

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

IAN BADDO DA MOTA

**AVALIAÇÃO DE VIGAS DE SEÇÃO T PRODUZIDAS EM CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM REFORÇO HÍBRIDO PARA O PRÉ-
DIMENSIONAMENTO DE TAMPA DE POÇO DE VISITA**

**Alegrete
2025**

IAN BADDO DA MOTA

**AVALIAÇÃO DE VIGAS DE SEÇÃO T PRODUZIDAS EM CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM REFORÇO HÍBRIDO PARA O PRÉ-
DIMENSIONAMENTO DE TAMPA DE POÇO DE VISITA**

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: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete
2025**

IAN BADDO DA MOTA

**AValiação DE VIGAS DE SEÇÃO T PRODUZIDAS EM CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM REFORÇO HÍBRIDO PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO
DE TAMPA DE POÇO DE VISITA**

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: 05 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. DSc. EDERLI MARANGON - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD- UNIPAMPA

Eng. Me. WAGNER DAMBROS FERNANDES - Avaliador Externo



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WAGNER DAMBROS FERNANDES, Usuário Externo**, em 11/12/2025, às 17:55, 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 **1922773** e o código CRC **D1CB05BF**.

Aos meus queridos avós Jaci Bilher Baddo e Cleofé de Miranda Baddo, *in memoriam*, dedico este trabalho, cujo amor, carinho e exemplo permanecem vivos em minha memória. Este trabalho é também fruto dos valores que me transmitiram.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Jânio Bastos da Mota e Elizabeth Baddo da Mota, meus avós *in memoriam* Joana Soares de Bastos, Amado Paim da Mota, Jaci Bilher Baddo e Cleofé de Miranda Baddo e à minha companheira de vida, Quettin Fantti Baddo. Para mim, o significado de infinito se resume ao amor que tenho por vocês. Obrigado por todo o apoio, incentivo e amor incondicional ao longo desta jornada.

Ao grupo Modelagem e Análise Experimental de Compósitos – MAEC, em especial aos professores Ederli Marangon e Luis Eduardo Kostas, cujos ensinamentos, mentoria e puxões de orelha forjaram meu crescimento pessoal e acadêmico. Meu sincero muito obrigado.

Aos colegas de pesquisa Rubens Meichtry, Jaime Renck Neto, Jonathan Oliveira, Uemerson Soares, Amanda Lima, Diogo Becker, Samuel Walter, Thais Oliveira, Pedro Molina, João Vitor Mezalira, Luiz Eduardo Munhoz, Caroline Bremm, Luísa Inda, Daniela Padoin, Juliana Calage, Gisele de Lara, Luciele Campagnolo e Tayara Guerim. Cada um de vocês foi fundamental nesta conquista. Sou eternamente grato pela amizade, companheirismo e por cada risada compartilhada, que tornaram o caminho mais leve e me ajudaram diversas vezes, muitas vezes sem saber o quão bem me faziam.

Em especial, ao meu querido colega e principal parceiro de pesquisas e laboratório, Luan Rodrigues Garcia. Tua ajuda em cada passo dessa pesquisa foi imensurável. Minha gratidão por ti vai além do acadêmico. Obrigado por ser esse grande parceiro e amigo incansável.

Aos técnicos do LEMAC, Marcelo Oliveira e Raquel Machado, sempre prestativos e de grande valia na produção deste trabalho.

Aos meus melhores amigos que fiz nessa jornada Roarque Borba Schlüter, Eduardo Cabral do Prado, Luis Felipe Oleques Pires e Otávio Freitas Nemitz. Vocês foram meus pilares nesta caminhada. Todo apoio, parceria, incontáveis risadas e os momentos juntos fizeram tudo isso valer a pena. Nasci filho único, mas em vocês encontrei os irmãos que a vida me deu. Aos demais amigos e colegas, saibam que meu carinho e admiração por vocês sempre foram verdadeiros. Cada um sabe o quão importante foi para mim.

Não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão a Robson Nery e Lucas Góez, companheiros incansáveis nesta reta final. Mais do que colegas de curso,

foram apoio constante nos momentos mais difíceis, quando o cansaço e a pressão quase me fizeram desistir. Acima de qualquer coisa, foram e sempre serão meus amigos, presentes, leais e fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À banca avaliadora, Wagner Dambros e Telmo Deifeld. Sua contribuição vai além deste trabalho. Acima de tudo, são amigos que a UNIPAMPA me trouxe.

Às empresas Pilecco Nobre, Sílica Verde, Postes Indaial, Madeireira Linden, Construtora Alegretense e RITT Empreendimentos, pelo apoio essencial com a doação de materiais e ao Setor de Imagem do Hospital de Guarnição de Alegrete, pelo fornecimento das imagens de raios X, que viabilizaram a execução deste trabalho. Meu mais sincero agradecimento.

