

Avaliação do comportamento mecânico de tubos de concreto reforçado com fibras de aço

Evaluation of the mechanical behavior of steel fiber reinforced concrete pipes

Paula Andreatti de Jesus 
José Luiz Pinheiro Melges 
Emerson Alexandro Bolandim 
Ana Paula Fugii 

Resumo

Este estudo tem por finalidade avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de tubos de concreto reforçados com fibras de aço quando submetidos ao ensaio de compressão diametral, conforme previsto na NBR 8890:2020. Foram produzidos tubos do tipo ponta e bolsa, com diâmetros nominais de 400 mm, 500 mm e 600 mm para as classes de resistência PA1 e PA2, todos com 1500 mm de comprimento e reforçados com 30 kg/m³ de fibras de aço do tipo Dramix 3D 65/35 BG. Os tubos foram instrumentados com LVDTs e submetidos ao ensaio de compressão diametral. As análises dos resultados, mediante a construção de curvas de carga *versus* tempo e carga *versus* deslocamento diametral, permitiram concluir que o consumo de 30 kg/m³ de fibras de aço é suficiente para satisfazer os critérios de resistência da norma. Observou-se também que os tubos de menores diâmetros e classe de resistência mais baixa apresentaram resultados mais favoráveis ao consumo de fibras. Além disso, os resultados mostraram que a região da ponta é a seção mais crítica do tubo, pois as fissuras principiaram nesta região e os deslocamentos foram maiores em comparação aos da bolsa.

Palavras-chave: Tubos de concreto. Fibras de aço. Ensaio de compressão diametral.

Abstract

The purpose of this study was perform an experimental evaluation of the mechanical behavior of concrete pipes reinforced with steel fibers when subjected to the diametral compression test, as required by NBR 8890:2020. Pipes of the socket and spigot type were produced, with nominal diameters of 400 mm, 500 mm, and 600 mm for resistance classes PA1 and PA2, all with a length of 1500 mm and reinforced with 30 kg/m³ of Dramix 3D 65/35 BG steel fibers. The pipes were equipped with LVDTs and subjected to the diametral compression test. Analysis of the results, through the construction of load versus time and load versus diametral displacement curves, allowed for the conclusion that a consumption of 30 kg/m³ of steel fibers is sufficient to meet the resistance criteria of the standard. It was also observed that the smaller diameter pipes and lower strength class exhibited more favorable results regarding fiber consumption. Additionally, the findings indicated that the spigot region is the most critical section of the conduit, as cracks initiated in this area and displacements were greater compared to the socket.

Keywords: Concrete pipes. Steel fibers. Diametral compression test.

¹Paula Andreatti de Jesus

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Ilha Solteira - SP - Brasil

²José Luiz Pinheiro Melges

²Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Ilha Solteira - SP - Brasil

³Emerson Alexandro Bolandim

³Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Ilha Solteira - SP - Brasil

⁴Ana Paula Fugii

⁴Centro Universitário do Norte de São Paulo
São José do Rio Preto - SP - Brasil

Recebido em 22/07/24

Aceito em 29/08/24

Introdução

A utilização de tubos de concreto em obras de infraestrutura de saneamento e drenagem contribui na higienização das cidades e erradicação de doenças. Em países em desenvolvimento, a demanda por tubos de concreto é alta, pois a maioria da população carece de acesso ao saneamento básico. Não obstante, em países desenvolvidos, a demanda por novos tubos também é elevada, em virtude, principalmente, da degradação das redes existentes de esgoto e drenagem (Faisal; Abbas; Ahmed, 2023; Younis *et al.*, 2021).

Nesse viés, ao analisar o cenário brasileiro, verifica-se que a necessidade de investimentos neste setor é imprescindível. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico - SNIS (SNIS, 2022b), apenas 84,2% da população total brasileira são atendidas com redes públicas de abastecimento de água e somente 55,8% da população dispõem de redes de esgotos sanitários. Além disso, apenas 83% das cidades brasileiras possuem sistema de drenagem implantado (SNIS, 2022a).

Para reverter esta situação, o Marco Legal de Saneamento Básico regido pela Lei 14.026 (Brasil, 2020) estabeleceu ao país metas de universalização que garante o atendimento de 99% da população à água potável e de 90% da população aos serviços de coleta e tratamento de esgotos até 2033.

No entanto, para que tais metas sejam atingidas, seriam necessários milhares de quilômetros de tubulações e um alto investimento (Monte; Figueiredo, 2022). Portanto, uma solução plausível é o desenvolvimento de novos tubos de concreto com melhor desempenho estrutural e produção simplificada, a exemplo, tubos de concreto reforçados com fibras de aço (Faisal; Abbas; Ahmed, 2023; Mohamed; Soliman; Nehdi, 2014).

A produção de tubos de concreto reforçados com fibras de aço se torna uma opção viável e vantajosa em comparação aos tubos de concreto armado convencionalmente, visto que a utilização de fibras de aço em substituição ao reforço convencional proporciona vantagens tanto do ponto de vista técnico como econômico. Isto significa dizer que as fibras contribuem para o melhor desempenho dos condutos em serviço, além de proporcionar facilidade de produção e redução de custos (Abolmaali *et al.*, 2012; Escariz, 2012; Figueiredo *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2017; Mohamed; Soliman; Nehdi, 2015).

As fibras, funcionam como pontes de transferências de tensões, controlando a abertura e propagação de fissuras e transformando o comportamento do material de frágil para pseudo-dúctil. Como resultado, os tubos reforçados com fibras apresentam um aumento à capacidade resistente pós-fissuração, tenacidade, ductilidade e resistência ao impacto (Figueiredo, 2011; Lee; Park; Abolmaali, 2019).

O uso de fibras, por vezes, exclui a necessidade da utilização de máquinas especiais para corte, dobra e soldagem das armaduras, otimizando, desta forma, o tempo e o custo de produção (Mohamed; Soliman; Nehdi, 2014). Assim, a pequena economia gerada na produção de uma unidade de tubo, se multiplicada pelo número total de tubos usados em projeto, resultará em uma grande economia final em obras de saneamento básico (Silva; El Debs; Kataoka, 2018).

Deste modo, vários estudos foram realizados com a finalidade de investigar o comportamento mecânico de tubos de concreto reforçados com fibras de aço, quando submetidos ao ensaio de compressão diametral.

Monte e Figueiredo (2017), ao analisarem o comportamento dos tubos de concreto reforçados com fibras de aço com diâmetro de 600 mm e classe de resistência PA1, verificaram que teores de 10 e 20 kg/m³ de fibras foram eficientes para baixos níveis de deformação, quando comparadas ao reforço convencional, o qual apresentou resultados superiores quando o nível de abertura de fissuras foi elevado. No entanto, após atingir a carga de pico, a capacidade resistente dos tubos de concreto com fibras de aço diminuiu progressivamente com o aumento do deslocamento diametral.

Oliveira *et al.* (2017) estudaram o desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com de fibras de aço. Os tubos possuíam diâmetro de 600 mm, classe de resistência PA1 e foram reforçados com 20, 30 e 40 kg/m³ de fibras de aço. Os autores concluíram que apenas os tubos reforçados com 30 e 40 kg/m³ de fibras de aço atenderam aos requisitos de resistência do ensaio de compressão diametral especificado na NBR 8890.

Mohamed, Soliman e Nehdi (2015) realizaram ensaios de resistência à compressão diametral em tubos de concreto reforçados com fibras de aço, com diâmetros de 450 mm e 600 mm, cujos teores de fibras adicionados à mistura variaram em 20, 30 e 40 kg/m³. Os autores concluíram que o teor igual a 30 kg/m³ foi suficiente para satisfazer os requisitos de resistência para tubos de 450 mm e 600 mm, e, portanto, essa dosagem de fibras pode ser empregada com sucesso para produção de tubos de concreto, substituindo o reforço convencional.

