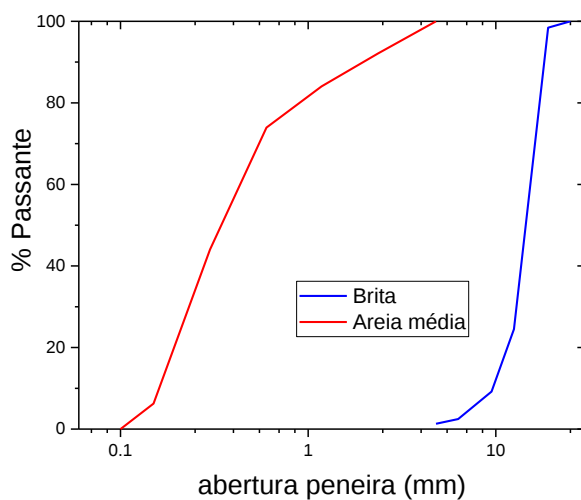


Figura 3.1: Curvas granulométricas dos agregados utilizados.

O traço para o desenvolvimento do concreto foi definido a partir dos resultados obtidos nos testes realizados e da literatura disponível. O método adotado para a determinação do traço de concreto a ser usado na pesquisa foi o ABCP, criado pela Associação Brasileira de Cimento Portland.

Para determinar as propriedades do cimento, foram realizados ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de 50 x 100mm feitos de uma pasta de água e cimento na proporção de 0,48, ensaio realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7215:1997. (Figura 3.2)



Figura 3.2 – Corpos de prova de pasta água cimento após a concretagem (a), corpos de prova fora dos moldes (b), corpos de prova rompidos (c).

O concreto foi desenvolvido a partir do traço 1 : 1,62 : 2,11 : 0,46. As proporções foram definidas para 6 amostras cilíndricas de 100 x 200mm, com 4,27 Kg de cimento, 6,93 Kg de areia, 9 Kg de brita, 2L de água, cujo volume estimado de concreto é 9,43L.

Os corpos de prova (CPs) foram desmoldados 24h após a moldagem, e foram colocados em uma câmara úmida controlada, por 28 dias para o processo de cura. Os CPs foram retificados, como mostra a figura 3.3 (a), e em seguida rompidos usando a máquina de ensaios universal Instron estrutura 1000HDX, figura 3.3 (b). A velocidade de carregamento para os ensaios foi 0,005 mm/s.



Figura 3.3 – CP na retífica (a), CP no ensaio de compressão (b), CPs após os ensaios (c).
Fonte: Autor.

Resistência da matriz

A resistência à compressão da matriz foi determinada seguindo o processo recomendado pela norma brasileira ABNT NBR 5739 (2018), no qual foi utilizado



corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm. 6 corpos de prova foram ensaiados (Tabela 1). Esse ensaio caracteriza as propriedades do concreto que foi usado para produzir a matriz em que os ensaios de arrancamento foram realizados.

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO		
CORPO DE PROVA	CARGA MÁXIMA (N)	ESFORÇO COMPRESSIVO MÁXIMO EM CARGA (Mpa)
1	227885,02	28,44
2	224040,47	27,96
3	207708,80	25,93
4	240969,97	30,08
5	232962,70	29,08
6	208125,98	25,98
DESVIO PADRÃO	13415,70	1,67
MÁXIMO	240969,97	30,08
MÉDIA	223615,49	27,91
MÍNIMO	207708,80	25,93

Tabela 1 – Dados obtidos nos ensaios de compressão. Fonte: Autor

O comportamento da fibra, sua resistência e deslizamento foram estudados experimentalmente através de ensaios de arrancamento de fibras imersas em corpos de prova prismáticos. (fibras de aço DRAMIX 3D 45/30 BL, com comprimento de 30 mm, diâmetro de 0,62 mm e resistência nominal de 1270 N/mm².)

Os prismas foram produzidos a partir de formas de madeira com dimensões internas 150mm x 150mm x 600mm. A placa usada para a fixação das fibras possuía uma espessura de 20mm e 22 furos alinhados e espaçados a cada 50mm (Figura 3.4).