Por fim, agradeço imensamente aos demais professores, técnicos e aos funcionários terceirizados da UNIPAMPA. Meu singelo muito obrigado.

"Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes".

Isaac Newton

RESUMO

No trabalho foi avaliado o comportamento estrutural à flexão de vigas de concreto autoadensável (CCA) de seção T, utilizando um sistema de reforço híbrido composto por fibras e armaduras de aço longitudinal. O objetivo principal foi fornecer subsídios técnicos para o pré-dimensionamento de tampas de poço de visita, visando o atendimento da classe de desempenho TB 450, cuja carga de projeto é de 75 kN, equivalente a uma referência proporcional de 25 kN por viga. A investigação abrangeu a comparação entre vigas de seção T e planas, ambas com e sem armadura de aço. A caracterização do material incluiu ensaios de compressão axial, que evidenciaram a alta resistência média de 85,27 MPa e o comportamento dúctil pós-pico. A análise microestrutural das placas por raios X confirmou a disposição aleatória das fibras e sua contribuição para a tenacidade à tração. Os resultados de resistência das vigas T demonstram que a armadura é o fator dominante na capacidade de carga última, com as vigas planas com armadura (PCB) superando em mais de três vezes a carga máxima das vigas reforçadas apenas com fibras (PSB). A presença da armadura elevou a tensão máxima de compressão no concreto nas vigas com barra (CB) em fatores que variaram de 4,4 a 6,8 vezes em relação às vigas sem barra (SB), confirmando o equilíbrio de forças internas exigido. Apesar da maior rigidez inicial conferida pela inércia da seção T, as vigas de seção T com geometria variável (VCB) apresentaram desempenho limitado, em função da ocorrência de falha prematura por cisalhamento, o que impediu a mobilização de sua capacidade máxima à flexão. Em relação ao desempenho à tenacidade, as fibras de aço foram cruciais no comportamento pós-fissuração e na contribuição para a resistência à aderência da armadura. Os resultados experimentais indicaram uma carga máxima de 15,06 kN para a configuração mais rígida. Apesar de não atingir a resistência necessária para a classe TB 450, o sistema demonstrou conformidade com os requisitos da classe TB 240, comprovando a sua viabilidade para aplicações de carga moderada. Ainda, observou-se que o reforço híbrido proporcionou um efetivo controle de fissuração e um comportamento dúctil após a primeira fenda, evidenciando o potencial do compósito para elementos de infraestrutura urbana.

Palavras-chave: Concreto autoadensável; fibras metálicas; sílica da casca de arroz; tampa de bueiro; reforço híbrido.

ABSTRACT

This study evaluated the structural flexural behavior of self-compacting concrete (SCC) beams with a T-section, utilizing a hybrid reinforcement system composed of steel fibers and conventional longitudinal reinforcement. The main objective was to provide technical support for the pre-dimensioning of manhole covers, aiming to meet the TB 450 performance class, which requires a design load of 75 kN, equivalent to a proportional reference of 25 kN per beam. The investigation included a comparison between T-section and planar (rectangular) beams, both with and without steel rebar. Material characterization included axial compression tests, which evidenced the high average strength of 85.27 MPa and the post-peak ductile behavior. The microstructural analysis of the plates using X-rays confirmed the random disposition of the fibers and their contribution to tensile tenacity. The resistance results demonstrate that the conventional reinforcement is the dominant factor in ultimate load capacity, with the planar beams with rebar (PCB) exceeding the maximum load of the fiber-only reinforced beams (PSB) by more than five times. The presence of the rebar increased the maximum compressive stress in the concrete of the reinforced beams (CB) by factors ranging from 4.4 to 6.8 compared to the unreinforced beams (SB), confirming the required internal force equilibrium. Despite the higher initial stiffness conferred by the T-section's inertia, performance was limited in some geometries, such as the T-section beams (VCB), which showed premature shear failure, preventing the mobilization of their full flexural capacity. Regarding tenacity performance, steel fibers were crucial in the post-cracking behavior and contributed to the bond resistance of the rebar. Experimental results indicated a maximum load of 15.06 kN for the stiffest configuration. Although the required strength for the TB 450 class was not achieved, the system demonstrated compliance with the TB 240 class requirements, proving its feasibility for moderate-load applications. Furthermore, it was observed that the hybrid reinforcement provided effective crack control and ductile behavior after the first crack, highlighting the composite's potential for urban infrastructure elements..

