

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PEDRO HENRIQUE VALIM BANDEIRA

**CARACTERIZAÇÃO À TRAÇÃO DE BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADOS COM
FIBRA DE VIDRO (GFRP)**

**Alegrete
2023**

PEDRO HENRIQUE VALIM BANDEIRA

**CARACTERIZAÇÃO À TRAÇÃO DE BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADOS COM
FIBRA DE VIDRO (GFRP)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Alisson Milani

**Alegrete
2023**

PEDRO HENRIQUE VALIM BANDEIRA

**CARACTERIZAÇÃO À TRACÇÃO DE BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADOS
COM FIBRA DE VIDRO (GFRP)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS – UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 22:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/02/2023, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1047506** e o código CRC **E669EFDC**.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer aos meus pais, Laercio e Ana Claudia, e à minha irmã, Marina, pelo imenso apoio, incentivo e por proporcionar a grande oportunidade de estudar fora da minha cidade natal.

Ao meu orientador, professor Dr. Alisson Milani, pela orientação, por ter sugerido o tema e ajudado na realização e concretização deste trabalho.

À UNIPAMPA e aos demais professores, por proporcionarem esta possibilidade de cursar Engenharia Civil e por sua contribuição na minha formação.

Aos técnicos responsáveis pelo Laboratório de Engenharia Civil, em especial ao Marcelo, que dispuseram tempo para auxiliar na execução deste trabalho.

Ao Osvaldo pela grande ajuda prestada na realização deste trabalho.

Aos amigos que fizeram parte dessa jornada acadêmica e sempre se fizeram presente nos momentos de descontração.

Às demais pessoas que estiveram presente na minha vida e contribuíram de alguma forma para que eu pudesse atingir meus objetivos.

RESUMO

A constante busca por inovações dentro do setor da construção civil parte muitas vezes do princípio de solucionar problemas ou incrementar os métodos construtivos já existentes, de forma que eles sejam capazes de atender as suas solicitações em plenitude. No caso do concreto armado, por exemplo, há a grande preocupação do seu uso em meios agressivos, por conta da durabilidade. Nesse aspecto, surgem as barras de polímero reforçadas com fibra (FRP) que são uma alternativa em substituição ao aço para estes casos. Porém, sua aplicação exige maiores estudos com relação às suas propriedades, entre elas a resistência à tração que é um importante parâmetro de projeto. Nesse sentido, este trabalho buscou realizar ensaios à tração, com base na norma ASTM D7205 (2011), de barras poliméricas de fibra de vidro (GFRP) de três diâmetros diferentes (8, 10 e 12mm) de um mesmo fabricante, visando encontrar a tensão de ruptura, o módulo de elasticidade e a deformação última. As barras e as ancoragens foram preparadas conforme a norma supracitada. Após os ensaios serem realizados e as propriedades determinadas, concluiu-se que as barras de 8 e 10mm apresentaram comportamentos condizentes ao esperado pela literatura, mas as barras de 12mm não tiveram resultados tão comprobatórios em comparação às demais, por conta de ter acontecido o escorregamento de três dos corpos de prova. Entre os diâmetros, as maiores resistências à tração foram atingidas pelas barras de: 8, 12 e 10mm respectivamente. Entretanto, verificou-se que o diâmetro não foi um fator determinante nos resultados finais de resistência deste trabalho entre os diâmetros ensaiados.

Palavras-Chave: barras de FRP; ensaio de tração; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The constant search for innovations within the construction sector often comes from the principle of solving problems or increasing existing constructive methods, so that they are able to fully fulfill their requests. In the case of reinforced concrete, for example, there is a great concern of its use in aggressive means, mainly due to durability. In this respect, fiber reinforced polymer bars (FRP) arise as an alternative to replace steel for these cases. However, its application requires greater studies regarding its properties, including tensile resistance which is an important project parameter. In this sense, this work sought to perform tensile tests, based on ASTM D7205 (2011), with polymeric fiberglass bars (GFRP) of three different diameters (8, 10 and 12mm) of the same manufacturer, aiming to determine ultimate tension, modulus of elasticity and ultimate strain. The bars and anchors were prepared according to the above standard. After the tests were performed and the properties determined, it was concluded that the 8 and 10mm bars had consistent behaviors and matched with the literature, but the 12mm bars did not have such satisfactory results compared to the others, breaking three test subsections with tensions inferior to the minimums. Among the diameters, the highest tensile strengths were achieved by the bars of: 8, 10 and 12mm, respectively. However, it was assumed that the diameter was not a determining factor in the final results of strength of this work between the tested diameters.

Keywords: FRP bars; tensile tests; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reforço no viaduto em Minas Gerais utilizando FRP	13
Figura 2 - Relação tensão-deformação idealizada para barras de FRP	14
Figura 3 - Esquema de comprimentos livre (L) e de ancoragem (La)	17
Figura 4 - Modo de ruptura das barras de fibra de vidro de Kocaoz <i>et. al</i> (2005)	18
Figura 5 - Gráfico de tensão (ksi) em relação ao número de testes de Kocaoz <i>et. al</i> (2005)	19
Figura 6 - Modo de ruptura das barras ensaiadas por Wiater e Siwowski (2020)	21
Figura 7 - Procedimento Experimental para Determinação do Diâmetro Nominal	23
Figura 8 – Sistema de fixação do corpo de provas	24
Figura 9 - Procedimento Experimental para a Determinação da Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade e Deformação Última	27
Figura 10 - Mecanismo de Ancoragem	28
Figura 11 - Adesivo epóxi <i>compound</i>	29
Figura 12 - Barra com bucha nas extremidades	29
Figura 13 - Estrutura para moldagem da ancoragem nos corpos de prova	30
Figura 14 - Barra teórica ancorada presa às garras da máquina universal	30
Figura 15 - Barra ancorada e com <i>clip gauge</i> presa à máquina de ensaio	31
Figura 16 - Gráfico Tensão <i>versus</i> Deformação das Barras de Diâmetro 8 mm	35
Figura 17 - Ruptura do Corpo de Prova de diâmetro de 8 mm	36
Figura 18 - Gráfico Tensão <i>versus</i> Deformação das Barras de Diâmetro 10 mm	38
Figura 19 - Ruptura do corpo de prova de diâmetro de 10 mm	39
Figura 20 - Gráfico Tensão <i>versus</i> Deformação das Barras de Diâmetro 12 mm	41
Figura 21 - Ruptura do CP5 de diâmetro de 12 mm	42
Figura 22 - Gráfico de tensões de tração média, mínima e máxima dos três diâmetros ensaiados	43
Figura 23 - Gráfico tensão <i>versus</i> deformação de comparação entre os resultados médios dos diâmetros 8, 10 e 12 mm	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos e de referência para barras de FRP comumente utilizadas	15
Tabela 2 - Barras utilizadas por Arczewska <i>et. al</i> (2016)	16
Tabela 3 - Valores para o mecanismo de ancoragem a ser adotado de acordo com o diâmetro do corpo de prova para barras de GFRP	17
Tabela 4 - Tipos de barras ensaiadas por Wiater e Siwowski (2020).....	20
Tabela 5 - Diferença entre as normas do estudo de Wiater e Siwowski (2020) na obtenção das propriedades mecânicas de barras de FRP.....	21
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração de Wiater e Siwowski (2020)	22
Tabela 7 - Resultados do diâmetro nominal para as barras de 8, 10 e 12mm	26
Tabela 8 - Dimensões recomendadas para os tubos de aço de acordo com o diâmetro do corpo de prova e pelo CT 303 (2021).....	28
Tabela 9 - Previsão de ruptura com base nos valores mínimos.....	32
Tabela 10 - Análise da Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura das barras com diâmetro de 8 mm	34
Tabela 11 - Comparação dos Dados de Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura do fabricante B e de diâmetro de 8 mm do estudo de Wiater e Siwowski (2020) aos desta pesquisa	36
Tabela 12 - Análise da Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura das barras com diâmetro de 10 mm	37
Tabela 13 - Comparação dos Dados de Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura do fabricante B e diâmetro de 10 mm do estudo de Wiater e Siwowski (2020) aos desta pesquisa	39
Tabela 14 - Análise da Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura das barras com diâmetro de 12 mm	40
Tabela 15 - Resumo dos ensaios nas barras de diâmetros 8, 10 e 12 mm	43
Tabela 16 - Valores de “p” obtidos pelo teste de Tukey entre as resistências das barras	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos.....	11
1.1.1	Objetivo geral	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	11
1.1.3	Justificativa.....	11
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Barras de Fibras reforçadas em matrizes poliméricas.....	12
2.2	Propriedades mecânicas e comportamento à tração	13
3	METODOLOGIA	23
3.1	Determinação do Diâmetro Nominal.....	23
3.2	Ensaio de Tração	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Barras de Diâmetro de 8 mm.....	34
4.2	Barras de Diâmetro de 10 mm.....	37
4.3	Barras de Diâmetro de 12 mm.....	40
4.4	Comparação entre diâmetros	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.1	Sugestão para trabalhos futuros.....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado se tornaram um método construtivo habitual por conta da praticidade e robustez no processo construtivo. Com o desenvolvimento urbano e da infraestrutura, cada vez mais essas construções exigem maiores manutenções e sugerem à comunidade que é tempo de explorar materiais e métodos fora do tradicional. (WEIBULL, 2020).