Outro estudo, também realizado por Mohamed, Soliman e Nehdi (2014), teve como objetivo avaliar o efeito das fibras de aço como reforço em tubos de concreto com diâmetro de 300 mm. Os autores analisaram o comportamento mecânico dos tubos com teores de 20, 40 e 60 kg/m³ de fibras de aço e concluíram que tubos

com altos teores de fibras foram capazes de suportar maiores cargas após o surgimento da primeira fissura. No entanto, para o tubo com diâmetro de 300 mm, o teor de 20 kg/m³ de fibras de aço foi suficiente para atender aos requisitos normativos.

De la Fuente *et al.* (2012) estudaram o comportamento mecânico de tubos de concreto com diâmetro nominal de 1000 mm, com teores de 20, 25 e 35 kg/m³ de fibras de aço. Ao analisarem o comportamento mecânico dos tubos para as três diferentes dosagens, os autores verificaram que, para os teores de 20 e de 25 kg/m³, os tubos apresentaram uma lenta perda da capacidade resistente com o aumento do deslocamento diametral. No entanto, o teor de 35 kg/m³ de fibras proporcionou um aumento da capacidade resistente com o aumento do deslocamento diametral.

Fugii (2008) teve como objetivo comparar o comportamento mecânico de tubos de concreto simples, armados e reforçados com fibras de aço, cujos teores foram de 10 kg/m³, 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ e 30 kg/m³ em substituição total à armadura. Os tubos possuíam diâmetro nominal de 600 mm e comprimento de 1500 mm, pertencentes à classe de resistência PA1. A autora concluiu que os tubos simples e armados estavam aptos a serem comercializados, pois atendiam às exigências da norma; quanto aos tubos de concreto reforçados com fibras de aço, apenas os que possuíam teores de 20 kg/m³ e 25 kg/m³ obtiveram resultados satisfatórios, completando o plano de carregamento previsto em norma.

No entanto, apesar dos inúmeros estudos, os tubos de concreto reforçados com fibras de aço não ganharam ampla aceitação no mercado, devido à dificuldade em alcançar o desempenho estrutural desejado (Ramadan *et al.*, 2020). Deste modo, novos estudos experimentais quanto ao comportamento e desempenho dos condutos são primordiais, a fim de contribuir para a adesão destes artefatos de concreto.

Além disso, observa-se nos estudos citados anteriormente que não houve investigação quanto ao comportamento mecânico de tubos de concreto reforçados com fibras de aço com diâmetro nominal de 400 mm e 500 mm para classe de resistência PA1 e PA2, à luz da NBR 8890 (ABNT, 2020). Assim, é fundamental explorar o comportamento dos tubos com os referidos diâmetros e classes de resistência, avançando, portanto, no conhecimento da área.

Vale destacar ainda que o cenário brasileiro atual é favorável para impulsionar a produção de tubos de concreto reforçado com fibras de aço, visto que há uma tendência no aumento de obras de saneamento básico para os próximos anos, como afirmam Monte e Figueiredo (2022).

Importância da pesquisa

Este artigo faz parte de um programa de pesquisa que tem por finalidade avaliar experimentalmente o comportamento de tubos de concreto reforçados com fibras de aço durante o ensaio de compressão diametral, conforme especificado na NBR 8890 (ABNT, 2020).

De acordo com Chama Neto (2023), atualmente, o tubo de concreto é o material mais utilizado em obras de drenagem de águas pluviais, especialmente em diâmetros superiores a 400 mm. Portanto, a pesquisa analisou o desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com 30 kg/m³ de fibras de aço, com diâmetros nominais de 400 mm, 500 mm e 600 mm, para as classes de resistência PA1 e PA2, conforme NBR 8890 (ABNT, 2020). Cabe pontuar que esse teor de fibras é frequentemente utilizado no Brasil, como afirma Figueiredo (2011).

O comportamento dos tubos foi analisado por meio das curvas de “carga *versus* tempo” e “carga *versus* deslocamento diametral”, onde foi possível determinar o valor da força-limite de não abertura de fissura e de ruptura das amostras submetidas ao ensaio de compressão diametral.

Ressalta-se que os dados experimentais relatados neste artigo serão usados para calibrar modelos numéricos para tais tubos, visto que os estudos numéricos quanto ao comportamento de tubos de concreto reforçados com fibras de aço ainda são limitados. Segundo Younis *et al.* (2021), os ensaios experimentais podem se tornar um processo dispendioso e, deste modo, os modelos numéricos apresentam-se como uma solução atrativa e viável, desde que devidamente calibrados e validados em dados experimentais.

Programa experimental

Materiais e equipamentos

Foram produzidos tubos de concreto reforçados com fibras de aço com diâmetros nominais de 400 mm, 500 mm e 600 mm, pertencentes à classe PA1; e tubos com diâmetros nominais de 400 mm e 500 mm, pertencentes à classe PA2. Todos os tubos eram do tipo ponta e bolsa e possuíam comprimento de 1500 mm.

Para a produção dos tubos, foram utilizados os materiais que a empresa fabricante rotineiramente empregava, como: cimento Portland (CP V-ARI), água, areia natural, areia artificial, pedrisco, brita 1 e fibras de aço do tipo Dramix 3D 65/35 BG. A caracterização desses materiais, fornecida pela empresa fabricante dos tubos de concreto, é apresentada nas Tabelas 1 a 3, e o tipo de fibra utilizada é mostrado na Figura 1.

Todos os tubos foram produzidos com os mesmos materiais. No entanto, a composição do traço de concreto variou entre as classes PA1 e PA2. Assim, a empresa fabricante utilizou o traço de Referência 1 (RF1) para a produção dos tubos de classe PA1, enquanto os tubos de classe PA2 foram fabricados com o traço de Referência 2 (RF2).

Tabela 1 - Caracterização dos agregados miúdos

Material	Areia natural	Areia artificial
Diâmetro máximo (mm)	4,75	4,75
Módulo de finura	1,70	2,79
Massa específica (g/cm ³)	2,63	2,81
Massa unitária (g/cm ³)	1,61	1,70

Tabela 2 - Caracterização dos agregados graúdos

Material	Pedrisco	Brita 1
Diâmetro máximo (mm)	6,30	19,00
Massa específica seca (g/cm ³)	2,81	2,86
Massa específica s.s.s (g/cm ³)	2,86	2,88
Massa unitária (g/cm ³)	1,54	1,52

Tabela 3 - Características físicas e mecânicas das fibras de aço

Material	Fibra
Comprimento (mm)	35
Diâmetro (mm)	0,55
Fator de forma	65
Resistência à tração (MPa)	1345
Módulo de Elasticidade (GPa)	210



Figura 1 - Fibras de aço Dramix 3D 65/35 BG



A principal diferença entre os traços está relacionada ao consumo de cimento e brita, o que consequentemente afeta o nível de resistência esperado para cada um deles. Ou seja, o traço RF2 apresenta maior consumo de cimento e brita em relação ao traço RF1, conforme Tabela 4.

De acordo com a norma NBR 8890 (ABNT, 2020), a força mínima isenta de fissura e a força mínima de ruptura a ser atingida no ensaio de compressão diametral são maiores para os tubos de classe PA2 em comparação aos tubos de classe PA1. Portanto, quanto maior a classe de resistência do tubo, maiores são as exigências da norma quanto à força mínima isenta de fissura e à força de ruptura, o que justifica a diferença na composição dos traços de concreto para produção dos tubos de classe PA1 e PA2.