Keywords: Self-compacting concrete; steel fibers; rice husk silica; manhole cover; hybrid reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Poços de visita expostos após furto da tampa.	17
Figura 2 – Corte transversal do pavimento de uma via com grupos de instalação. .	25
Figura 3 – Tampa de poço de visita de ferro fundido.	27
Figura 4 – Vista inferior das propostas de tampas de poços de visita.	28
Figura 5 – seção viga T do modelo 1.	28
Figura 6 – Seção viga T da tampa 2.	29
Figura 7 - Formas de madeira para Vigas T.	30
Figura 8 – Dimensões da Placa.	30
Figura 9 - Estrutura usada para a moldagem das placas.	31
Figura 10 - Materiais utilizados.	31
Figura 11 – Misturador planetário estático CIBI M 600.	33
Figura 12 – Espalhamento do CAAF.	34
Figura 13 – Máquina universal de ensaios Instron.	35
Figura 14 – Configuração para ensaios das placas.	36
Figura 15 – Estrutura montada para ensaio das seções viga T.	38
Figura 16 – Configuração para ensaios das Vigas T.	38
Figura 17 – Rearranjo para ensaio de tração na flexão em 3 pontos nas TVCB.	40
Figura 18 – Amostras preparadas para radiografia.	40
Figura 19 – Comportamento tensão de compressão x deslocamento.	42
Figura 20 – Corpos de prova após ensaio de compressão axial.	43
Figura 21 - Comportamento tensão de flexão x deslocamento nas placas.	44
Figura 22 - Imagens ampliadas das fissuras principais e secundárias nas placas ensaiadas.	46
Figura 23 – Fissuras nas placas.	46
Figura 24 – Radiografia das placas.	47
Figura 25 – Comportamento carga x deslocamento vigas T sem barra	49
Figura 26 – Comportamento tensão x deslocamento no meio das vigas TSB.	49
Figura 27 – Mapa de fissura dos corpos de prova vigas TPSB após ensaio.	50
Figura 28 - Mapa de fissura dos corpos de prova vigas TPSB após ensaio.	50
Figura 29 - Comportamento carga x deslocamento das vigas T com barra.	53
Figura 30 - Comportamentos de tração na armadura e de compressão no concreto x deslocamento no meio das vigas TPCB.	53

Figura 31 - Comportamentos de tração na armadura e de compressão no concreto x deslocamento no meio das vigas TVCB.	54
Figura 32 – Corpos de prova viga TPCB após ensaio.	55
Figura 33 – Corpos de prova cisalhados junto ao apoio.	56
Figura 34 - Corpos de prova viga TVCB após o segundo ensaio.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência à compressão.	41
Tabela 2 – Comportamento à Flexão – Seção Placa.	43
Tabela 3 - Comportamento à tensão na Flexão - Vigas TSB.	48
Tabela 4 - Comportamento à tensão na Flexão - Vigas TCB	51
Tabela 5 - Comportamento à tensão na Flexão – segundo vão	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAA – Concreto Autoadensável
CAAF – Concreto Autoadensável com Fibras
CB – Com Barra
CP – Corpo de Prova
CV – Coeficiente de Variação
DP – Desvio Padrão
EN – European Norm (Norma Europeia)
FRC – Fibre Reinforced Concrete (Concreto Reforçado com Fibras)
LEMAC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção
MAEC – Modelagem e Análise Experimental de Compósitos
MPa – Megapascal
NBR – Norma Brasileira
SB – Sem Barra
SCA – Sílica da Casca de Arroz
TVCB – Viga T variável com barra
TVSB – Viga T variável sem barra
TPCB – Viga T plana com barra
TPSB – Viga T plana sem barra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos	19
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 Concreto autoadensável fibroso (CAAF).....	20
2.1.1 Concreto autoadensável (CAA).....	20
2.1.2 Aditivo Superplastificante	21
2.1.3 Agente Modificador de Viscosidade – VMA.....	22
2.1.4 Fibras Metálicas	24
2.2 Tampas de concreto.....	24
2.3 Critérios normativos para resistência das tampas de poços de visita	25
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Projeto das Seções das Tampas de Poços de Visita	26
3.1.1 Modelos de Referência.....	26
3.1.2 Propostas de seções	27
3.2 Materiais.....	31
3.3 Caracterização	32
3.3.1 Caracterização do SP.....	33
3.4 Produção do CAAF	33
3.5 Ensaio Mecânicos	35
3.5.1 Ensaio de compressão Axial	35
3.5.2 Ensaio de tração na flexão em três pontos nas placas	36
3.5.3 Ensaio de flexão das vigas T.....	37
3.6 Imagens de Raio-X.....	40
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41

4.1 Comportamento à Compressão Axial.....	41
4.2 Ensaio de Tração na Flexão em Três Pontos.....	43
4.2.1 Seção placa.....	43
4.2.2 Viga T sem barra.....	48
4.2.3 Viga T com barra.....	51
5 CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A crescente incidência de furtos de tampas de ferro fundido, incentivada pelo elevado valor de venda desse material, tem gerado uma série de transtornos em áreas urbanas. Esses furtos não apenas expõem pedestres, ciclistas e veículos a riscos de acidentes graves, como também impõem altos custos de reposição.

A Figura 1 mostra imagens de diferentes locais onde as tampas foram furtadas das vias.

Figura 1 – Poços de visita expostos após furto da tampa.