Essa questão da durabilidade das estruturas em concreto armado é uma grande preocupação, principalmente no que tange a durabilidade do aço à corrosão. Nesse aspecto, um material que surge em alternativa ao aço são as barras de FRP, fibras reforçadas em matrizes poliméricas. Além de serem capazes de atuar em meios agressivos, estes materiais compósitos também possuem um bom comportamento à fadiga, uma grande relação resistência-peso e uma considerável resistência à tração. (TAVARES, 2008).

Em especial, as barras de polímeros reforçadas com fibras de vidro (GFRP) têm se mostrado promissoras com relação a substituição ao aço, principalmente por serem projetadas para resistir à esforços primordialmente de tração. Nesse sentido, é de suma importância o entendimento das propriedades mecânicas desse material e a padronização de ensaios de tração, que são responsáveis por informar a resistência à tração e o módulo de elasticidade, de tal modo que possam viabilizar essa solução no mercado. (ARCKZEWSKA *et. al*, 2020).

Dessa forma, esta pesquisa pretende estudar as características à tração de um lote de barras de fibras de vidro reforçadas em matrizes poliméricas através de um ensaio de tração prescrito pela ASTM D7205 (2011), realizando comparações entre os resultados para diferentes diâmetros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência à tração em um lote de barras de polímeros reforçado com fibras de vidro.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a deformação última de um pequeno lote de barras de GFRP, verificando se os valores atendem aos mínimos especificados em norma;
- Comparar os resultados entre diâmetros e verificar se existe influência no aumento do diâmetro nos resultados de resistência à tração.

1.1.3 Justificativa

A alternativa do uso de GFRP em substituição ao aço oferece um menor custo e maior durabilidade (WORNER, 2015). Em contrapartida, um grande impedimento do uso universal das barras de polímeros são as suas características anisotrópicas e seu comportamento não homogêneo (BLAZNOV *et al*, 2017). Por isso, verifica-se a necessidade de entender melhor este tipo de comportamento e avaliar as condições das barras disponíveis no mercado.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Barras de Fibras reforçadas em matrizes poliméricas

Materiais compósitos surgem a partir da combinação de um ou mais materiais. O material resultante preserva as características originais de seus componentes sem misturá-los ou dissolvê-los. Levando em conta essa propriedade estrutural, os materiais compósitos podem ser definidos como materiais que têm um componente reforçado (fibra ou partícula) imerso em uma matriz de resina, que serve para proteger as fibras e efetuar a transferência de cargas da superfície da barra para o interior e para as fibras. Dessa forma, combinando diferentes tipos de matrizes e componentes, é possível criar vários materiais compósitos com diversas propriedades mecânicas e para distintas aplicações. (PEÑA, 2010).

Dentre esta grande quantia de combinações de materiais, está o FRP (*fiber reinforced polymer*), as fibras reforçadas em matrizes poliméricas. Em geral, as barras de armação em FRP são fabricadas pelo processo de pultrusão. Nesse processo, as fibras contínuas são embebidas com resina e puxadas através de um molde aquecido para produzir a forma da seção transversal desejada. Após a barra passar pelo molde, diferentes processos são usados para impor uma deformação à superfície da barra, garantindo uma maior aderência como armadura para concreto. Após o processo de moldagem e execução da superfície final da barra, deixa-se a resina polimerizar. (CASTRO, 1997).

De acordo com a ACI 440.1R-15, este tipo de compósito surge inicialmente para aplicações na indústria aeroespacial no período da Segunda Guerra Mundial e somente em 1960 desperta o interesse de aplicação na construção civil. Seus primeiros usos foram limitados ao reforço de estruturas. No Brasil, por exemplo, a primeira aplicação foi destinada a reforçar um viaduto em Minas Gerais, como ilustrado na Figura 1 (MACHADO, 2007).

Figura 1 - Reforço no viaduto em Minas Gerais utilizando FRP



Fonte: MACHADO (2007)

Ao longo dos anos, porém, verificou-se a possibilidade de usar as barras de fibras como alternativas ao aço utilizado no concreto armado. O FRP em comparação ao aço: possui menor peso específico; é impermeável aos íons cloreto e ataques químicos; não necessita aditivos para combater a corrosão; permite menor camada de revestimento; apresenta maiores tensões de tração. (MACHADO, 2007).

Essas vantagens em comparação ao aço tornam o material um atrativo para a pesquisa, principalmente no cenário brasileiro onde o tema ainda é algo novo. Os estudos de Mazzú (2020), Weibull et. al (2020), Dalfré e Mazzú (2020) e Cabrera (2021) são alguns exemplos de pesquisas sendo desenvolvidas no Brasil nos últimos anos com relação ao uso das barras de FRP em substituição ao aço e ao método de dimensionamento.

Nesse aspecto, um fator importante para projetos é a resistência à tração. Graças a anisotropia das barras de FRP, este é um tema que exige grande atenção.

2.2 Propriedades mecânicas e comportamento à tração

De acordo com Wu (1990), as características mecânicas das barras são influenciadas pelas propriedades e pela fração de volume das fibras e da resina. Como a resina tem uma resistência muito menor do que as fibras, a razão entre o volume da fibra e o volume total do FRP (fração de volume da fibra) afeta significativamente as propriedades de tração de uma barra de FRP.

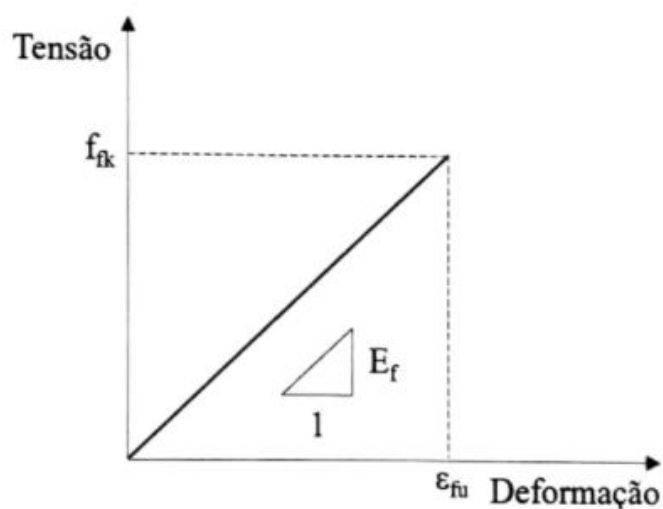
Esta característica, em comparação ao aço, faz com que a resistência à tração unitária de uma barra de FRP possa variar com o diâmetro. Por exemplo, barras de GFRP de três fabricantes diferentes apresentam reduções de resistência à tração de até 40% à medida que o diâmetro aumenta proporcionalmente de 0,375 a 0,875 pol. (9,5 a 22,2 mm). (FAZA E GANGARAO, 1993b).

Benmokrane *et. al* (1995) constatam que este efeito ocorre devido ao *shear lag*. As fibras localizadas mais ao centro da seção transversal não sofrem tanta tensão quanto às localizadas próximas à superfície externa da barra. Dessa forma, quanto maior for o diâmetro, menor será a resistência a tração daquela barra.

Além disso, Wu (1990) cita que graças à essa variação de fração volumétrica, haverá também variação de resistência e rigidez em barras de mesmo diâmetro. De maneira similar, a taxa de cura, o processo de fabricação e o controle de qualidade também afetam as características mecânicas da barra.

Quando carregadas à tração, as barras de FRP não apresentam comportamento plástico antes da ruptura, mas sim uma relação tensão-deformação linearmente elástica (NANNI *et. al*, 2014), como ilustrado idealmente na Figura 2. As propriedades mínimas de algumas barras de FRP comumente usadas estão resumidas na Tabela 1:

Figura 2 - Relação tensão-deformação idealizada para barras de FRP



Fonte: CT 303 (2021)

Tabela 1 - Valores mínimos e de referência para barras de FRP comumente utilizadas

Material	Propriedade	Valor de Referência
AFRP	E (GPa)	70
	fk (MPa)	1400
	ϵ (‰)	20,0
BFRP	E (GPa)	50
	fk (MPa)	800
	ϵ (‰)	16,0
CFRP	E (GPa)	130
	fk (MPa)	1400
	ϵ (‰)	10,7
GFRP	E (GPa)	50
	fk (MPa)	800
	ϵ (‰)	16,0

Fonte: Adaptado de CT 303 (2021)

Fora isso, a própria realização do ensaio é um desafio devido a concentração de tensões nos pontos de ancoragem e ao redor do corpo de prova, que podem levar ao rompimento precoce da barra. Por isso, ao se realizar os testes, a barra deve ser ajustada de forma que a ruptura ocorra no meio do corpo de prova. Ademais, deve ser realizada uma ancoragem especial de comprimento específico, de acordo com o diâmetro, nas extremidades da barra, evitando que a garra da máquina danifique a amostra (ACI 440, 2015).

Este comportamento à tração ainda possui algumas lacunas com relação à influência direta das propriedades físicas da barra com os seus resultados mecânicos. Além disso, há também a busca por otimizações no próprio ensaio.

Os primeiros estudos para desenvolver uma metodologia de ensaio de tração datam do início dos anos 90, com os trabalhos de Erki e Rizkalla (1993) e Nanni *et. al* (1996), que testavam diferentes métodos de ancoragem disponíveis na época. Alguns anos depois, Tripathi (2003) trouxe algumas melhorias utilizando como referência a *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials* da Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997. A prática adotada por Tripathi (2003) é a mesma até hoje, onde as ancoragens são realizadas com

tubos de aço *schedule* 40 ou 80, preenchidos com resina ou material similar para centralizar o corpo de prova.