O traço RF1 em massa do concreto utilizado na produção dos tubos de classe PA1 foi de 1:2,29:1,71:1,43:1,14 (cimento : areia natural : areia artificial : pedrisco : brita). Já o traço RF2 em massa do concreto utilizado na produção dos tubos de classe PA2 foi de 1:1,87:1,33:1,07:1,8 (cimento : areia natural : areia artificial : pedrisco : brita). O consumo de água não apresentou um valor fixo, pois foi alterado sempre que necessário para garantir a trabalhabilidade e moldabilidade dos tubos, devido à reologia de concreto seco da matriz. No entanto, tomou-se o cuidado de respeitar a relação água/cimento de no máximo 0,50 conforme especifica a NBR 8890 (ABNT, 2020). O consumo dos materiais por metro cúbico de concreto para os dois diferentes traços é apresentado na Tabela 4.

Cabe mencionar que o consumo de fibras adotado nesta pesquisa foi baseado em resultados de estudos anteriores sobre tubos de concreto reforçados com fibras de aço. Sabe-se que a capacidade de reforço proporcionada pelas fibras está diretamente relacionada com o teor adicionado à mistura. Assim, quanto maior for este teor, maior será a quantidade de fibras atuando como pontes de transferência de tensões ao longo de uma fissura, conferindo, desta forma, um aumento da resistência pós-fissuração do concreto. No entanto, quanto menor for o teor de fibras, menor a capacidade resistente do concreto fissurado e maior a chance de instabilidade pós-pico no ensaio (Brandt, 2008; Figueiredo, 2011; Monte; Figueiredo, 2017; Quinino, 2015).

Assim, os tubos de concreto reforçados com fibras de aço foram produzidos e moldados nas instalações de uma fábrica de concreto pré-moldado da cidade de Ribeirão Preto – SP. Foram produzidos três tubos com o traço RF1 e dois tubos com o traço R2. O processo de mistura e os equipamentos utilizados na produção dos tubos foram iguais para todas as amostras.

Para a produção do concreto, foi adotada uma ordem específica de colocação dos materiais. Primeiramente, adicionou-se metade da água da mistura e em seguida, as fibras de aço e os agregados graúdos, misturando-os por um minuto na betoneira. Posteriormente, foram adicionados os agregados miúdos e o cimento, misturando-os por mais um minuto. Em seguida, a massa descansou por três minutos e depois, com o restante da água, foi novamente misturada por três minutos. O concreto foi então lançado nas fôrmas e os tubos foram moldados. Após a desforma, os tubos permaneceram em cura por 28 dias. O ensaio de compressão diametral foi realizado após o período de cura. A geometria e as respectivas dimensões dos tubos produzidos estão representadas na Figura 2.

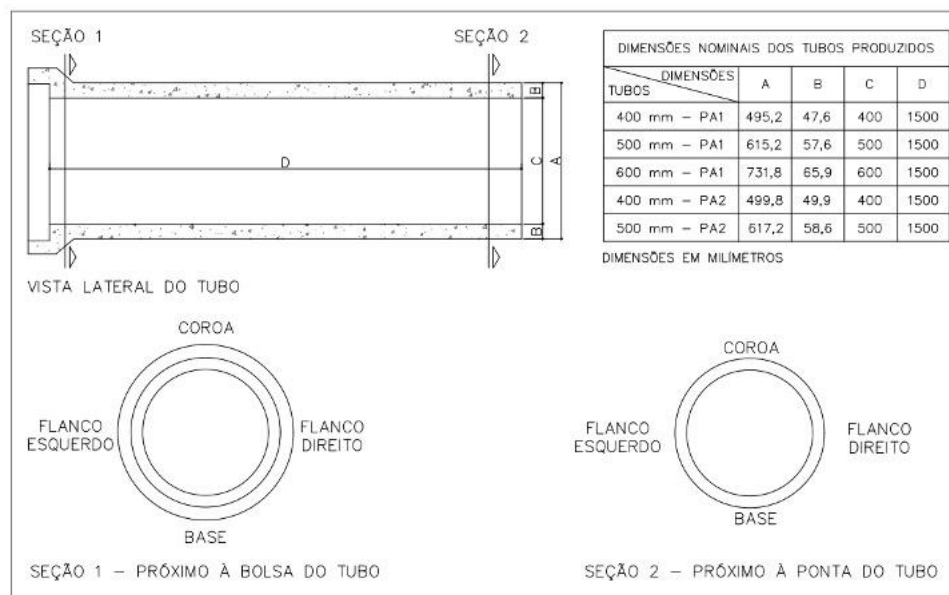
Instrumentação dos tubos

Conforme as especificações da NBR 8890:2020, os tubos de concreto foram deitados sobre apoios planos e horizontais, sendo estes constituídos por sarrafos retos de madeira, de comprimento igual ao superior ao conduto. Ao longo da geratriz superior do tubo, também foi colocada uma vigota de madeira, de seção retangular, de comprimento tal que abranja o comprimento útil do tubo em ensaio. Além disso, para evitar a concentração de esforços em possíveis irregularidades da superfície do tubo, intercalou-se entre o tubo e cada cutelo, uma tira de borracha com cerca de 5 mm de espessura.

Tabela 4 - Composição do traço de concreto por um metro cúbico de concreto

Materiais	Consumo por metro cúbico de concreto	
	Traço RF1	Traço RF2
Cimento (kg)	350	375
Areia natural (kg)	800	700
Areia artificial (kg)	600	500
Pedrisco (kg)	500	400
Brita 1 (kg)	400	675
Fibras de aço (kg)	30	30

Figura 2 - Geometria e dimensões dos tubos ensaiados



Para aplicação da força diametral aos tubos de concreto, fez-se uso de uma bomba elétrica da marca ENERPAC, acoplada a um atuador hidráulico da marca ENERPAC, com capacidade para 100 tf. Para aferição da intensidade da força aplicada, utilizou-se uma célula de carga fixada na base de um atuador hidráulico, com capacidade para 30 tf.

Embora não haja obrigatoriedade quanto ao uso de LVDTs, nesta pesquisa se optou por utilizar tais equipamentos, a fim de contribuir na análise do comportamento mecânico dos condutos. Deste modo, foram utilizados dois LVDTs da marca KYOWA e modelo DTH-A-30, sendo um posicionado próximo à região da bolsa do tubo e o outro na região da ponta, dispostos contra a superfície interna superior do tubo e apoiados na parte inferior, com a finalidade de se obter o deslocamento vertical diametral de ambas as regiões.

Portanto, para coleta e armazenamento dos dados obtidos por meio do uso da célula de carga e LVDTs, foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados DAQbook 120 da Lotech, com interface ao programa DASyLab 5.0, para posterior construção dos gráficos de “carga versus tempo” e “carga versus deslocamento diametral”.

A disposição final do tubo de concreto reforçado com fibras de aço para a realização do ensaio de compressão diametral está apresentada na Figura 3.

Procedimento de ensaio de compressão diametral

O ensaio de três arestas (ou compressão diametral) é um teste de esmagamento amplamente utilizado pela indústria de tubos de concreto em todo o mundo (Mohamed; Soliman; Nehdi, 2015; Younis *et al.*, 2020), onde se avalia a capacidade resistente do tubo em relação a uma carga vertical, simulando o que acontecerá durante a sua utilização.

De acordo com a NBR 8890 (ABNT, 2020), o procedimento inicia-se com o carregamento do tubo de forma contínua até se atingir a força mínima isenta de fissura (vide Tabela 5), mantendo-a estabilizada por um minuto. Ao final de um minuto, o tubo não deve apresentar qualquer tipo de fissura mediante avaliação gráfica ou visual. Caso não seja observado nenhum tipo de fissura, o ensaio pode prosseguir a partir desta força até que o tubo atinja à sua capacidade resistente, denominada de força de ruptura (vide Tabela 5), que deve corresponder a, no mínimo, 1,5 vezes o valor da força mínima isenta de fissura. Na sequência, a força deve ser reduzida progressivamente, ao ponto que, quando a força atingir 95% da força máxima registrada, esta seja removida integralmente.