(a) Tampa furtada em Manaus-AM



(b) Tampa furtada em Recife-Pe

Fontes: G1 – PE (2022); Mesquita; A crítica (2019)

Os problemas gerados por essa prática vão além das perdas econômicas diretas. A ausência de tampas nos poços de visita compromete o funcionamento dos sistemas de drenagem, podendo causar obstruções e até enchentes em períodos de chuvas intensas. Além disso, as falhas na manutenção emergencial aumentam os riscos de danos ao patrimônio público e privado, agravando os prejuízos financeiros e sociais. Diante desse cenário, a busca por materiais alternativos ao ferro fundido tem se intensificado, visando soluções que sejam menos suscetíveis a furtos, ao mesmo tempo que mantenham a funcionalidade e a resistência, exigidas pelas normas técnicas.

Dentre as alternativas, destaca-se o concreto, reconhecido como o material mais importante para a construção civil (HELENE; ANDRADE; 2007), valorizado por sua resistência, durabilidade e custo acessível, que permite sua aplicação em diversas formas e estruturas. Entre as diferentes formulações de concretos disponíveis, o concreto autoadensável (CAA) surge como uma solução importante, especialmente

em aplicações que exigem fluidez, compactação eficiente e preenchimento de fôrmas complexas sem a necessidade de vibração mecânica. Desenvolvido no Japão, como resposta ao problema da baixa durabilidade de estruturas de concreto armado devido à falha de concretagem, especialmente onde é escassa a mão de obra qualificada (TUTIKIAN, 2004), o CAA é projetado para fluir e se distribuir uniformemente sob a ação da gravidade, garantindo homogeneidade, preenchimento e qualidade na execução.

Na busca para atender às exigências normativas para tampas de poços de visita, e reforçar o CAA para resistir aos esforços de tração, surge a possibilidade da inserção de fibras. Estudos destacam que fibras sintéticas e metálicas melhoram não apenas as propriedades mecânicas, mas também a capacidade de absorver tensões e prevenir a propagação de trincas no concreto (MOHAMED; ZUAITER, 2024 tradução nossa; KHAN *et al.*, 2023, tradução nossa). Nesse caso, as fibras metálicas emergem como uma solução altamente viável. Essas fibras, quando adicionadas ao concreto, distribuem-se de maneira aleatória dentro da matriz cimentícia, atuando como reforços capazes de melhorar a tenacidade do material. As fibras metálicas não apenas aumentam a resistência à tração e flexão, mas também reduzem a formação e propagação de fissuras sob cargas repetitivas, contribuindo para uma maior vida útil do material (SCHÄFER; BREITENBÜCHER, 2023, tradução nossa). No caso das tampas de poços de visita, que estão sujeitas a cargas repetitivas, além de possíveis choques mecânicos e tensões pontuais, a inclusão de fibras metálicas no CAA agrega benefícios para o aumento da durabilidade desse elemento estrutural.

Para atender à carga de segurança exigida para um trem-tipo TB-450, conforme especificado na ABNT NBR 7188:2024, as tampas de poço de visita devem ser projetadas para suportar cargas de 75 kN, correspondentes à carga exercida por uma roda.

É proposto o pré-dimensionamento de dois modelos de tampas de poços de visita, com diferentes geometrias em suas bases. Este pré-dimensionamento se dará em seções representativas das partes nervurada e da laje entre as nervuras de cada modelo. Essa metodologia fornece dados preliminares sobre o comportamento estrutural da tampa inteira e permite avaliar a viabilidade técnica da produção integral, reduzindo custos nos ensaios de uma tampa completa. Caso o uso de fibras metálicas e as alterações nas geometrias não sejam suficientes para atingir o valor mínimo de cargas necessário (75 kN ~ 7,5 toneladas), será implementado um reforço adicional

com barras de aço longitudinais, configurando um elemento estrutural híbrido. Essa abordagem busca atender os critérios de eficiência estrutural, aliando a trabalhabilidade e fluidez do CAA com fibras à capacidade de suporte adicional proporcionada pelas barras de aço, conforme recomendado por estudos anteriores (Gomes; Barros, 2009; Marangon, 2011; Jucá, 2020).

1.1 Objetivo geral

Analisar o projeto de geometrias e a resistência de seções de -vigas T, representativas de tampas de poços de visita, para avaliar o comportamento estrutural e otimizar o pré-dimensionamento das mesmas, a fim de atender às exigências normativas de carga de segurança estipuladas para um trem-tipo TB-450.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho mecânico à compressão axial do CAA;
- Analisar a resistência à flexão em três pontos de placas planas moldadas com CAA reforçado com fibras metálicas e avaliar/correlacionar a influência da distribuição das fibras obtidas através de imagens de raios X;
- Investigar a resistência à flexão em três pontos de vigas T moldadas com concreto autoadensável (CAA) reforçado com fibras metálicas;
- Avaliar a resistência à flexão em três pontos de vigas T moldadas com CAA, fibras metálicas e barras de aço longitudinais;

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Ao longo deste tópico, serão apresentados os principais conceitos e fundamentos relacionados ao tema da pesquisa. Inicialmente, serão discutidas as propriedades do concreto autoadensável (CAA), com destaque para os aditivos utilizados para otimizar suas características, como superplastificantes e modificadores de viscosidade, além das fibras metálicas que podem ser incorporadas para melhorar o desempenho do material. Além disso, serão discutidos o desenvolvimento e as exigências normativas para tampas de poços de visita de concreto, incluindo a

resistência necessária para suportar as cargas específicas, conforme as normas vigentes.