A preocupação com o método de realização do ensaio é algo recorrente entre os autores. Castro (1997), por exemplo, sugeriu em seu estudo um método para obter o módulo de elasticidade de barras de GFRP de maneira não destrutiva. A alternativa sugerida pelo autor foi de medir o módulo de elasticidade dinâmico usando métodos de propagação de onda: o pulso ultrassônico e a frequência de ressonância. Os resultados dos testes mostraram que é possível obter módulo de elasticidade estático, medido através do próprio ensaio de tração, através do dinâmico, surgindo assim como uma alternativa para as linhas de fabricação no controle de produção.

Arczewska *et. al* (2016) também avaliaram a praticidade do ensaio de tração, por meio de um artigo que avaliava as propriedades e a qualidade de barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro, através de ensaios mecânicos e testes de controle de qualidade. As barras utilizadas no estudo foram cedidas por duas empresas e caracterizavam-se conforme a Tabela 2.

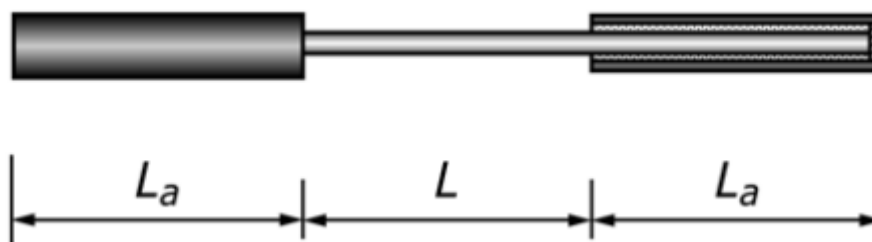
Tabela 2 - Barras utilizadas por Arczewska *et. al* (2016)

Propriedades	Companhia I		Companhia II		Unidades
	#4	#5	M12	M16	
Diâmetro Nominal	12,7	15,875	12	16	mm
Área da Seção Transversal	126,7	197,9	113	201	mm ²
Deformação	2	1,89	2,61	2,61	%
Resistência à Tração	1312	1184	1000	1000	MPa
Módulo de Elasticidade	65,6	62,6	60	60	Gpa
Fibra de vidro por conteúdo	83	83	>85	>85	%

Fonte: Adaptado de Arczewska *et. al* (2016)

Para realizar o ensaio de tração, os autores seguiram as recomendações da norma ASTM D7205 (2011), que sugere um comprimento mínimo de ancoragem (L_a), um comprimento mínimo livre da barra (L) e um diâmetro mínimo do tubo externo, de acordo com o diâmetro do corpo de prova a ser ensaiado. São ilustrados os comprimentos em questão na Figura 3 e, na Tabela 3, os valores que devem ser adotados de acordo com o diâmetro da barra a ser ensaiada.

Figura 3 - Esquema de comprimentos livre (L) e de ancoragem (L_a)



Fonte: ASTM D7205 (2011)

Tabela 3 - Valores para o mecanismo de ancoragem a ser adotado de acordo com o diâmetro do corpo de prova para barras de GFRP

Diâmetro do corpo de prova (mm)	Comprimento livre (L) (cm)	Comprimento de ancoragem (La) (cm)	Diâmetro do tubo externo (mm)
6,4	25,6	30,0	35,0
9,5	47,5	30,0	35,0
13,0	65,0	38,0	42,0
16,0	80,0	46,0	42,0
19,0	95,0	46,0	48,0
22,0	110,0	46,0	48,0
25,0	125,0	46,0	48,0
29,0	145,0	46,0	48,0
32,0	160,0	80,0	75,0

Nota 1: As paredes do tubo devem conter no mínimo 4,8mm

Nota 2: Recomenda-se uma distância mínima de 4mm entre a barra e a parede do tubo

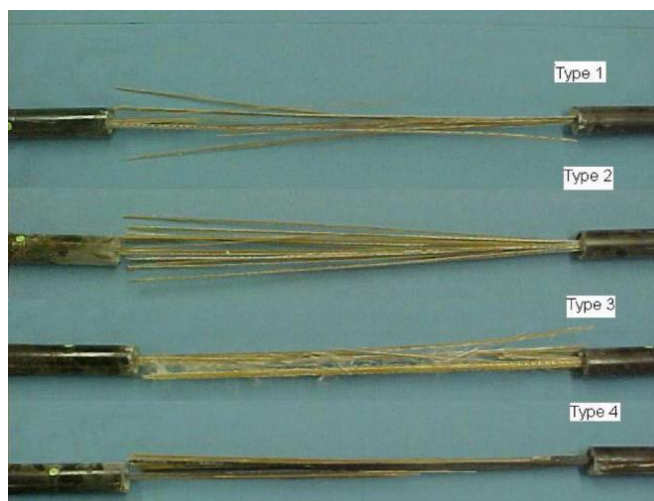
Fonte: Adaptado de ASTM D7205 (2011)

Entretanto, ao realizar o teste, houve descolamento das barras da empresa I do mecanismo de ancoragem. Conforme ilustrado na Tabela 2, as barras possuíam diâmetro próximos de 13 e 16mm, assim — de acordo com a Tabela 3 — se recomendaria utilizar 38cm para o comprimento de ancoragem. Arczewska *et. al* (2016) tentaram então aumentar o comprimento em diversas tentativas, até o limite disponível pelo tamanho da própria barra, porém não houve sucesso. Maiores investigações os levaram a descobrir que as barras do tipo #5 precisavam de uma ancoragem mínima de 63cm, enquanto as do tipo #4 precisavam de 51cm (ancoragens adotadas pela empresa). Este fato contribuiu para a conclusão dos autores de que o teste de tração não é tão prático para um

procedimento de rotina, por requerir amostras de grandes comprimentos. Por outro lado, os resultados obtidos a partir desse teste são essenciais para garantir a qualificação do produto. E, devido a falha nos testes da companhia I, os resultados do comportamento à tração não puderam ser avaliados.

Kocaoz *et. al* (2005) realizaram uma pesquisa para compreender o comportamento à tração de barras de polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) e também validar estatisticamente uma distribuição normal na avaliação do lote de barras de GFRP. No total, foram ensaiadas 32 barras de 12,5mm de diâmetro, sendo elas divididas em 4 grupos de diferentes tipos de revestimento, responsável por manter as barras protegidas de ataques alcalinos. Respectivamente, o tipo 1 possuía fibras de *E-glass* dentro de uma matriz de Poliuretano Termoplástico de Engenharia (EPTU); o tipo 2 fibras de carbono no EPTU; o tipo 3 era composto puramente por EPTU; o tipo 4 possuía wollastonita (CaSiO_3) no EPTU. Ao realizar o ensaio, os autores relatam que todas as amostras falharam de forma repentina, iniciando com fendilhamento até a ruptura da barra, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Modo de ruptura das barras de fibra de vidro de Kocaoz *et. al* (2005)

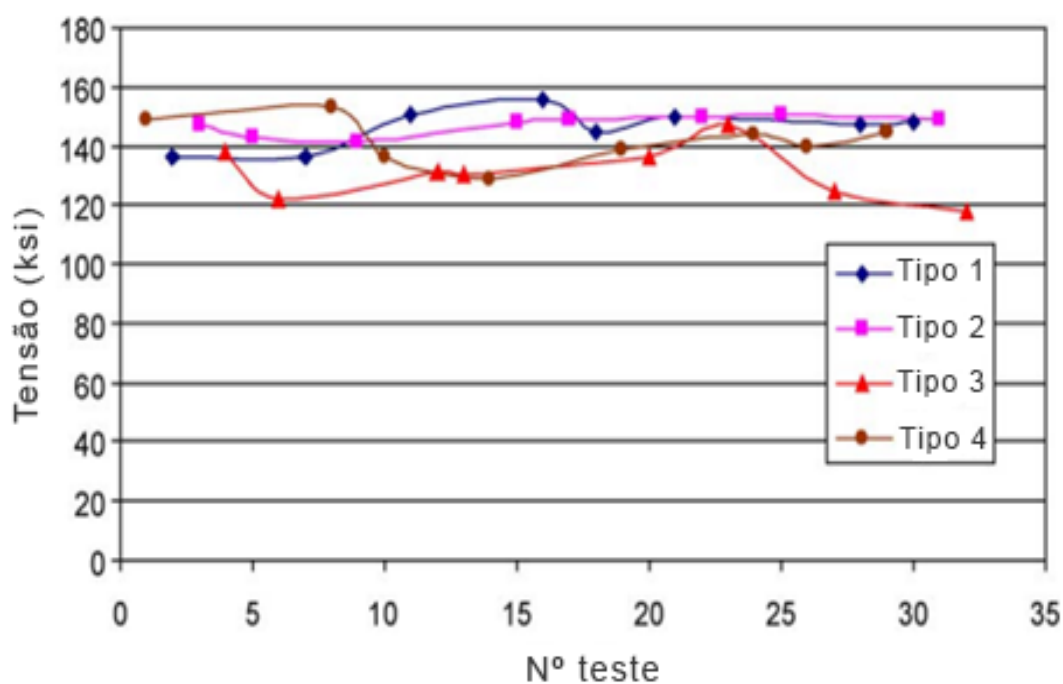


Fonte: Kocaoz *et. al* (2005)

Cada uma dividiu-se e separou-se em pedaços de diferentes tamanhos e quantidades, o que levantou a hipótese de o tipo de revestimento estar relacionado ao modo de ruptura. Esta sugestão foi confirmada com o resultado dos ensaios à tração, ilustrados na Figura 5, onde as barras do tipo 3

apresentaram valores de resistência destoantes e menores do que as demais. Por ser a única variável desse estudo em questão, os autores chegaram à conclusão de que há alguma relação entre a resistência à tração e o tipo de revestimento.