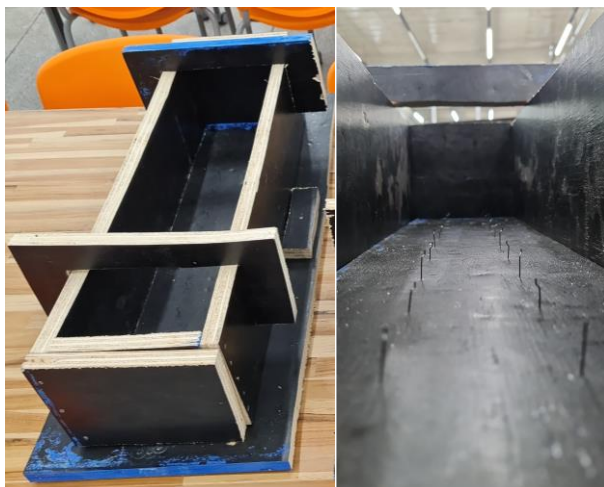


Figura 3.4 – Fôrma de madeira e fibras posicionadas na tábua de fundo. Fonte: Autor.

As fibras utilizadas no estudo foram fabricadas a partir das fibras DRAMIX 3D 45/30 BL, que possui comprimento de 30 mm, diâmetro de 0,62 mm e resistência nominal de 1270 N/mm². O gancho de uma das extremidades da fibra foi cortado (Figura 3.5) e inserido na placa de fundo, com comprimento de embutimento de 20mm. O concreto foi lançado nas formas de forma contínua e foram apilados para garantir a homogeneização do molde (Figura 3.6).