2.1 Concreto autoadensável fibroso (CAAF)

2.1.1 Concreto autoadensável (CAA)

O concreto autoadensável (CAA) destaca-se na engenharia civil devido à sua alta trabalhabilidade e capacidade de preencher formas complexas sem a necessidade de compactação mecânica. Esse material é projetado para fluir sob a ação da gravidade, mantendo homogeneidade e resistência à segregação. Angelin et al. (2018) ressaltam que a principal vantagem do CAA é a sua fluidez, que permite que ele se espalhe por formas e recantos de estruturas sem a necessidade de vibração ou compactação externa, o que facilita a aplicação em obras com geometria complexa. Além disso, a redução do uso de equipamentos mecânicos contribui para a diminuição dos custos e do tempo de execução das obras.

Sorkhabi e Naseri (2013, tradução nossa) pontuam que o CAA apresenta características específicas que o diferenciam do concreto convencional, especialmente no que se refere ao abatimento e à utilização de aditivos deve alcançar um abatimento superior a 600 mm, sem sinais de segregação da mistura, e ser capaz de manter seu fluxo. Ele é projetado para resistir a gradientes horizontais de até 3% e ser transportado por bombas com capacidade de operar com tubulações de pelo menos 10 metros de comprimento. Marangon (2011) destaca que, além desses parâmetros, o CAA deve ser cuidadosamente formulado para garantir a adequada interação entre os materiais constituintes e os aditivos, a fim de garantir que a mistura tenha a fluidez desejada sem comprometer a resistência ou a durabilidade da estrutura.

. Marangon (2011) explica que a adição de superplastificantes é crucial para atingir a fluidez necessária sem comprometer a resistência do concreto. Esses aditivos são projetados para reduzir a quantidade de água necessária para atingir a trabalhabilidade desejada, permitindo a redução na relação água/cimento e melhorando as propriedades mecânicas do CAA.

Em termos de resistência, Sorkhabi e Naseri (2013, tradução nossa) destacam que o CAA apresenta valores variáveis de acordo com o tempo. Inicialmente, a resistência à compressão situa-se entre 50 e 200 kg/cm² nas primeiras 15 a 20 horas a uma temperatura de 20 °C. Após 28 dias, essa resistência pode variar de 250 a 600 kg/cm². Além disso, devido à sua alta densidade e auto compactação, o CAA possui a capacidade de penetrar facilmente em áreas de difícil acesso ou em locais complexos, assegurando um preenchimento uniforme e de alta qualidade. Jucá (2020) acrescenta que, devido ao seu comportamento reológico e à alta coesão, o CAA é ideal para peças estruturais pré-moldadas, onde a precisão no preenchimento das formas e a resistência são fatores determinantes para garantir a qualidade e a segurança das construções.

A produção do CAA utiliza aditivos superplastificantes e materiais pozolânicos, como sílica ativa, que aumentam a coesão e a fluidez da mistura, essenciais para aplicações em peças estruturais pré-moldadas. Angelin et al. (2018) destacam que a adição de sílica ativa contribui para o aumento da resistência e durabilidade do CAA, além de melhorar suas propriedades reológicas, garantindo que o concreto atenda aos altos requisitos de desempenho, mesmo quando utilizado em peças com geometrias mais complexas.

2.1.2 Aditivo Superplastificante

Os superplastificantes têm se mostrado componentes de extrema relevância para o desempenho do concreto, especialmente em misturas que exigem elevada trabalhabilidade e redução da relação água/cimento. Esses aditivos têm a capacidade de modificar as propriedades reológicas da mistura, melhorando a dispersão das partículas de cimento e prevenindo a aglomeração das mesmas. Como resultado, a área superficial do cimento se torna mais disponível para o contato com a água, o que, por sua vez, acelera a taxa de hidratação do cimento, aumentando a resistência inicial da matriz e assegurando maior coesão e homogeneidade do concreto. Esse efeito positivo é particularmente importante para garantir que o concreto atenda aos requisitos de resistência e durabilidade, mesmo em ambientes mais exigentes, como em estruturas de grande porte e em condições extremas de clima (Evaristo et al., 2021).