Figura 5 - Gráfico de tensão (ksi) em relação ao número de testes de Kocaoz *et. al* (2005)



Fonte: Adaptado de Kocaoz *et. al* (2005)

Wiater e Siwowski (2020) desenvolveram uma pesquisa para estudar a influência das propriedades físicas na resistência à tração e comparar os métodos de obtenção do diâmetro, da resistência à tração, do módulo elasticidade e da deformação de barras poliméricas de fibra de vidro de acordo com várias normas. Nesse estudo, os autores realizaram ensaios em barras de diferentes fabricantes com variação no diâmetro, na resina, na porcentagem de fibra e no tipo de revestimento, conforme observa-se na Tabela 4:

Tabela 4 - Tipos de barras ensaiadas por Wiater e Siwowski (2020)

Tipo	Resina	Porcentagem de fibra	Revestimento	Diâmetros (mm)
A	epóxi	77,5	espiral	8, 10, 12
B	epóxi	75	espiral	5, 6, 8, 11
C	viniléster	83	areia	12
D	viniléster	88	nervuras	12

Fonte: Wiater e Siwowski (2020)

As normas consideradas por Wiater e Siwowski (2020) foram: a estadunidense ASTM D7205/D7205M-06 (2016), a canadense CAN/CSA-S806 (2012), a italiana CNR-DT 203 (2006), a belga EN 17129 (2018), a russa GOST 31938 (2012), a suíça ISO 10406-1 (2015). Como um padrão, elas sugerem que a obtenção do diâmetro das barras seja feita através da diferença entre a pesagem do corpo seco e do corpo imerso em água, totalmente saturado. Apenas a norma belga difere-se das demais, recomendando que seja adotada a média de 6 medidas da seção transversal em diferentes posições. No estudo, os autores realizaram ambos os métodos de medidas sugeridos pelas normas. Além disso, para o ensaio, também levaram em conta que o revestimento presente nas barras não transmite as tensões de tração e, por isso, fez-se a consideração de dois diâmetros: o diâmetro efetivo (*effective diameter*), que engloba tanto a barra quanto o revestimento, e o diâmetro do núcleo (*core diameter*), que ignora a parte do revestimento.

Além da diferença entre a obtenção diâmetro, as normas estudadas pelos autores também se diferem no cálculo das propriedades mecânicas, como ilustra a Tabela 5:

Tabela 5 - Diferença entre as normas do estudo de Wiater e Siwowski (2020) na obtenção das propriedades mecânicas de barras de FRP

Norma	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade		Deformação última
		Ponto inicial	Ponto final	
ASTM D7205	$f_u = \frac{F_u}{A}$	Deformação de 0,001*	Deformação de 0,003*	Deformação no ponto onde há a tensão última ou $\varepsilon_u = \frac{f_u}{E} = \frac{F_u}{AE}$ **
CAN/CSA S806		25% da deformação última	50% da deformação última	
CNR-DT 203		25% da tensão última	50% da tensão última	
GOST 31938		20% da tensão última	50% da tensão última	
ISO 10406-1		Deformação de 0,001	Deformação de 0,005	
EN 17129		20% da tensão última	60% da tensão última	
JSCE-E 531				

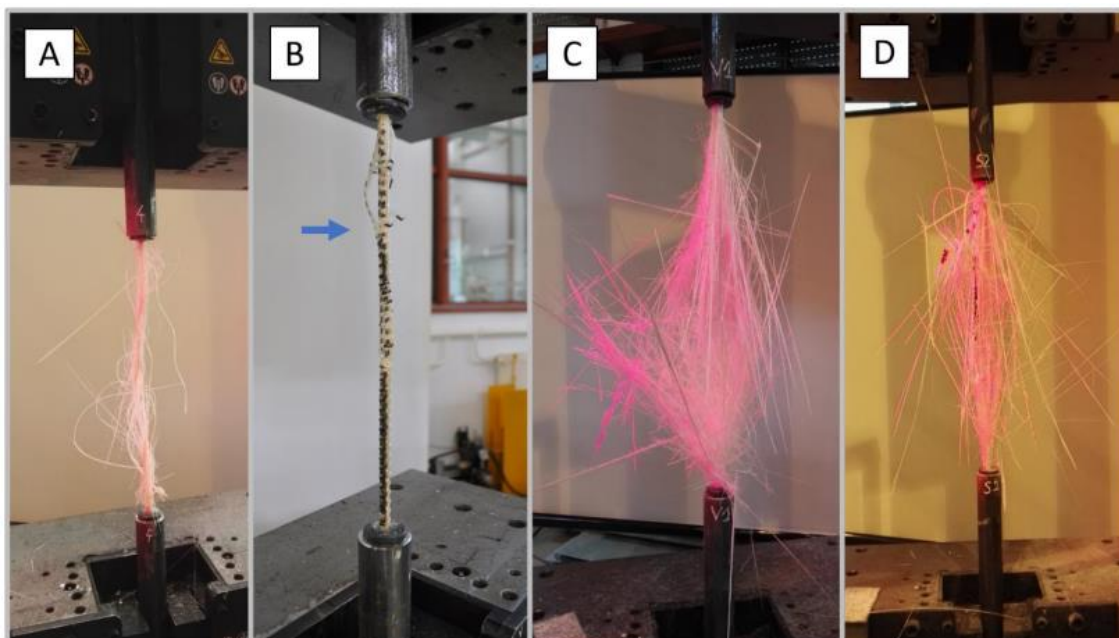
* para materiais que falhem com deformação abaixo de 0,006

** equação somente não aceita pela ASTM D7205 e GOST 31938

Fonte: Adaptado de Wiater e Siwowski (2020)

Realizando os ensaios, Wiater e Siwowski (2020) encontraram um padrão no modo de ruptura semelhante ao estudado por Kocaoz *et. al* (2005): começando com fendilhamento até a ruptura total da barra, separando-se em pedaços de quantidade e tamanhos diferentes, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Modo de ruptura das barras ensaiadas por Wiater e Siwowski (2020)



Fonte: Wiater e Siwowski (2020)

Os resultados dos ensaios levaram Wiater e Siwowski (2020) a várias conclusões com relação a influência das propriedades físicas e das

recomendações normativas nas características mecânicas das barras de GFRP. O fato de a norma belga utilizar um método diferente para determinar o diâmetro tem como consequência um pequeno aumento na resistência à tração, no módulo de elasticidade e na deformação última em comparação às medições utilizando as demais normas. Além disso, os autores também verificaram que a porcentagem de fibra é um fator importante, mas não totalmente determinante nas propriedades mecânicas. Na Tabela 6, são comparados os valores médios de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação última entre barras do mesmo diâmetro.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração de Wiater e Siwowski (2020)

Diâmetro (mm)	Fabricante	Resistência à tração (MPa)			Módulo de Elasticidade (GPa)			Deformação última (%)		
		Média	Desvio padrão	Variância	Média	Desvio padrão	Variância	Média	Desvio padrão	Variância
12	A	1243,11	44,93	3,61	56,69	3,86	6,83	2,20	0,10	4,44
	B	1136,30	60,71	5,34	52,40	0,94	1,79	2,17	0,09	4,04
	C	1415,99	33,13	2,34	65,57	0,95	1,44	2,16	0,03	1,52
	D	1227,41	35,13	2,86	57,52	1,66	2,89	2,14	0,11	5,30

Fonte: Wiater e Siwowski (2020)

As barras do fabricante B, que possuíam a menor porcentagem de fibra, apresentaram o menor valor de resistência, enquanto as do fabricante C, com a maior porcentagem, tiveram o melhor desempenho. Entretanto, comparando as barras dos fabricantes A e D, verifica-se que mesmo com valor menor de fibra, as do fabricante A ainda foram superiores na resistência à tração.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho visou caracterizar as propriedades mecânicas à tração, obtendo a resistência, o módulo de elasticidade e a deformação última, de barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro. Nesse processo de caracterização, foram realizadas comparações dos resultados dos ensaios mecânicos para cada diâmetro. Por fim, procurou-se compreender o que influencia no comportamento à tração dessas amostras a partir das análises dos resultados.

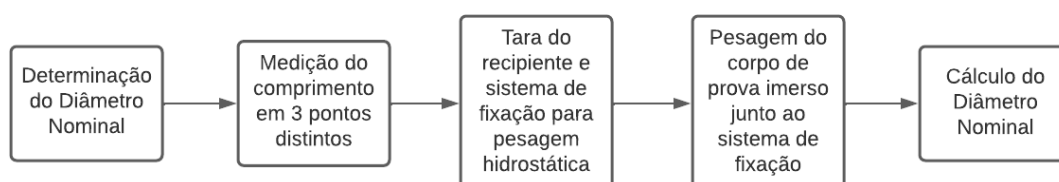
Os ensaios foram baseados na norma ASTM D7205 (2011) com algumas adaptações feitas para a determinação do módulo de elasticidade e realização da ancoragem, de acordo com a norma CAN/CSA S806 (2012) e com os Anexos A e B da Prática Recomendada para Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP) do CT 303 (2021). Estas mudanças serão descritas nos itens em questão.

As barras ensaiadas foram as de diâmetros 8, 10 e 12mm. Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

3.1 Determinação do Diâmetro Nominal

Para determinar o diâmetro nominal, seguiu-se o procedimento experimental que está ilustrado na Figura 7. A caracterização e o ensaio foram realizados conforme prescreve a norma ASTM D7205 (2011).