Novamente, o tubo deve ser recarregado até a força mínima isenta de fissura registrada e deve suportá-la por um minuto. Neste momento, deve-se verificar se o tubo apresenta capacidade de suporte residual pós-fissuração para a força mantida nesta situação. Caso o tubo não consiga atingir ou manter força de fissura no recarregamento, o mesmo deve ser rejeitado. Caso o tubo atenda ao requisito, ao final deste um minuto, o

carregamento deve prosseguir até atingir seu valor máximo, devendo superar a força mínima isenta de fissura em, no mínimo, 5%.

Ressalta-se que, a velocidade de carregamento aplicada deve permanecer no intervalo entre 5 kN/min e 35 kN/min, de acordo com a NBR 8890 (ABNT, 2020).

Figura 3 - Tubo instrumentado para execução do ensaio de compressão diametral

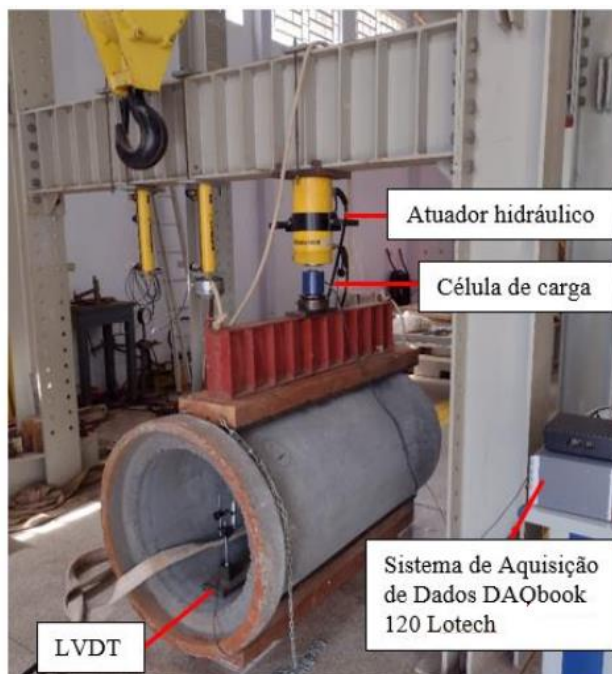


Tabela 5 - Forças mínimas para o ensaio de compressão diametral de tubos de concreto reforçados com fibras de aço

DN	Água Pluvial							
	Força mínima isenta de fissura (kN/m)				Força mínima de ruptura (kN/m)			
Classe	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162
1000	40	60	90	120	60	90	135	180
1100	44	66	99	132	66	99	149	198
1200	48	72	108	144	72	108	162	216
1500	60	90	135	180	90	135	203	270
1750	70	105	158	210	105	158	237	315
2000	80	120	180	240	120	180	270	360

Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2020).

Resultados e discussões

Curva de carga versus tempo

Os gráficos de carga *versus* tempo do ensaio de compressão diametral nos tubos de concreto reforçados com fibras de aço são apresentados nas Figuras 4 a 8.

É importante ressaltar que o valor referente à carga mínima isenta de fissura, carga mínima de ruptura e mínima de recarregamento a ser atingida no ensaio de compressão diametral já considerou o comprimento do tubo de 1,50 m.

Por exemplo, para o tubo de concreto com diâmetro nominal de 400 mm e classe PA1, a carga mínima isenta de fissura por norma é de 16 kN/m. Como o tubo utilizado neste estudo possuía um comprimento de 1,50 m, então a carga mínima isenta de fissura é de 24 kN. A carga de ruptura conforme a norma é de 24 kN/m, considerando então o comprimento do tubo de 1,50 m, a carga de ruptura é de 36 kN. Já carga mínima no recarregamento deve ser, no mínimo, 5% maior que a carga mínima isenta de fissura, o que neste caso, corresponde a 25,2 kN.