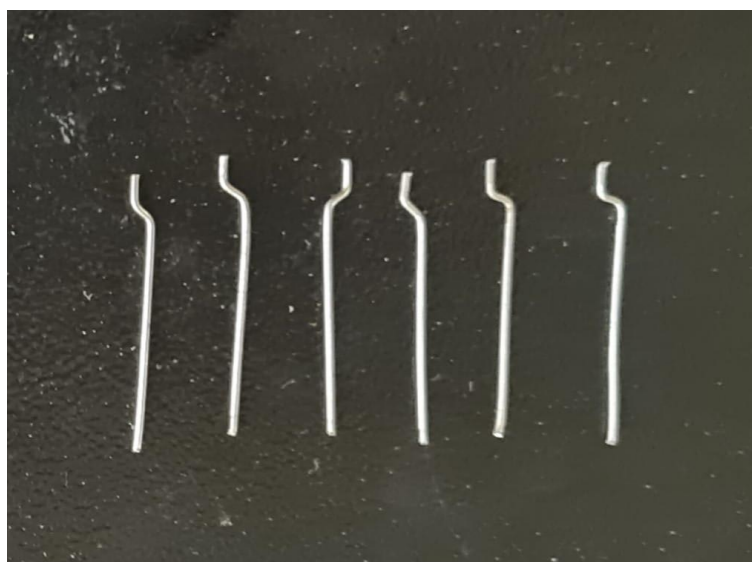


Figura 3.5 – Firas DRAMIX 3D com um dos ganchos cortados. Fonte: Autor

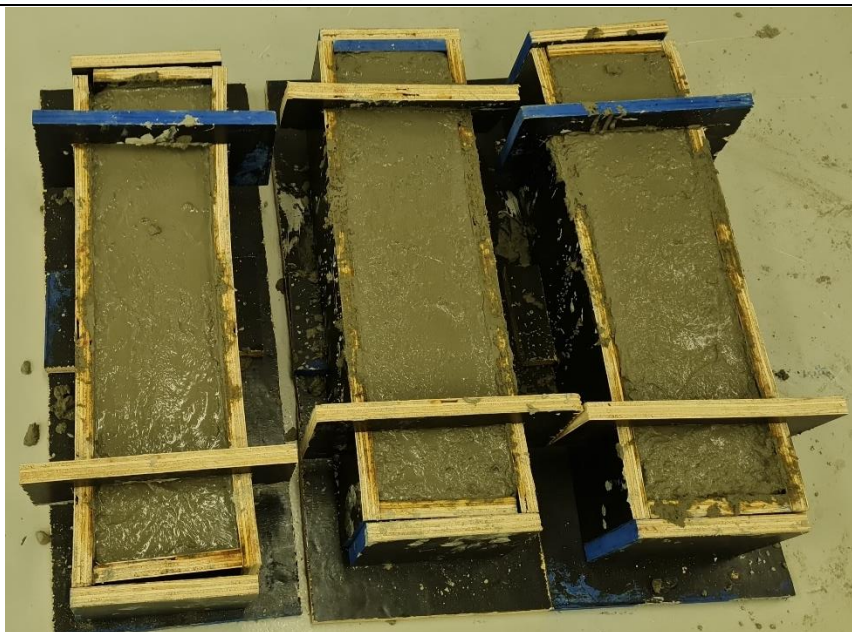


Figura 3.6 – Fôrmas de madeira concretadas. Fonte: Autor

Os prismas e corpos de provas para ensaio e verificação das propriedades foram desmoldados após 24 horas da concretagem, cobertos com filme plástico e curados por vinte e oito dias em uma câmara úmida controlada (Figura 3.7).



Figura 3.7 – CPs e prismas de concretos desmoldados. Fonte: Autor

A máquina de arrancamento portátil desenvolvida por Krah (2020) foi usada para o ensaio. A máquina de arrancamento encontra-se equipada com uma célula de carga de 500N e velocidade controlada de deslocamento da garra de 0,05mm/s (Figura 3.8).

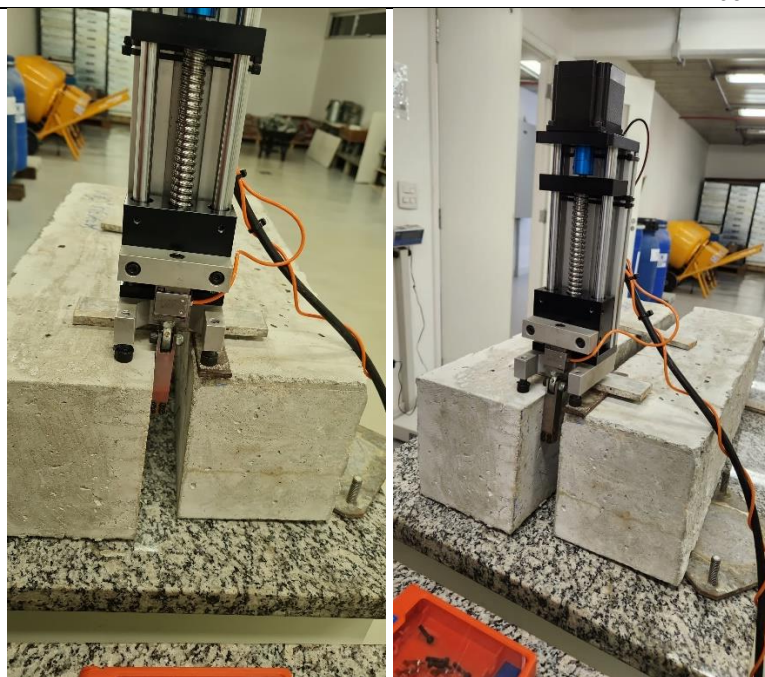


Figura 3.8 – Máquina de arrancamento com gancho (Krahl 2020) realizando ensaio de arrancamento de fibras metálicas em modo II. Fonte: Autor.

O comportamento da fibra, sua resistência e deslizamento foram estudados experimentalmente através de ensaios de arrancamento de fibras imersas em corpos de prova prismáticos.

A garra da máquina é fixada na extremidade da fibra que ficou por fora da concretagem. Quando o processo de arranque é iniciado, a célula de carga detecta o esforço e o deslocamento aplicado e envia esses dados por meio de um sistema de aquisição a um software instalado no computador, que converte em um gráfico automaticamente (Figura 3.9).

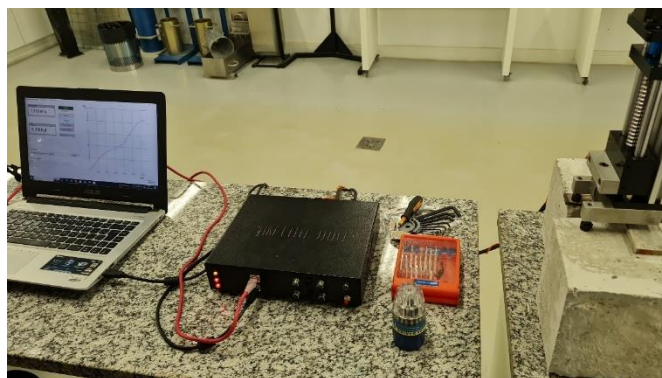


Figura 3.9 – Aparato de ensaio completo (Krahl 2020), com a máquina de arrancamento, sistema de aquisição de dados, e software instalado no computador. Fonte: Autor.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar o comportamento de tensão aplicada e o deslizamento das fibras de aço na matriz de concreto por meio do ensaio de arrancamento em modo II.