Figura 7 - Procedimento Experimental para Determinação do Diâmetro Nominal



Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, reservou-se uma parte de cada barra e montou-se 5 corpos de provas de aproximadamente 100mm para cada diâmetro, totalizando 15 corpos de prova. Com eles, realizou-se 3 medidas do comprimento das barras em pontos distintos, girando-as à uma angulação de 120° após cada medição. A partir do valor das três medições, fez-se a média do comprimento.

Após a medição, foi feita a pesagem ao ar de cada amostra, para então ser feita a pesagem hidrostática, realizando a tara do sistema composto pelo recipiente, preenchido com água destilada, e o mecanismo de fixação, imerso no receptáculo. Assim, imergiu-se o corpo de prova juntamente ao sistema de fixação, ilustrado na Figura 8, e realizou-se a leitura.

Figura 8 – Sistema de fixação do corpo de provas



Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, o volume de cada corpo de prova pôde ser medido de forma indireta pela diferença entre a massa no estado seco e totalmente saturado. O

volume do corpo de prova foi calculado como sendo a sua massa dividida pela sua densidade e a área nominal dividindo-se o volume pelo comprimento do corpo de prova. Sumariamente, o diâmetro nominal foi encontrado a partir da Equação 1.

$$d = \sqrt{\frac{4(m_1 - m_2)}{\pi \cdot \rho \cdot l}} \quad (1)$$

Onde:

m_1 – Peso de uma amostra no ar em mg;

m_2 – Peso de uma amostra na água em mg;

ρ – Densidade da água em mg/mm³ (considerado como $\rho = 1$);

l – Comprimento da amostra em mm.

Assim, após a realização de todas as medidas, chegou-se aos dados da Tabela 7, que contém os resultados de massa seca e na água, média do comprimento das amostras, os diâmetros individuais e a média desses diâmetros, a área final dos diâmetros calculados e os limites calculados para área.

Tabela 7 - Resultados do diâmetro nominal para as barras de 8, 10 e 12mm

Barra	Massa seca (g)	Massa na água (g)	Média do Comprimento (cm)	Diâmetro (mm)	Média do Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Limites da Área* (mm ²)
8	10,1	5	9,64	8,21	7,49	44,11	60,32 - 40,21
	8,9	4,5	10	7,48			
	8,7	4,5	10,21	7,24			
	9,5	5,2	9,78	7,48			
	8,7	4,6	10,47	7,06			
10	18,2	9,5	9,91	10,57	10,51	86,70	94,25 - 62,83
	17,4	8,8	9,84	10,55			
	17,1	8,6	10,18	10,31			
	17,3	8,5	10,08	10,54			
	18,2	9,4	10,05	10,56			
12	23,1	11,7	9,88	12,12	11,92	111,58	135,72 - 90,48
	22,6	11,1	10,17	12,00			
	21,9	11	10,07	11,74			
	22,5	11,5	10,12	11,76			
	22,7	11,6	9,86	11,97			

* ± 20% da área obtida a partir do diâmetro padrão da barra

Fonte: Elaboração própria

De acordo com o item 11.2.5 da ASTM D7205 (2011) a área nominal das barras não deve superar ou ser inferior a 20% da área padrão. Conforme ilustra a Tabela 7, os resultados ficaram dentro deste limite. Assim, os diâmetros adotados para as barras de 8, 10 e 12mm foram, respectivamente: 7,49mm, 10,51mm e 11,92mm.

3.2 Ensaio de Tração

Para a realização do ensaio de tração, foram utilizadas 5 barras de cada um dos diâmetros (8,10 e 12mm). O procedimento experimental adotado está ilustrado na Figura 9. O ensaio será realizado conforme a norma ASTM D7205 (2011).

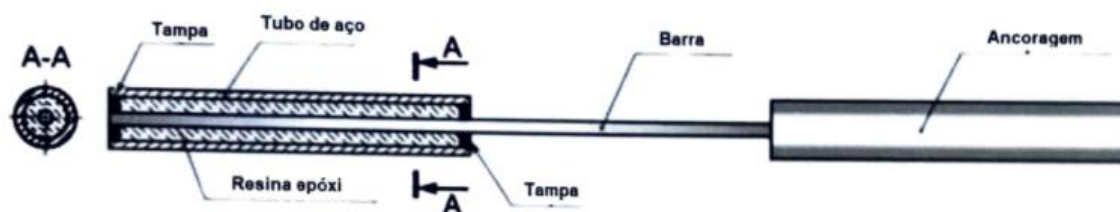
Figura 9 - Procedimento Experimental para a Determinação da Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade e Deformação Última



Fonte: Elaboração própria

Primeiramente, conforme ilustra a Figura 10 e como comentado no item 2.2 deste trabalho, as extremidades das barras devem conter uma ancoragem para evitar a danificação do corpo de prova pelas garras da máquina e mantê-lo centralizado durante o ensaio. O comprimento e diâmetro desse mecanismo variam de acordo com o diâmetro da barra. Nesse aspecto, a ASTM D7205 (2011) sugere valores um pouco mais conservadores e que trariam uma impossibilidade na realização do ensaio na máquina disponível, por isso foram adotados os recomendados pelo CT 303 (2021) no seu Anexo B, de acordo com a Tabela 8. Além disso, o comprimento entre ancoragens deve ser de no mínimo 40 vezes o diâmetro da barra ou 38mm e a ruptura deve ocorrer dentro desse trecho. Os comprimentos finais dos corpos de provas para os diâmetros de 8, 10 e 12mm foram, respectivamente: 90, 90 e 100cm.

Figura 10 - Mecanismo de Ancoragem



Fonte: CT 303 (2021)

Tabela 8 - Dimensões recomendadas para os tubos de aço de acordo com o diâmetro do corpo de prova e pelo CT 303 (2021)

Diâmetros das barras (mm)	Dimensões das ancoragens (mm)	
	Diâmetro nominal do tubo de aço Schedule 40 para ancoragem (mm)	Comprimento de ancoragem (mm)
4 a 10	19	250
12 a 16	32	250
18 a 22	32	300
22 a 30	38	350

Nota: Recomenda-se um espaço mínimo de material de preenchimento de 4mm entre a superfície externa da barra e a parede interna do tubo de aço a barra de 4mm

Fonte: CT 303 (2021)

Neste trabalho, a ancoragem foi feita usando tubos de aço *schedule* de diâmetro externo 22mm para as barras de 8mm e 32mm para as barras de 10 e 12mm, com ambos os tubos tendo os 250mm de comprimento. Para o preenchimento, utilizou-se o adesivo epóxi *compound* de média fluidez, ilustrado na Figura 11. As extremidades dos tubos foram tampadas com buchas torneadas de plástico, como mostrado na Figura 12.

Figura 11 - Adesivo epóxi *compound*



Fonte: Elaboração própria

Figura 12 - Barra com bucha nas extremidades



Fonte: Elaboração própria

Seguindo as recomendações da ASTM D7205 (2011), a moldagem das ancoragens foi feita na posição vertical e criou-se uma estrutura de madeira para mantê-las alinhadas durante a cura do adesivo, conforme a Figura 13.

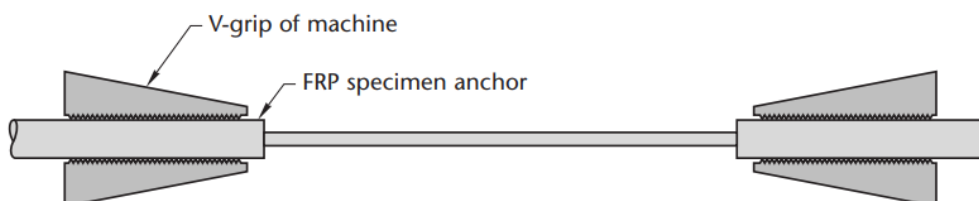
Figura 13 - Estrutura para moldagem da ancoragem nos corpos de prova



Fonte: Elaboração própria

Para o ensaio de tração, foi utilizada uma máquina universal EMIC DL 20000 com uma taxa de aplicação de 5mm/min. As barras ancoradas foram presas às garras, conforme a Figura 14, e então foi colocado um medidor de deformação *clip gauge*, de 50mm, no centro da mesma, afastando-o das ancoragens a uma distância mínima de 8 vezes o diâmetro da barra, de acordo com a Figura 15. O *clip gauge* acompanhou o ensaio até um tempo determinado, para evitar sua danificação.

Figura 14 - Barra teórica ancorada presa às garras da máquina universal



Fonte: CAN S806 (2012)

Figura 15 - Barra ancorada e com *clip gauge* presa à máquina de ensaio



Fonte: Elaboração própria

Por fim, antes da realização do ensaio, foi feita uma previsão de ruptura com os valores mínimos recomendados e com os diâmetros encontrados no item 3.1, conforme indica a Tabela 9. Esta previsão também auxiliou no tempo em que seria retirado o *clip gauge*, previsto para ser com pelo menos 30% antes de atingir a carga máxima prevista.

Tabela 9 - Previsão de ruptura com base nos valores mínimos

Barra	Diâmetro Nominal (mm)	Área (mm ²)	Tensão Prevista (MPa)	Carga Prevista (kN)
8	7,49	44,11	800	35,3
10	10,51	86,70	800	69,4
12	11,92	111,58	800	89,3

Fonte: Elaboração própria

Assim, com a realização dos ensaios e com os valores de carregamento, pode-se calcular a resistência à tração das barras através da Equação 2.

$$f_t(\text{MPa}) = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Onde:

P – Carga em N;

A – Área da seção transversal em mm².