Figura 4 - Curva de carga versus tempo do tubo de 400-PA1-RF1

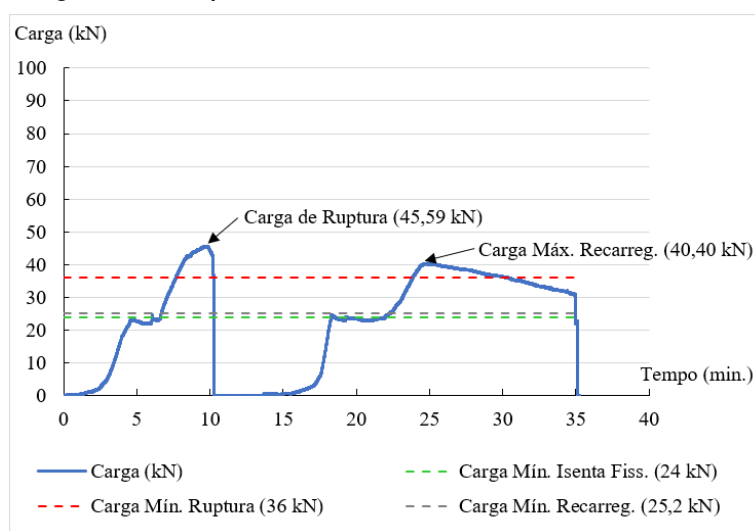


Figura 5 - Curva de carga versus tempo do tubo de 500-PA1-RF1

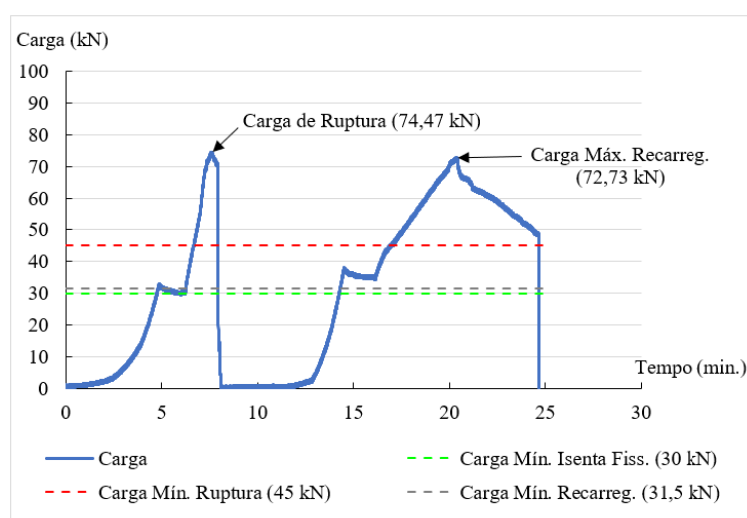


Figura 6 - Curva de carga versus tempo do tubo de 600-PA1-RF1

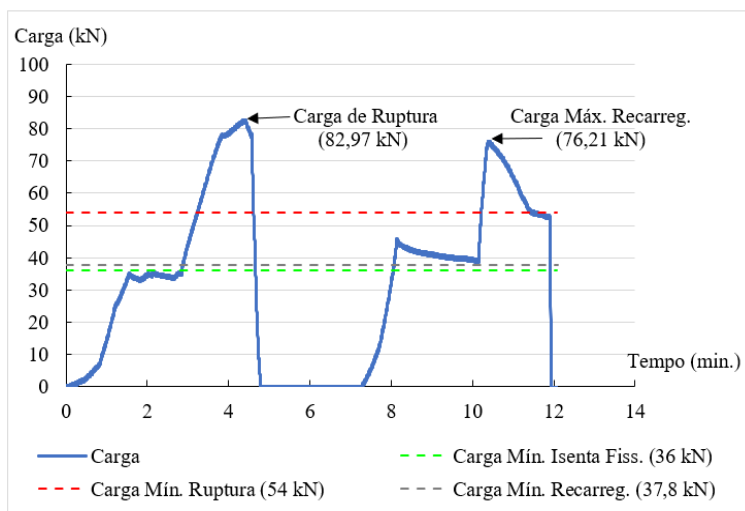


Figura 7 - Curva de carga versus tempo do tubo de 400-PA2-RF2

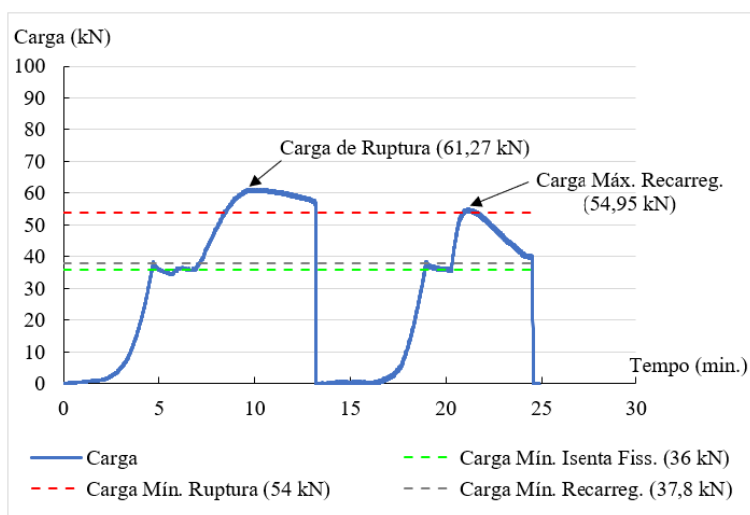
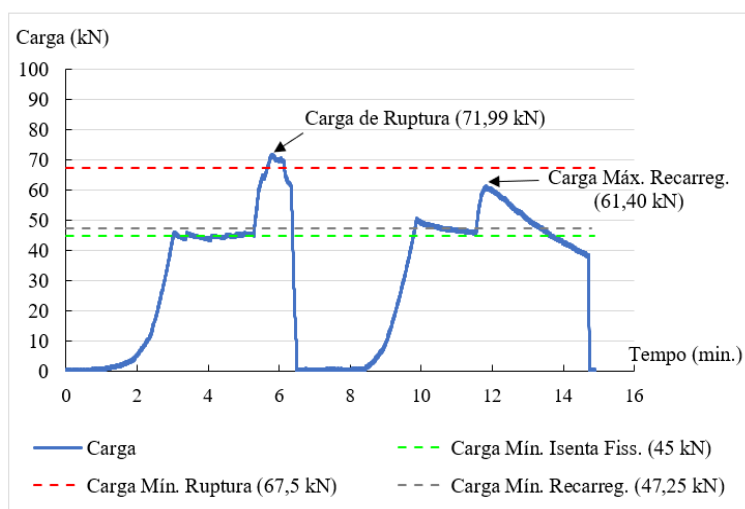


Figura 8 - Curva de carga versus tempo do tubo de 500-PA2-RF2



Ao analisar as curvas de carga *versus* tempo (Figuras 4 a 8), nota-se que o procedimento de carregamento durante o ensaio de compressão diametral foi igual para todos os tubos. Inicialmente, o carregamento foi aplicado gradualmente até que se atingisse o valor correspondente à força mínima isenta de fissura determinada pela NBR 8890 (ABNT, 2020), mantendo-se, a seguir, esta força constante por pelo menos um minuto. Ao final deste minuto, não foram observadas fissuras nos tubos, e, portanto, a carga foi elevada até a capacidade máxima resistente dos condutos.

Diante disso, verifica-se que no primeiro ciclo de carregamento, os tubos de classe PA1 e traço de referência RF1, com diâmetros nominais de 400 mm, 500 mm e 600 mm, excederam a carga mínima de ruptura exigida pela NBR 8890:2020 em 26,6%, 65,5% e 53,6%, respectivamente. Já os tubos de classe PA2 e traço de referência RF2, com diâmetros nominais de 400 mm e 500 mm, a extrapolaram em 13,5% e 6,6%, respectivamente.

Após atingir a carga máxima, os tubos foram descarregados e novamente recarregados. Observa-se que no segundo ciclo de carga os tubos apresentaram capacidade residual e foram capazes de manter novamente a carga mínima isenta de fissura estabilizada por mais de um minuto, seguido pelo aumento do carregamento. Portanto, todos os tubos foram capazes de suportar ao aumento da carga, além do mínimo exigido por norma, que neste caso, corresponde a 105% da carga mínima isenta de fissura.

Os tubos de classe PA1 com diâmetro nominal de 400 mm, 500 mm e 600 mm superaram em 60,3%, 130,9% e 101,6%, respectivamente, a carga mínima de recarregamento estabelecida pela NBR 8890:2020. Já os tubos de classe PA2, para os diâmetros de 400 mm e 500 mm, extrapolaram a carga mínima de recarregamento em 45,4% e 29,9%, respectivamente.

Nota-se, portanto, que a carga atingida no recarregamento por todos os tubos de classe PA1 e PA2 foi próxima à carga de ruptura, o que demonstra um excelente desempenho da fibra no estágio pós-fissuração da matriz cimentícia. Observação semelhante também foi relatada no estudo de Oliveira *et al.* (2017).

Para uma melhor compreensão, os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral referente à carga de ruptura e carga máxima de recarregamento são apresentados na Tabela 6 e comparados aos critérios de resistência estabelecidos pela norma NBR 8890 (ABNT, 2020).

De acordo com os dados da Tabela 6, todos os tubos atenderam aos critérios de resistência exigidos pela NBR 8890:2020 e, portanto, foram aprovados no ensaio de compressão diametral.

Desta forma, a dosagem de 30 kg/m³ de fibras de aço utilizada na produção dos tubos poderia ser reavaliado, ou seja, diminuir o consumo de fibras, visto que todos os tubos de classe PA1 e PA2 excederam a carga mínima de ruptura e de recarregamento determinadas por norma. Como resultado, um menor consumo de fibras geraria ainda mais redução nos custos de produção e, conseqüentemente, possibilitaria a produção de um maior número de tubos.

Além disso, nota-se que os valores extrapolados em relação à carga mínima de ruptura e recarregamento, foram maiores para os tubos de classe PA1 em comparação com os da classe PA2. Essa observação é importante, pois de acordo com Figueiredo (2011), quanto maior o diâmetro do tubo e maior a classe de resistência, maior será o consumo de fibras, de modo que os critérios mínimos de resistências estabelecidos na NBR 8890 sejam atendidos; em contrapartida, tubo de menor diâmetro e menor classe de resistência exige um menor consumo de fibras e, portanto, apresenta um desempenho mais favorável quanto ao uso de fibras.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de compressão diametral

Cargas	Diâmetro nominal e classe				
	400-PA1-RF1	500-PA1-RF1	600-PA1-RF1	400-PA2-RF2	500-PA2-RF2
Carga mínima isenta de fissura por norma (kN)	24,00	30,00	36,00	36,00	45,00
Carga mínima de ruptura por norma (kN)	36,00	45,00	54,00	54,00	67,50
Carga mínima de recarreg. por norma (kN)	25,20	31,50	37,80	37,80	47,25
Carga máxima de ruptura do ensaio (kN)	45,59	74,47	82,97	61,27	71,99
Carga máxima de recarreg. do ensaio (kN)	40,40	72,73	76,21	54,95	61,40

Portanto, a partir destes resultados, pode-se concluir que uma dosagem inferior a 30 kg/m^3 de fibras de aço, para o mesmo traço de concreto empregado (RF1), seria suficiente para satisfazer os critérios de resistência dos tubos de classe PA1 com diâmetros de 400 mm, 500 mm e 600 mm. Já para os tubos de classe PA2 com traço de concreto RF2, uma dosagem moderadamente e mais próxima de 30 kg/m^3 de fibras, seriam suficientes para atender aos critérios de resistência dos tubos com diâmetros de 400 mm e 500 mm. Deste modo, um estudo paramétrico por meio de modelagens numéricas, se torna interessante para entender melhor o comportamento do tubo para diferentes dosagens de fibras.