De acordo com a NBR 11768-2:2019, os superplastificantes são definidos como aditivos que permitem uma redução significativa do conteúdo de água em uma mistura de concreto sem alterar sua consistência. Alternativamente, esses aditivos também podem aumentar o abatimento e a fluidez do concreto sem que haja alteração na quantidade de água. Esses dois efeitos podem ocorrer simultaneamente, o que promove concretos mais duráveis e resistentes, especialmente ao melhorar a trabalhabilidade sem prejudicar a resistência. A norma também classifica os superplastificantes em duas categorias: tipo I, que proporciona uma redução mínima de 12% no teor de água, e tipo II, que pode alcançar uma redução mínima de 20%.

A aplicação correta desses aditivos está diretamente relacionada ao desenvolvimento de concretos de alta qualidade, com melhor trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. No entanto, o uso inadequado ou excessivo de superplastificantes pode comprometer essas propriedades. Marangon (2011) destaca que a dosagem excessiva desses aditivos pode resultar na diminuição da coesão da mistura, o que pode levar a falhas de desempenho, como a perda de resistência mecânica do concreto endurecido. O autor também enfatiza que, quando utilizados de forma adequada, os superplastificantes promovem uma melhoria substancial na consistência e fluidez do concreto fresco, permitindo a obtenção de concretos mais homogêneos e com melhor acabamento. Esse efeito é particularmente importante quando se trata de concretos de alto desempenho, que exigem um controle rigoroso da consistência para evitar problemas durante a execução de obras, como fissuração ou segregação.

Além disso, os superplastificantes têm um papel fundamental na sustentabilidade da construção civil. Marangon (2011) salienta que, ao reduzir a quantidade de água e o conteúdo de cimento na mistura, os superplastificantes ajudam a reduzir as emissões de CO₂ associadas à fabricação de cimento, o que resulta em uma construção mais sustentável. Esse aspecto é essencial no contexto atual, onde práticas mais ecológicas e o uso responsável de materiais estão se tornando requisitos fundamentais para projetos de construção civil.

2.1.3 Agente Modificador de Viscosidade – VMA

Os agentes modificadores de viscosidade (VMAs) desempenham um papel crucial na melhoria das propriedades reológicas do concreto, especialmente em

concretos autoadensáveis e de alta trabalhabilidade. Segundo Evaristo et al. (2021), os VMAs são utilizados para aumentar a viscosidade da mistura de concreto, garantindo maior estabilidade e coesão entre seus componentes, evitando problemas como segregação e exsudação. Esses aditivos incluem polímeros orgânicos e sintéticos solúveis em água, como éteres de celulose e óxidos de polietileno, além de materiais inorgânicos como bentonita e sílica ativa, que melhoram a retenção de água e a estabilidade da mistura.

Conforme Chen et al. (2019), a ação dos VMAs é particularmente importante em aplicações que requerem maior controle reológico, como concretos autoadensáveis. Esses aditivos ajudam a controlar a fluidez e a viscosidade da mistura, permitindo que o concreto mantenha sua forma e estabilidade durante o processo de aplicação. O estudo de Chen et al. (2019, tradução nossa) também destaca que a eficácia dos VMAs está diretamente relacionada à dosagem aplicada, pois um excesso pode prejudicar a trabalhabilidade da mistura.

De acordo com Marangon (2011), o uso de VMAs é especialmente relevante em condições que exigem maior resistência à segregação, como em concretos submetidos a vibrações ou transportados por longas distâncias. O autor aponta que os VMAs atuam aumentando a coesão entre as partículas de cimento, o que resulta em maior uniformidade na mistura e, conseqüentemente, em melhor desempenho mecânico e durabilidade do concreto endurecido.

Jucá (2020) reforça que os VMAs desempenham um papel complementar aos superplastificantes, permitindo que a mistura atinja uma trabalhabilidade elevada sem comprometer a estabilidade. No entanto, o autor ressalta que a seleção do tipo de VMA deve ser compatível com as demais características da mistura, especialmente com o tipo de cimento utilizado, para evitar efeitos indesejados como a redução da resistência a longo prazo.

Portanto, os VMAs são fundamentais para garantir a estabilidade e a qualidade de concretos avançados, especialmente em aplicações que exigem alta trabalhabilidade e resistência à segregação. No entanto, sua utilização requer um equilíbrio cuidadoso entre dosagem, composição da mistura e propriedades desejadas do concreto (Evaristo et al., 2021; Chen et al., 2019 tradução nossa; Marangon, 2011; Jucá, 2020).

2.1.4 Fibras Metálicas

As fibras metálicas têm sido amplamente utilizadas no concreto devido à sua capacidade de melhorar propriedades mecânicas e a durabilidade do material. Conforme discutido por Al Rifai et al. (2024, tradução nossa), as fibras metálicas, especialmente as microfibras de aço, desempenham um papel significativo no reforço de concretos autoadensáveis de alta resistência, promovendo melhorias na resistência à compressão, tração por fendilhamento e flexão. Essas fibras, com diâmetro inferior a 0,3 mm, contribuem para a absorção de energia e o aumento da ductilidade do material, além de reduzirem a tendência ao bloqueio durante o processo de mistura.