Da mesma forma, com os valores de deformação do *clip gauge*, calculou-se a deformação específica ε através da Equação 3 para então se obter o valor do módulo de elasticidade por meio da Equação 4. A norma ASTM D7205 (2011) sugere que os pontos para o cálculo do módulo de elasticidade sejam em relação à deformação última. Como neste trabalho a deformação última não é obtida diretamente por conta da retirada do *clip gauge* durante o ensaio, utilizou-se o parâmetro sugerido pela CAN/CSA S806 (2012) que seria os pontos de carga última, referenciados na Equação 4.

$$\varepsilon (\text{mm/mm}) = \frac{\delta}{(50 - \delta)} \quad (3)$$

Onde:

δ – Deformação do *clip gauge* em mm;

$$E \text{ (MPa)} = \frac{(P_1 - P_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A} \quad (4)$$

Onde:

P_1 – Carga que constitui 50% da carga última em N;

P_2 – Carga que constitui 25% da carga última em N;

ε_1 – Deformação correspondente a carga P_1 ;

ε_2 – Deformação correspondente a carga P_2 ;

A – Área da seção transversal em mm^2 .

Por fim, a deformação última da barra em cada ponto foi calculada a partir da Equação 5.

$$\varepsilon \text{ (\%)} = \frac{P}{AE} \quad (5)$$

Onde:

P – Carga em N;

A – Área da seção transversal em mm^2 ;

E – Módulo de Elasticidade em MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Barras de Diâmetro de 8 mm

Os resultados do ensaio de tração nas barras de diâmetro de 8 mm são apresentados na Tabela 10. Esta Tabela contém os dados de carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura.

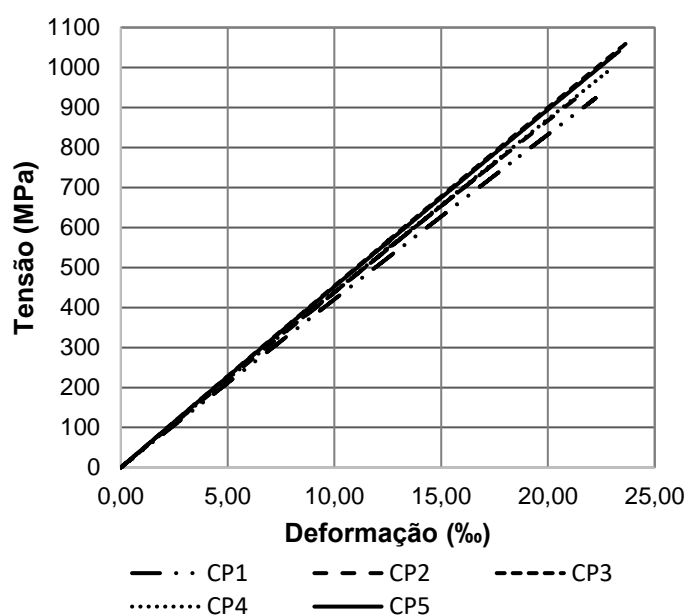
Tabela 10 - Análise da Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura das barras com diâmetro de 8 mm

CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (‰)
1	40,88	926,86	47,17	22,32
2	41,01	929,63	49,15	21,47
3	46,79	1060,71	50,98	23,67
4	43,82	993,33	49,35	22,87
5	45,92	1041,01	50,71	23,34
Média	43,68	990,31	49,47	22,73
Desvio-padrão	2,436	55,215	1,357	0,779
Coef. Variável	5,58%		2,74%	3,43%

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados da Tabela, verifica-se que a tensão de ruptura teve um coeficiente de variação de 5,58%, o módulo de elasticidade de 2,74% e a deformação de ruptura de 3,43%. Estes números revelam uma certa consistência nas propriedades mecânicas das barras em questão. O CP3 foi o que atingiu maior tensão de ruptura e conseqüentemente deformação de ruptura, enquanto o CP1 os menores valores. Por fim, estes resultados superam o esperado, como ilustrado na Tabela 9, onde foi feita uma previsão de 800 MPa de tensão de ruptura.

Para ilustrar o comportamento da barra durante o ensaio e os resultados Tabelados, gerou-se a Figura 16, que contém um gráfico de tensão *versus* deformação das barras de diâmetro de 8 mm. Como comentado no item 3.2, a retirada do *clip gauge* impossibilita que sejam adquiridas as deformações últimas de forma direta e, portanto, foi feito o cálculo do módulo de elasticidade para então se obter a deformação última a partir da Equação 4.

Figura 16 - Gráfico Tensão *versus* Deformação das Barras de Diâmetro 8 mm

Fonte: Elaboração própria.

Analisando o gráfico, percebe-se o comportamento linearmente elástico do material, comprovando o que foi estudado na literatura. Além disso, as baixas variações, em especial do módulo de elasticidade que é o responsável por definir a inclinação da reta, também podem ser refletidas na Figura 16 com as linhas dos corpos de prova praticamente se sobrepondo.

Quando a tensão de ensaio atinge a de ruptura, a barra rompe de forma abrupta, com um som craquelado poucos segundos antes da barra romper. Na Figura 17, pode-se visualizar um dos corpos de prova de diâmetro de 8mm rompidos. O local de ruptura foi basicamente similar para todas, próximo à ancoragem.

Figura 17 - Ruptura do Corpo de Prova de diâmetro de 8 mm



Fonte: Elaboração própria.

Para complementar a análise, comparou-se os resultados de Wiater e Siwowski (2020) aos obtidos neste trabalho na Tabela 11. A Tabela em questão apresenta a média, o desvio-padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura de ambos os trabalhos.

Tabela 11 - Comparação dos Dados de Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura do fabricante B e de diâmetro de 8 mm do estudo de Wiater e Siwowski (2020) aos desta pesquisa

TRABALHO		Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (‰)
Esta pesquisa	Média	990,31	49,47	22,73
	Desvio-padrão	55,22	1,36	0,78
	Coef. Variável	5,58%	2,74%	3,43%
Wiater e Siwowski (2020)	Média	1111,31	49,24	22,60
	Desvio-padrão	23,94	0,64	0,50
	Coef. Variável	2,01%	1,29%	2,24%
Comparação	Média	-10,89%	0,47%	0,59%

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a Tabela 11, verifica-se que esta pesquisa teve média de tensão de ruptura com uma significativa diferença em comparação à dos autores questão, sendo 10,89% menor. Em contraponto, as médias de módulo de elasticidade e deformação última tiveram uma maior semelhança e se aproximam dos resultados encontrados por Wiater e Siwowski (2020), com uma diferença de apenas 0,47% e 0,59% respectivamente.

4.2 Barras de Diâmetro de 10 mm

Através da Tabela 12, podem ser observados os resultados do ensaio de tração nas barras de diâmetro de 10 mm. Nesta Tabela, são apresentados os dados de carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura.

Tabela 12 - Análise da Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura das barras com diâmetro de 10 mm

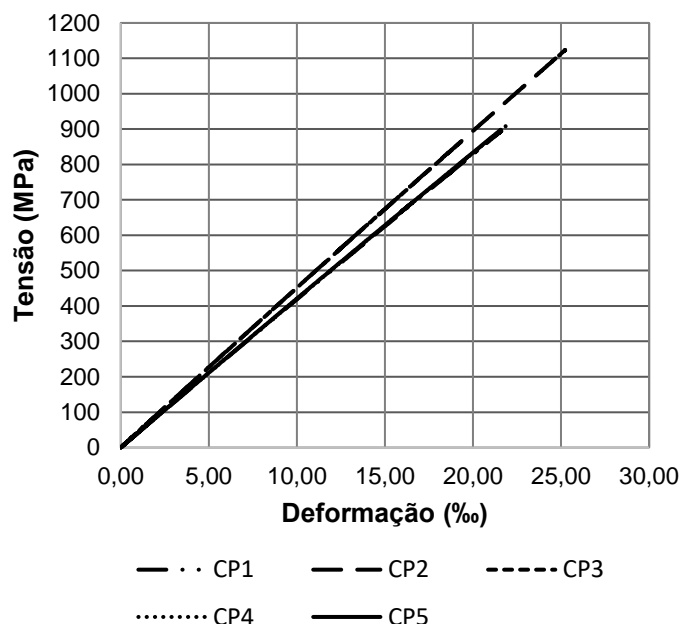
CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (‰)
1	77,58	894,75	47,00	21,61
2	97,39	1123,29	50,71	25,23
3	74,92	864,14	50,67	19,32
4	79,50	916,98	47,18	22,07
5	77,87	898,11	47,24	21,58
Média	81,45	939,45	48,56	21,96
Desvio-padrão	8,104	93,466	1,742	1,896
Coef. Variável	9,95%		3,59%	8,63%

Fonte: Elaboração própria.

Verificando os dados da Tabela 12, nota-se que a tensão de ruptura teve um coeficiente de variação de 9,95%, a deformação na ruptura uma variação de 8,63% e o módulo de elasticidade de 3,59%. Os valores em questão foram superiores aos das barras de 8 mm, sugerindo uma menor consistência nas propriedades mecânicas em questão, com o CP2 atingindo 1123 MPa de tensão de ruptura, enquanto o CP3 chegando aos 863 MPa. Ainda assim, os resultados superaram a ruptura esperada pela Tabela 9.