Curva de carga *versus* deslocamento diametral

A partir do ensaio de compressão diametral e por meio do uso de LVDTs, foram construídas as curvas de carga *versus* deslocamento diametral de todos os tubos de classe PA1 e PA2 com diâmetro de 400 mm, 500 mm e 600 mm, conforme mostram as Figuras 9 a 13.

Figura 9 - Curva de carga versus deslocamento diametral do tubo de 400-PA1-RF1

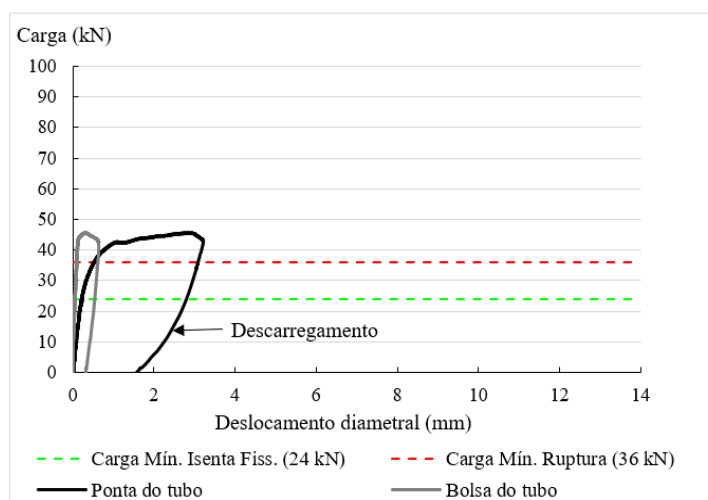


Figura 10 - Curva de carga versus deslocamento diametral do tubo de 500-PA1-RF1

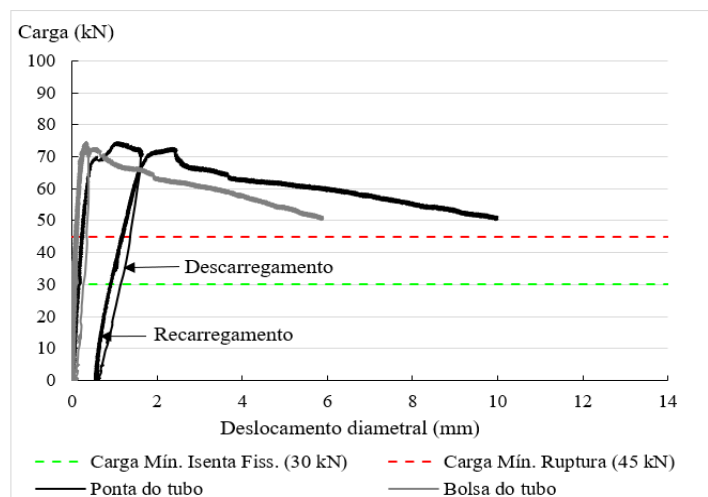


Figura 11 - Curva de carga versus deslocamento diametral do tubo de 600-PA1-RF1

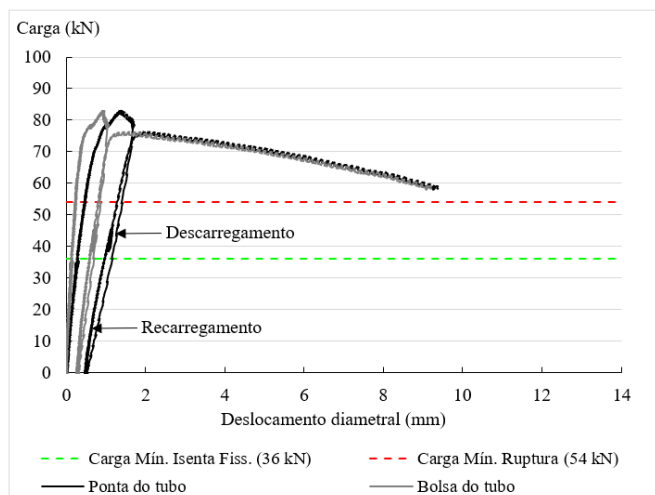


Figura 12 - Curva de carga versus deslocamento diametral do tubo de 400-PA2-RF2

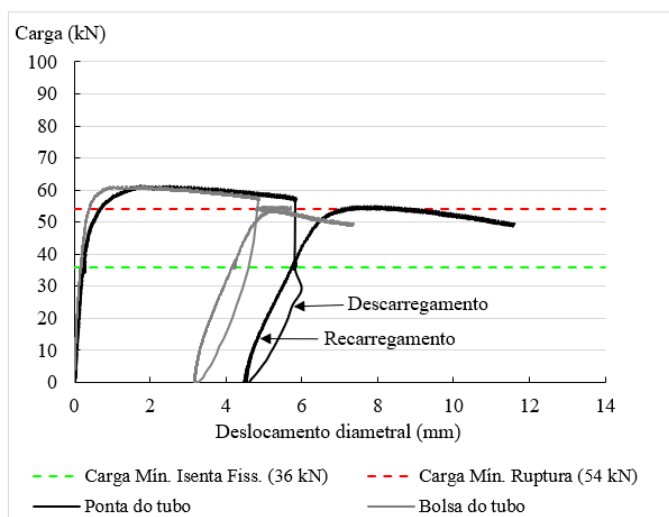
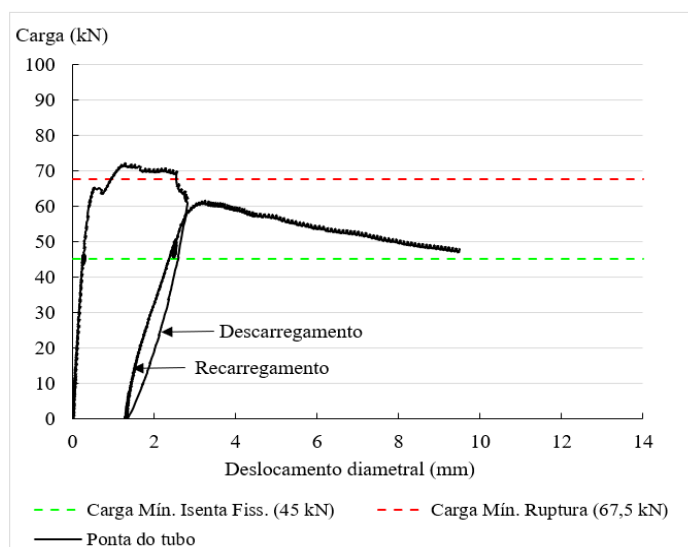


Figura 13 - Curva de carga versus deslocamento diametral do tubo de 500-PA2-RF2



Primeiramente, ressalta-se que o monitoramento dos deslocamentos diametrais do tubo de 400-PA1-RF1 (Figura 9) foram realizados apenas para o primeiro ciclo de carregamento, ou seja, até o momento em que a carga foi removida integralmente. A justificativa em se retirar os LVDTs ao final do primeiro ciclo de carga foi por receio de ocorrer uma ruptura abrupta do tubo e, conseqüentemente, gerar danos aos equipamentos de medida. No entanto, este tubo completou ao plano de carregamento previsto e apresentou um bom desempenho e, portanto, caso os LVDTs fossem mantidos, não haveria dano algum. Assim, os LVDTs posicionados nos tubos ensaiados posteriormente foram mantidos também durante o segundo ciclo de carregamento.