Foram feitos 10 ensaios de arrancamento, e a figura 4.2 mostra o gráfico de força (N) X deslizamento (mm), mostrando o comportamento das fibras arrancadas nos ensaios de tipo II, ressaltando a curva média em vermelho (Figura 4.2).

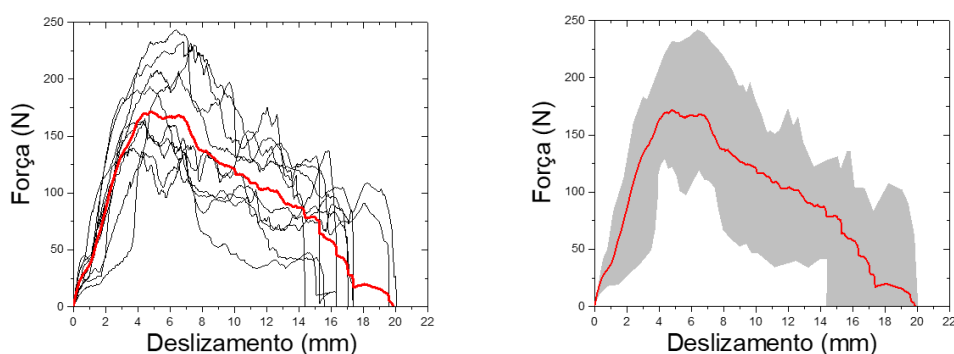


Figura 4.2 – Resultados dos ensaios de arrancamento em modo II. Fonte: Autor

De acordo com os resultados obtidos por Krahll (2020), o ensaio de pino (modo II) apresenta uma maior carga e capacidade de dissipação de energia em comparação com o ensaio alinhado (modo I).

A figura 4.3 mostra as 10 fibras completamente arrancadas da matriz de concreto



Figura 4.3 - Fibras de aço após o ensaio de arrancamento em modo II. Fonte: Autor.