De forma a melhorar a visualização do comportamento da barra, foi elaborado o gráfico presente na Figura 18, que apresenta a curva tensão *versus* deformação das barras de diâmetro de 10 mm.

Figura 18 - Gráfico Tensão versus Deformação das Barras de Diâmetro 10 mm



Fonte: Elaboração própria.

Assim como nas barras de 8 mm, o comportamento apresentado é o estudado na literatura: linearmente elástico. Novamente, as linhas se sobrepõem no gráfico devido à baixa variação do módulo de elasticidade e consequente semelhança entre a inclinação das retas. No topo, visualiza-se o CP2, que atingiu a maior tensão de ruptura e teve o maior módulo de elasticidade. Já na parte inferior, o CP1 que atingiu a menor tensão de ruptura e teve menor módulo de elasticidade.

A ruptura dos corpos de prova de diâmetro de 10 mm se dá de forma semelhante aos de 8 mm, ocorrendo também praticamente próximo a ancoragem. Na Figura 19, é ilustrada a barra de 10 mm rompida.

Figura 19 - Ruptura do corpo de prova de diâmetro de 10 mm



Fonte: Elaboração própria.

Por fim, novamente comparando os resultados desse estudo com os dos autores Wiater e Siwowski (2020), chega-se às conclusões da Tabela 13, que contém as médias, desvio padrão e coeficiente variável de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação última deste trabalho comparadas à do estudo em questão.

Tabela 13 - Comparação dos Dados de Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura do fabricante B e diâmetro de 10 mm do estudo de Wiater e Siwowski (2020) aos desta pesquisa

TRABALHO		Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (‰)
Esta pesquisa	Média	939,45	48,56	21,96
	Desvio-padrão	93,47	1,74	1,90
	Coef. Variável	9,95%	3,59%	8,63%
Wiater e Siwowski (2020)	Média	1095,72	49,24	21,90
	Desvio-padrão	29,63	1,06	0,90
	Coef. Variável	2,34%	2,12%	3,97%
Comparação	Média	-14,26%	-1,38%	0,28%

Fonte: Elaboração própria.

Assim como nas barras de 8 mm, verifica-se uma maior similaridade nas médias de módulo de elasticidade e deformação de ruptura, sendo as desta pesquisa 1,38% menor e 0,28% maior, respectivamente, que a dos autores. Da mesma forma, a média de tensão de ruptura deste trabalho divergiu em 14,26% da obtida por Wiater e Siwowski (2020) em seus ensaios

4.3 Barras de Diâmetro de 12 mm

Os resultados do ensaio de tração nas barras de diâmetro de 12 mm são apresentados na Tabela 14. Esta Tabela contém os dados de carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura. Os CP1, CP3 e CP4 não romperam, pois houve escorregamento no material de preenchimento. Os valores destes corpos de provas foram desconsiderados para a carga de ruptura, tensão de ruptura e deformação.

Tabela 14 - Análise da Tensão de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Deformação de Ruptura das barras com diâmetro de 12 mm

CP	Carga de Ruptura (kN)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (‰)
1	68,94	617,82	49,99	13,92
2	106,26	952,32	49,65	21,78
3	82,14	736,16	164,05	5,01
4	88,58	793,88	49,86	18,01
5	106,06	950,53	49,48	21,81
Média*	106,16	951,42	49,74**	21,79
Desvio-padrão *	0,100	0,896	0,19**	0,018
Coef. Variável *	0,09%		0,39%**	0,08%

* desconsiderando os CP1, CP3 e CP4 que não romperam

** desconsiderando apenas o CP3 que teve valores muito longe do esperado

Fonte: Elaboração própria.

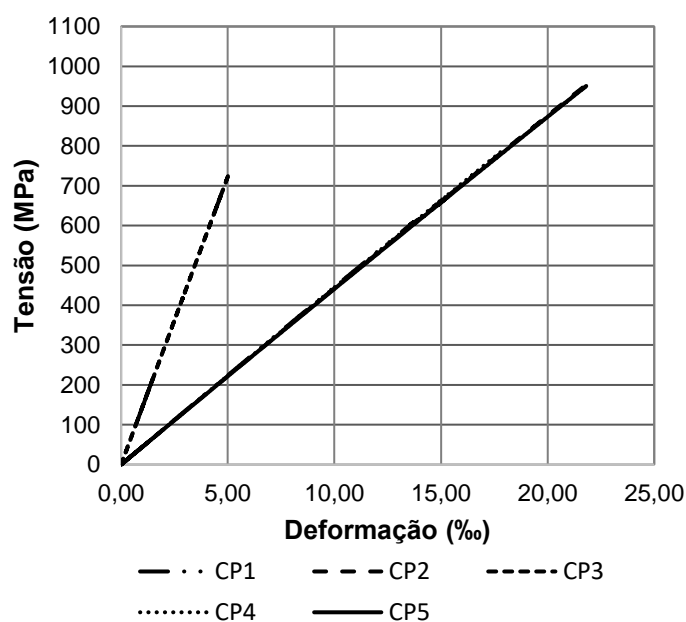
Analisando os resultados dispostos na Tabela 14, nota-se que os CP1, CP3 e CP4 não atingiram as tensões mínimas esperadas pela Tabela 9. Isso ocorreu por ter ocorrido o escorregamento das ancoragens, resultando no término do ensaio e a não obtenção das tensões últimas para estes corpos de prova. Portanto, estes valores foram desconsiderados para o cálculo da média,

desvio-padrão e coeficiente de variação da carga, tensão e deformação de ruptura. Porém, para o módulo de elasticidade, estes corpos de prova ainda foram considerados tomando a tensão de encerramento do ensaio como se fosse a última, com exceção do CP3 que teve resultados muito fora do esperado.

Assim, os coeficientes de variação para tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura acabaram sendo mínimos, pela quantidade de corpos de prova hábeis. Mesmo assim, comparando aos outros diâmetros, o módulo de elasticidade se mostrou com uma boa constância, tendo um coeficiente de variação de apenas 0,39%.

De forma ilustrativa, pode-se visualizar a Figura 20 que contém um gráfico tensão *versus* deformação das barras de 12 mm.

Figura 20 - Gráfico Tensão versus Deformação das Barras de Diâmetro 12 mm



Fonte: Elaboração própria.

A partir do gráfico, pode-se enxergar claramente a mínima variação entre os módulos de elasticidade com a sobreposição total das linhas, sugerindo que o comportamento, apesar do escorregamento, é o mesmo para todos os corpos de prova. Em contrapartida, o CP3 fica isolado dos demais por conta da grande diferença do seu resultado no módulo de elasticidade, podendo ter ocorrido algum erro de medição no *clip gauge*, durante o ensaio.

O modo de rupturas das barras de 12 mm foi similar ao dos outros diâmetros. Entre os dois corpos de provas que romperam, o CP5 teve sua ruptura dentro do tubo, como ilustra a Figura 21. A norma ASTM D7205 (2011) recomenda que a ruptura ocorra dentro do comprimento livre entre as ancoragens, entretanto, por conta da semelhança no local de ruptura das demais barras e pela proximidade da ruptura ao comprimento livre, os dados desse corpo de prova não foram desconsiderados neste trabalho.

Figura 21 - Ruptura do CP5 de diâmetro de 12 mm



Fonte: Elaboração própria.

4.4 Comparação entre diâmetros

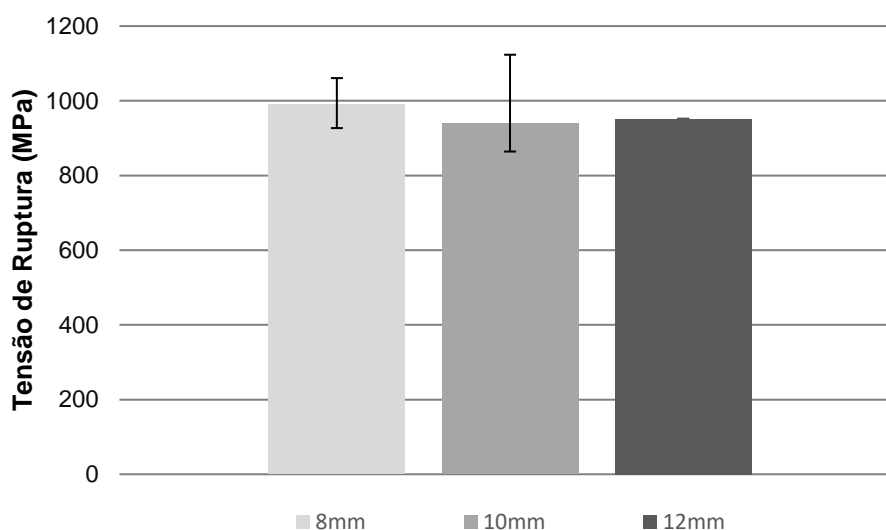
De forma resumida, encontram-se os resultados médios finais para cada diâmetro das barras ensaiadas na Tabela 15, que contém a carga e tensão de ruptura, o módulo de elasticidade e a deformação na ruptura. Na Figura 22, é apresentado um gráfico de colunas com os valores de resistência à tração médios, contendo barra de erros com os valores máximos e mínimos para cada diâmetro estudado.

Tabela 15 - Resumo dos ensaios nas barras de diâmetros 8, 10 e 12 mm

DN (mm)	Carga de Ruptura (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (‰)
8	43,68	990,31	49,47	22,73
10	81,45	939,45	48,56	21,96
12	106,16	951,42	49,74	21,79

Fonte: Elaboração própria

Figura 22 - Gráfico de tensões de tração média, mínima e máxima dos três diâmetros ensaiados



Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados da Tabela 15, verifica-se que em média as barras de 8 mm foram as que alcançaram os maiores valores de tensão e deformação na ruptura, enquanto as barras de 10 mm tiveram os menores valores.