Ao analisar os gráficos das Figuras 10 a 13, observa-se que os tubos apresentaram um comportamento bem definido do tipo *softening*, que consiste na perda da capacidade resistente com o aumento do deslocamento vertical diametral. Tal comportamento é associado ao teor de fibras utilizado na produção dos tubos.

Segundo Figueiredo (2011), quando o teor de fibras está abaixo do volume crítico, estimado em 40 kg/m³, o comportamento dos tubos tende a ser do tipo *softening*, ou seja, existe uma lenta perda da capacidade de carga com o aumento da deformação imposta ao tubo. Portanto, como os tubos foram reforçados com 30 kg/m³ de fibras, abaixo do volume crítico, o comportamento exibido foram predominantemente *softening*. Cabe mencionar ainda que, embora não haja dados dos deslocamentos diametrais do tubo de 400-PA1-RF1 na etapa de recarregamento, o comportamento *softening* também seria o esperado.

Nota-se que todos os tubos exibiram deslocamentos diametrais menores na região da bolsa em comparação a região da ponta (Figuras 9 a 13). Observa-se que a região da bolsa atingiu o limite de deformação elástica após a região da ponta ter esse limite atingido, ou seja, a mudança na inclinação da reta do trecho inicial de carregamento da bolsa aconteceu para um nível de carga superior em comparação à região da ponta. Tal comportamento pode ser justificado pelo fato de que a região da bolsa possui maior rigidez em comparação à região da ponta do tubo. Observação semelhante também foi relatada no estudo de Figueiredo *et al.* (2012).

Com isto, ao observar a curva de carga *versus* deslocamento (Figura 9), nota-se que o tubo de 400-PA1-RF1 apresentou uma mudança na inclinação da reta, indicando início da fissuração, próximo à 25 kN na região da ponta e próximo à 43 kN na região da bolsa, superiores à carga mínima isenta de fissura de 24 kN especificada na NBR 8890. Já o tubo de 500-PA1-RF1 (Figura 10), iniciou o processo de fissuração próximo à 65 kN na região da ponta e próximo à 70 kN na região da bolsa, ultrapassando a carga mínima isenta de fissura de 30 kN. Quanto ao tubo de 600-PA1-RF1 (Figura 11), nota-se que a formação das fissuras iniciais aconteceu próximo à 65 kN na região da ponta e próximo à 73 kN na região da bolsa, excedendo a carga mínima isenta de fissura de 36 kN.

Com relação aos tubos de classe PA2, observa-se que a fissuração no tubo de 400-PA2-RF2 (Figura 12) iniciou em torno de 48 kN na região da ponta e próximo à 54 kN na região da bolsa, superando a carga mínima isenta de fissura de 36 kN. Já o tubo de 500-PA2-RF2, as fissuras iniciais ocorreram próximo à 62 kN na região da ponta, superando a carga mínima isenta de fissura de 45 kN (Figura 13). Quanto à fissuração na região da bolsa do tubo de 500-PA2-RF2, não foi possível se obter a carga correspondente, em função de uma falha no posicionamento do LVDT.

Diante destes resultados, a região da ponta pode ser considerada a seção mais crítica do conduto. Isto leva a concluir que o processo de fissuração do tubo se inicia na região da ponta e propaga-se para a região da bolsa, estando em conformidade com os resultados de Silva (2011) e Figueiredo *et al.* (2012). Além disso, constata-se que o uso de LVDTs se torna indispensável para avaliar o comportamento dos condutos, pois possibilita definir com maior precisão a carga correspondente à primeira fissura, como já afirmado por Monte e Figueiredo (2017).

Portanto, nota-se que a carga de fissuração alcançada por todos os tubos foi superior à carga mínima isenta de fissura estabelecida pela norma NBR 8890. Isto pode ser justificado, principalmente, em virtude da qualidade da matriz de concreto empregada na produção dos tubos, pois de acordo com Figueiredo (2011), a grande responsável em atender à exigência da carga mínima isenta de fissura é a matriz cimentícia.

Após as fissuras iniciais durante o primeiro ciclo de carregamento, observou-se que os tubos, gradativamente, começaram a perder rigidez. Entretanto, os tubos ainda foram capazes de suportar o aumento do carregamento até atingir a carga máxima de ruptura, devido à presença das fibras, que contribuíram para a capacidade resistente dos condutos e dificultaram a propagação de fissuras. Além disso, observou-se que, conforme o carregamento aumentava, o deslocamento diametral também aumentava, como mostram os gráficos de carga *versus* deslocamento diametral.

Quando a capacidade de carga caiu para 95% da força máxima registrada e o carregamento foi então removido integralmente, observou-se que os tubos foram capazes de se recuperar de algumas deformações diametrais. Observação semelhante também foi relatada na pesquisa de Mohamed, Soliman e Nehdi (2015).

Em relação ao segundo ciclo de carregamento, para o tubo já fissurado, e, portanto, com menor rigidez, nota-se que o gráfico de carga *versus* deslocamento diametral apresenta uma curva mais abatida em comparação ao trecho inicial de carregamento. Porém, como as fibras de aço atuam como pontes de transferências de tensões (Figueiredo, 2011), os tubos conseguiram suportar a manutenção da carga mínima isenta de fissura pelo período especificado por norma e resistir ao aumento do carregamento até atingir à sua capacidade máxima. Após alcançar a carga máxima de recarregamento, nota-se que os tubos continuaram a se deformar, apresentando resistência decrescente à medida em que o carregamento era aplicado, característica de um comportamento *softening*.

Além disso, observa-se, nas Figuras 9 a 13 que não houve afastamento entre os pontos dos gráficos, indicando, portanto, que não houve instabilidade durante o ensaio dos tubos. Essa observação é importante, pois baixos teores de fibras tender a provocar instabilidade no ensaio, como relatado por Monte e Figueiredo (2017), quando utilizaram 10 kg/m³ de fibras de aço. No entanto, como nesta pesquisa se utilizou 30 kg/m³ de fibras de aço, não se verificou a mencionada região de instabilidade.

Comparado com a literatura, as observações relatadas quanto ao comportamento dos tubos no primeiro e segundo ciclos de carregamento concordam com estudos de Mohamed, Soliman e Nehdi (2015) e Oliveira *et al.* (2017). Cabe ressaltar ainda, que o comportamento das curvas de carga *versus* deslocamento diametral é análogo ao comportamento estrutural apresentado no trabalho de la Fuente *et al.* (2010).

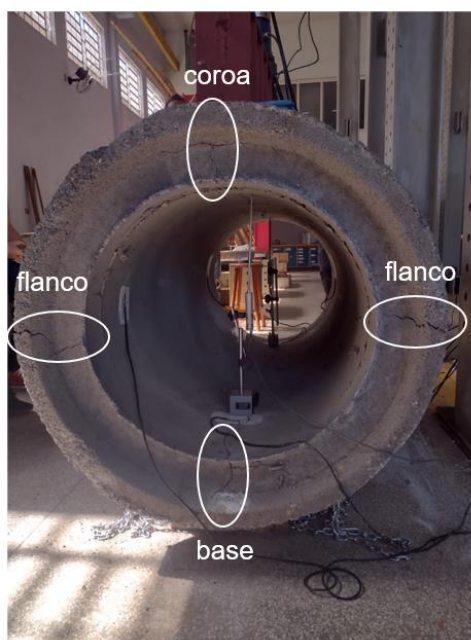
Mecanismo de ruptura dos tubos de concreto reforçados com fibras

Todos os tubos de concreto reforçados com fibras de aço submetidos ao ensaio de compressão diametral apresentaram ruptura por flexão, caracterizada pela formação de quatro principais fissuras longitudinais.