Os benefícios das fibras metálicas também são reforçados por Khan et al. (2023, tradução nossa), que apontam o impacto dessas fibras no aumento da resistência à compressão em até 15%, dependendo da fração volumétrica e do aspecto geométrico das fibras. Eles destacam o efeito de ponte oferecido pelas fibras, que retarda a propagação de fissuras e aumenta a ductilidade do material. Além disso, o uso de fibras metálicas tem se mostrado eficaz em resistir a esforços de tração, elevando a resistência à tração do concreto em até 50%.

2.2 Tampas de concreto

A crescente busca por soluções econômicas e sustentáveis para a produção de tampas de poços de visita motivou investigações sobre o uso de concretos especiais como alternativa ao ferro fundido. As tampas de concreto apresentam vantagens econômicas e estruturais, mas demandam adequações para garantir resistência mecânica e durabilidade.

Pesquisas recentes destacam o uso do concreto autoadensável reforçado com fibras metálicas, como o *Ultra-High Performance Concrete* (UHPC). Este concreto apresenta resistência à compressão superior a 120 MPa e alta flexibilidade. (NGHIA, 2021, tradução nossa).

Paralelamente, a substituição parcial de agregados por resíduos tem sido explorada. Melo e Silva (2018) investigaram a substituição de até 30% de brita por

resíduos de vidro temperado, o que resultou em resistências mecânicas comparáveis ao concreto convencional (MELO; SILVA, 2018).

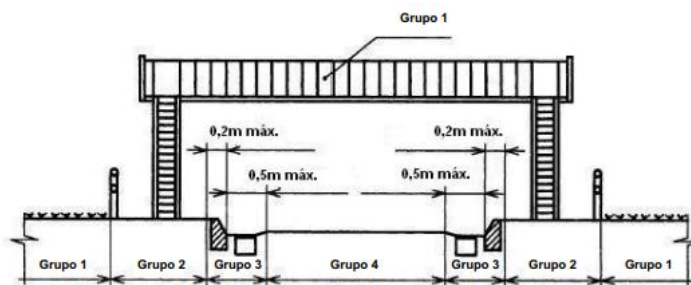
Outra abordagem envolve o uso de resinas vegetais associadas a resíduos minerais. Ferreira e Ribeiro (2019) combinaram resíduos de quartzitos com resina de poliuretano de óleo de mamona para criar compósitos com resistência à compressão de até 100 MPa. Esses materiais apresentaram baixa absorção de água (1%) e porosidade (1,6%), sendo leves e resistentes. Essas características favorecem a utilização em tampas de bueiros, especialmente por mitigar furtos devido à ausência de valor comercial dos materiais alternativos.

Essas abordagens demonstram o potencial de novas tecnologias e materiais alternativos para fabricação de tampas de bueiros, contribuindo para a sustentabilidade e segurança das infraestruturas urbanas.

2.3 Critérios normativos para resistência das tampas de poços de visita

A fabricação de tampas de concreto, como tampões e grelhas de ferro fundido, segue as diretrizes da ABNT NBR 10160:2005, que define os requisitos e os métodos de ensaio para a verificação da resistência dessas estruturas. A norma classifica as tampas de acordo com a resistência mecânica em seis classes, sendo que cada classe corresponde a uma carga mínima que a tampa pode suportar sem falhar. Além disso, a norma também especifica a classificação dos locais de instalação, divididos em grupos numerados de 1 a 4 (Figura 2), cada um atendendo a diferentes tipos de tráfego, que vão desde áreas com tráfego leve até vias de alto tráfego, com requisitos de resistência mais exigentes para as tampas.

Figura 2 – Corte transversal do pavimento de uma via com grupos de instalação.



Fonte: ABNT NBR 10160:2005

Essas tampas devem ser projetadas para resistir a condições severas de tráfego, com capacidade para suportar não apenas o peso dos veículos, mas também as cargas dinâmicas e os impactos associados.

A cota de passagem é um parâmetro crítico para o dimensionamento das tampas de concreto e refere-se ao maior diâmetro do círculo que pode ser inscrito na área livre do aro (desconsiderando apoios ou quaisquer saliências), destinado a receber a tampa ou a grelha. A ABNT NBR 10160:2005 define as dimensões da cota de passagem e as cargas de controle exigidas para verificar a resistência à carga dinâmica (segregação, impactos e tráfego contínuo), garantindo que as tampas possam suportar a pressão e os impactos de forma eficiente.