Com o auxílio do gráfico, pode-se constatar a grande consistência nos resultados das barras de 8 mm. Além disso, avaliando a barra de erros, verifica-se que o diâmetro de 10 mm teve os corpos de prova com maior e menor resultado de tensão. A barra de erros das barras de 12 mm quase não é vista por conta da presença de apenas 2 resultados.

O comportamento da média dos resultados sugere o efeito de *shear lag* estudado por Benmokrane *et al.* (1995), onde maiores diâmetros possuem menores resistência à tração. Na comparação dos resultados, buscando

identificar se existe diferença significativa entre as resistências das barras, foi utilizado o teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Os valores de probabilidade abaixo de 0,05 ($p < 0,05$), para cada comparação entre as médias, indicaria haver diferença estatística significativa entre os parâmetros testados.

A Tabela 16 apresenta os valores de “p” encontrados no teste de Tukey para a comparação de resistências das barras, onde pode-se observar que não houve diferença significativas entre os diâmetros ensaiados. Assim, quando analisamos os valores médios, apesar de se verificar uma tendência de queda de resistência, conforme o aumento do diâmetro, a análise estatística mostrou que as diferenças de resistências não são significativas entre os diâmetros ensaiados.

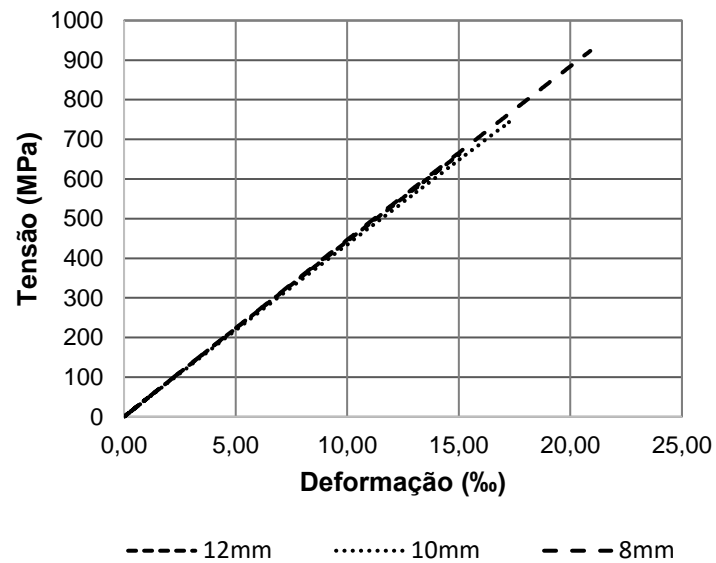
Tabela 16 - Valores de “p” obtidos pelo teste de Tukey entre as resistências das barras

Valores de p			
	8 mm	10 mm	12 mm
8 mm		0,5988	0,8368
10 mm	1,405		0,9829
12 mm	0,8123	0,2501	

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, de forma a comparar os resultados entre os diâmetros, colocou-se os dados das médias de tensão e deformação de cada tempo de ensaio e de cada diâmetro no gráfico da Figura 23.

Figura 23 - Gráfico tensão *versus* deformação de comparação entre os resultados médios dos diâmetros 8, 10 e 12 mm



Fonte: Elaboração própria.

Com o uso do gráfico, pode-se enxergar a clara proximidade dos valores de módulo de elasticidade com grande sobreposição das linhas, mostrando ao comportamento linearmente elástico estudado na bibliografia por Nanni *et. al* (2014).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a resistência à tração de um pequeno lote de barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro (GFRP). Assim, sendo capaz de mostrar seu comportamento no ensaio em questão e contribuir nos estudos para melhor e maior utilização deste tipo de material dentro dos campos da engenharia civil.

Conforme a análise dos resultados, verificou-se que os diâmetros de barras ensaiados apresentaram comportamento médio acima do mínimo recomendado pelas normas. O desempenho final foi bom para todas as barras, com os diâmetros de 12 mm apenas não obtendo todos os resultados para os corpos de prova por conta de uma falha na execução das ancoragens, que resultou no escorregamento das mesmas.

O efeito de *shear lag* estudado na literatura por Benmokrane *et al.* (1995) não teve impacto nos diâmetros de barras ensaiados, como mostrado pelo teste de Tukey realizado no capítulo de resultados e discussões.

Além disso, no emprego da metodologia, notou-se uma dificuldade na preparação dos mecanismos de ancoragens, com a norma seguida sendo pouco específica nesse aspecto, resultando numa falha nos ensaios de três dos corpos de prova. O material usado para o preenchimento deste trabalho tinha uma baixa trabalhabilidade, o que dificultava a inserção do mesmo dentro dos limites do tubo. Enxerga-se então uma necessidade numa melhoria no método de preparação, o que reflete algumas preocupações de Arczewska *et al.* (2016) e Castro (1997).

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

1. Realizar ensaios com os mesmos diâmetros de fabricantes diferentes e comparar os resultados;
2. Ensaiar barras de outros tipos de fibra, como aramida (AFRP) e carbono (CFRP) e comparar os dados finais;
3. Realizar diferentes tipos de preenchimento e verificar se há algum impacto no resultado final do ensaio à tração;

4. Usar diferentes comprimentos de ancoragem e verificar se há alguma mudança na resistência à tração, e também se há a possibilidade de reduzir ou aumentar os tamanhos normativos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI. American Concrete Institute. **ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.** Farmington Hills, 2015.

ARCZEWSKA, P.; POLAK, M.; PENLIDIS, A. Determination of properties and quality of glass fiber reinforced polymer composite reinforcing bars. **Int. J. Mater. Eng. Technol**, v. 15, p.225–261, 2016.

ARCZEWSKA, P.; POLAK, M.; PENLIDIS, A. Relation between Tensile Strength and Modulus of Rupture for GFRP Reinforcing Bars. **Int. J. Mater. Civ. Eng.**, v. 31, 2019.

ASTM D7205/D7205M-06, **Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars**, 2011.

BLAZNOV, A.N.; KRASNOVA, A.S.; KRASNOV, A.A.; Zhurkovsky, M.E. Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. **Polym. Test.**, v. 63, p. 434–439. 2017.

BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O.; MASMOUDI, R. Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 6, p. 353-364. 1995.

CASTRO, P. F. Barras de FRP: Avaliando o Módulo de Elasticidade não Destrutivamente. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p.58-65, 1997.

CABRERA, L. **Dimensionamento e análise de peças de concreto armado submetidas à flexão usando reforço de barras de polímeros reforçados com fibras.** Monografia de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

CSA S806, Design and construction of building structures with fibre reinforced polymer, **Canadian Standards Association (CSA)**, 2012.

DALFRÉ, G. M.; MAZZU, A. Análise Teórica do uso de Armaduras Não-Metálicas de GFRP em vigas de Concreto Armado. **Revista Tecnológica**, v. 29(2), p. 398–414. 2020.

ERKI, M. A.; S. H. RIZKALLA. Anchorages for FRP reinforcement. **Concrete Int**, v 15, p.54–59, 1993.

FAZA, S. S.; GANGARAO, H. V. S. Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete. **Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering**, v. 42, p. 167-188, 1993.

KOCHAOZ, S.; SAMARANAYAKE, V. A.; NANNI, A. Tensile characterization of glass FRP bars. **Composites: Part B**, v. 36, p. 127-134. 2005.

MACHADO, A. P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. v. 25, editora PINI, 2007.

MAZZÚ, A. D. E. **Estudo Sobre a Substituição de Armadura Metálica por barras de GFRP em Vigas de Concreto Armadas à Flexão Quando Submetidas ao Ataque Acelerado de Íons Cloreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

NANNI, A.; BAKIS, C. E.; O'NEIL, E. F.; DIXTON, T.O. Short-term sustained loading of FRP tendon-anchor systems. **Constr. Build. Mater.**, v10, p. 255–266, 1996.

NANNI, A.; DE LUCA A.; ZADEH H. J. **Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design**. CRC Press, Boca Raton, 2014.

PEÑA, C. B. **Serviceability behaviour of fibre reinforced polymer reinforced concrete beams. Tesde de pós-doutorado**. Universidade de Giroan, 2010.

Prática recomendada IBRACON/ABECE. **CT 303**: Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). São Paulo, 2021.

TAVARES, D. H.; GIONGO, J. S.; PAULTRE, P. Behaviour of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 3, p. 285-295. 2008.

TRIPATHI, V. K. **Standardization of test methods for property evaluation of FRP bars**. Tese de pós-doutorado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de West Virginia, 2003.

WEIBULL, J. K.; BASTOS, C.C.D.O.; OLIVEIRA, L. O. S. B. DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA UTILIZANDO CONCRETO COM ARMADURA NÃO METÁLICA. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 3, n. 3, p. 16-37, 2020.

WIATER, A.; SIWOWSKI, T. Comparison of Tensile Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Rebars by Testing According to Various Standards. **Materials**, v. 13, n. 18. 2020.

WORNER, V. J. **Use of Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) reinforcing bars for concrete bridge decks**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil e Recursos Naturais, Universidade de Canterbury, Nova Zelândia. 2015.

WU, W. P. **Thermomechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bars**. Tese de doutorado. Universidade de West Virginia, Morgantown, 1990.