As fissuras longitudinais se desenvolveram, inicialmente, nas regiões internas da coroa e da base na ponta do tubo. Posteriormente, conforme o aumento do carregamento, surgiram fissuras longitudinais nas faces externas dos flancos direito e esquerdo. Este comportamento de formação de fissuras nos tubos de concreto também foi observado nas pesquisas de la Fuente *et al.* (2012); Mohamed, Soliman e Nehdi (2015); Oliveira *et al.* (2017); Yazhini e Chitra (2022). A Figura 14 mostra as quatro principais fissuras que se formaram em um dos tubos submetidos ao ensaio de compressão diametral.

Além disso, observou-se que as fissuras longitudinais se iniciaram na região da ponta e se propagaram para a região da bolsa. Isto pode ser justificado em função da menor rigidez da região da ponta, que por consequência, sofreu com maiores deslocamentos em comparação à região da bolsa, o que está de acordo com os estudos de Silva (2011) e Figueiredo *et al.* (2012).

Figura 14 - Formação de quatro principais fissuras longitudinais no tubo submetido ao ensaio de compressão diametral



Conclusão

Os resultados da presente pesquisa permitem concluir que:

- (a) o consumo de 30 kg/m³ de fibras de aço satisfaz os critérios de resistência para os tubos de diâmetros nominais de 400 mm, 500 mm e 600 mm, e classes de resistência PA1 e PA2. No entanto, este consumo de fibras extrapola os critérios mínimos de resistências estabelecidos por norma;
- (b) o percentual extrapolado quanto aos requisitos de resistência foi maior para os tubos de menor classe de resistência e menor diâmetro. Isto leva a concluir que estes tubos exigem um consumo menor de fibras em comparação a tubos com maior classe de resistência e maior diâmetro;
- (c) as fibras de aço contribuem para o aumento da capacidade resistente dos tubos de concreto, principalmente na fase pós-fissuração da matriz; as fissuras se originaram na região da ponta e propagam-se para região da bolsa do tubo, consequentemente, os deslocamentos diametrais são maiores na região da ponta em comparação a região da bolsa;
- (d) independente do diâmetro e classe de resistência dos tubos com fibras, a ruptura acontece por flexão, caracterizada pela formação de quatro principais fissuras.

Referências

- ABOLMAALI, A. *et al.* Performance of steel fiber-reinforced concrete pipes. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2312, p. 168-177, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8890**: tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2020.
- BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, London, v. 86, p. 3-9, 2008.
- BRASIL. Ministério da Justiça. **Lei nº 14026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 01 mar. 2023.
- CHAMA NETO, P. J. Projeto e execução de obras de saneamento com tubos de concreto. **Revista Concreto & Construções**, v. 110, p. 58-65, 2023.
- DE LA FUENTE, A. *et al.* A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 547-555, 2012.
- DE LA FUENTE, A. *et al.* Análisis de viabilidad del uso de fibras metálicas en tubos de hormigón: parte 2, modelo numérico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., Fortaleza, 2010. **Anais [...]** São Paulo: IBRACON, 2010.
- ESCARIZ, R. C. **Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço**. São Paulo, 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- FAISAL, A.; ABBAS, S.; AHMED, A. Mechanical performance of spun-cast full-scale precast pipes incorporating hybrid conventional rebar cage and steel fibers. **Structures**, v. 52, p. 104-116, 2023.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo, 2011. 248 f. Tese (Livro - Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- FIGUEIREDO, A. D. *et al.* Análise da viabilidade do uso de fibras metálicas em tubos de concreto: parte 1, campanha experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., Fortaleza, 2010. **Anais [...]** São Paulo: IBRACON, 2010.
- FIGUEIREDO, A. D. *et al.* Steel fiber reinforced concrete pipes. Part 1: technological analysis of the mechanical behavior. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 5, p. 1-11, 2012.
- FUGII, A. P. **Avaliação de tubos de concreto reforçados com fibras de aço segundo a NBR 8890**. Ilha Solteira, 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2008.
- LEE, S.; PARK, Y.; ABOLMAALI, A. Investigation of flexural toughness for steel-and-synthetic-fiber-reinforced concrete pipes. **Structures**, v. 19, p. 203-211, 2019.

- MOHAMED, N.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Full-scale pipes using dry-cast steel fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 411-422, 2014.
- MOHAMED, N.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete pipes. **Engineering Structures**, v. 84, p. 287-299, 2015.
- MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Tendências para o uso de fibras no reforço estrutural de tubos de concreto. **Revista Concreto & Construções**, v. 108, p. 87-91, 2022.
- MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Uma nova abordagem do ensaio de compressão diametral de tubos de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., Bento Gonçalves, 2017. **Anais [...]** São Paulo: IBRACON, 2017.
- OLIVEIRA, M. A. B. *et al.* Tubos de concreto produzidos com fibras de aço e agregados da região metropolitana de Belém do Pará. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 141-163, out./dez. 2017.
- QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. Porto Alegre, 2015. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- RAMADAN, A. *et al.* Modeling structural behavior of precast concrete pipe with single elliptical steel cage reinforcement. **Structures**, v. 27, p. 903-916, 2020.
- SILVA, J. L. **Análise de tubos circulares de concreto armado para o ensaio de compressão diametral com base na teoria da confiabilidade**. São Carlos, 2011. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- SILVA, J. L.; EL DEBS, M. K.; KATAOKA, M. N. A comparative experimental investigation of reinforced-concrete pipes under three-edge-bearing test: Spigot and Pocket and Ogee Joint pipes. **Acta Scientiarum Technology**, v. 40, e30860, 2018.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO BÁSICO. **Diagnóstico temático de drenagem e manejo de águas pluviais**: visão geral. Brasília, 2022a. Disponível em: https://arquivos-snis.mdr.gov.br/REPUBLICACAO_DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AP_SNIS_2022.pdf. Acesso em: 01 mar. 2023.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO BÁSICO. **Diagnóstico temático de serviços de água e esgoto**: visão geral. Brasília, 2022b. Disponível em: https://arquivos-snis.mdr.gov.br/REPUBLICACAO_DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2022.pdf. Acesso em: 01 mar. 2023.
- YAZHINI, E.; CHITRA, R. Performance study of fibre reinforced functionally graded concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128224, 2022.
- YOUNIS, A. *et al.* Modeling structural behavior of reinforced-concrete pipe with single, double and triple cage reinforcement. **Engineering Structures**, v. 240, p. 112374, 2021.

Paula Andreatti de Jesus

Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” | Av. Brasil, 56, Centro | Ilha Solteira - SP - Brasil | CEP 15385-007 | E-mail: paula.andreatti@unesp.br

José Luiz Pinheiro Melges

Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Redação de revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” | Tel.: (18) 3743-1212 | E-mail: jose.melges@unesp.br

Emerson Alexandro Bolandim

Metodologia, Supervisão, Redação de revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” | E-mail: emerson.bolandim@unesp.br

Ana Paula Fugii

Metodologia, Disponibilização de ferramentas.

Departamento de Engenharia Civil | Centro Universitário do Norte de São Paulo | Rua Ipiranga, 3460, Jardim Alto Rio Preto | São José do Rio Preto - SP - Brasil | CEP 15020-040 | Tel.: (17) 3203-2500 | E-mail: ana.fugii@unorte.edu.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.