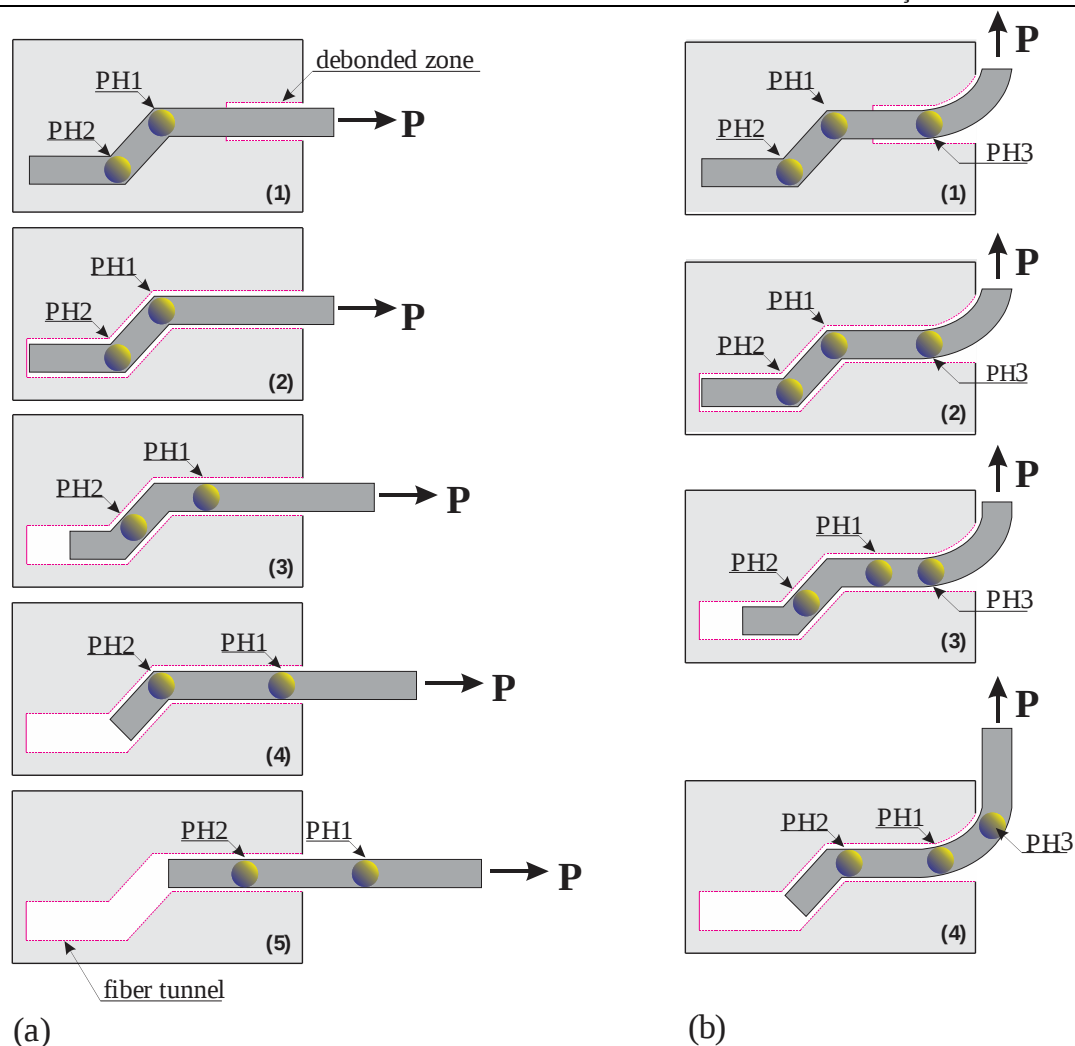


Figura 4.4 - Comportamento das fibras no teste de modo I (a), e em modo II (b). Fonte: Krah1 2020.

O comportamento inicial linear da curva ocorre devido ao grande atrito com a matriz de concreto, nesse momento, a fibra é submetida a uma força de cisalhamento direta e suporta a maior quantidade de carga, caracterizando o ponto máximo da curva. Nesse estágio inicial do arrancamento ocorre uma abrasão no concreto no final da saída da fibra. Após esse pico, a fibra percorre o túnel de concreto com uma resistência ao atrito mais reduzida, e isso caracteriza a queda da tensão no gráfico. Ao passo em que a fibra é arrancada, as dobras que caracterizam a fibra, vão se alinhando e gerando novos pontos de recuperação de força no gráfico.

O desvio padrão da carga máxima obtido nos ensaios foi de 36,77N, o que corresponde a um coeficiente de variação de 19%. De acordo com Krah1 (2020), os ensaios de arrancamento em modo II apresentam resultados de CV entre 20% e 55%, comprovando assim a eficiência do método.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo da pesquisa foi realizar ensaios de arrancamento de fibras metálicas com gancho em modo II a partir de matrizes de concreto. Os resultados foram obtidos com êxito e com um alto valor estatístico.

O concreto com fibras é uma solução para grandes problemas na engenharia de estruturas, e o estudo dessas fibras garante um melhor entendimento do comportamento desse material quando está submetido a solicitações reais de uma estrutura.

As pesquisas envolvendo esse comportamento de pino das fibras de aço, possibilitam a criação de projetos mais eficientes que utilizam desse material em diversos elementos estruturais.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16940 (2021), Concreto reforçado com fibras - determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - método de ensaio

ABNT NBR 5739 (2018), Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

ABNT NBR 7211 (2005), Agregado para concreto – Especificação.

Carmem Couto Ribeiro, Materiais de Construção, 3^a Edição.

G.G. Lee, Direct shear behaviour of steel fibres in a cementitious matrix, 2007.

H. Wu, V.C. Li, Snubbing and Bundling Effects on Multiple Crack Spacing of Discontinuous Random Fiber-Reinforced Brittle Matrix Composites, J. Am. Ceram. Soc. 75 (1992) 3487–3489.

KRAHL et al (2020) A novel approach to characterize the direct shear pullout behavior of single hooked steel fibers .

L.A. Falcão Bauer, Materiais de Construção, Volume 1, 6^a Edição.

T. Soetens, S. Matthys, A semi-analytical model to simulate the direct shear pull-out behaviour of hooked-end steel fibres, in: Guimaraes, Port. Pap. Present. BEFIB2012, 2012: pp. 19–21.

Contatos: marcus.canteri1712@gmail.com e pablo.krahl@mackenzie.br