Além disso, a ABNT NBR 7188:2024, que trata das ações de tráfego rodoviário e pedestres em pontes, viadutos e passarelas, é fundamental para compreender as cargas dinâmicas às quais as tampas de concreto podem ser submetidas. Essa norma descreve os trens-tipo TB-450 e TB-250, que são utilizados para simular as condições de tráfego. O trem-tipo TB-450, por exemplo, é projetado para representar um veículo de 450 kN, com seis rodas, cada uma recebendo 75 kN, e representa uma solicitação característica de tráfego pesado, usualmente associada a vias com circulação de veículos comerciais e de grande porte. Nesse contexto, sua aplicação pode ser relacionada, de forma conceitual, às classes de tráfego mais elevadas previstas na ABNT NBR 10160:2005, notadamente aquelas correspondentes aos Grupos 3 e 4, destinados a áreas sujeitas a cargas mais severas. Ressalta-se, entretanto, que o presente estudo não tem como objetivo a classificação normativa direta das tampas ensaiadas segundo a NBR 10160, mas sim a avaliação experimental de sua capacidade resistente frente a uma solicitação representativa, permitindo uma análise comparativa do desempenho mecânico do material proposto.

3 METODOLOGIA

3.1 Projeto das Seções das Tampas de Poços de Visita

3.1.1 Modelos de Referência

A produção das tampas de poços de visita foi baseada em dois modelos comerciais amplamente utilizados em vias públicas, os quais serviram como

referência para as tampas projetadas em concreto autoadensável com inserção de fibras (CAAF).

O Modelo 1 possui diâmetro de 600 mm, com oito nervuras distribuídas simetricamente pela área da tampa. O Modelo 2 apresenta um diâmetro de 600 mm, composto por seis nervuras com espessura uniforme e alturas variáveis. As nervuras de ambos os modelos convergem para a região central da tampa. No modelo 1, a conexão das nervuras ocorre em torno de um elemento quadrado centralizado; no modelo 2, a ligação se dá por meio de um hexágono. Essa configuração geométrica na base atua como um reforço estrutural, principalmente para esforços de flexão, contribuindo para uma melhor distribuição dos esforços. Os modelos são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Tampa de poço de visita de ferro fundido.



(a) Tampa de ferro fundido modelo 1



(b) Tampa de ferro fundido modelo 2

Fonte: Autoria própria (2025).

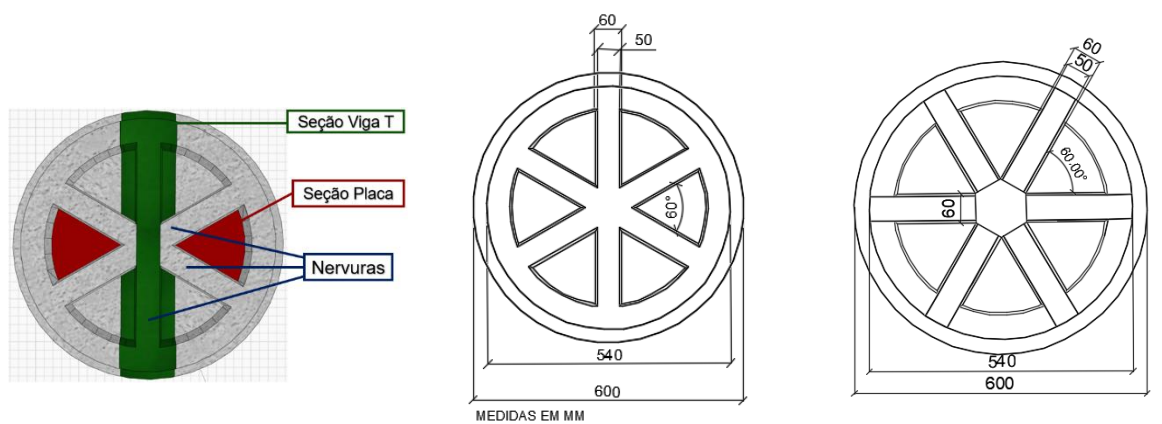
Com base nesses modelos, foram projetadas duas propostas de tampas para poços de visita em CAAF, com 600 mm de diâmetro, com o objetivo de comparar os resultados obtidos entre estes modelos.

3.1.2 Propostas de seções

O modelo da primeira proposta é apresentado na Figura 4 e foi elaborado com base na geometria do Modelo 1. A tampa 1 tem diâmetro de 600 mm e altura total de 60 mm. A altura foi estabelecida com base em estudos de Marangon (2011), cuja mistura C1.1,5%65, aplicada em painéis circulares com 100 mm de altura, obteve

resistência de 119,76 kN. Por meio de interpolação, estimou-se que 60 mm seriam suficientes para atingir a carga de 75 kN. Este modelo possui seis nervuras planas na parte inferior da tampa, com altura de 30 mm e o encontro entre elas formará ângulo interno de 60° . As extremidades das nervuras possuem um recuo de 30 mm em relação ao raio externo da laje superior da tampa. Esse recuo corresponde à área onde a tampa se apoia sobre o anel metálico.

Figura 4 – Vista inferior das propostas de tampas de poços de visita.



(a) Locais das seções na tampa

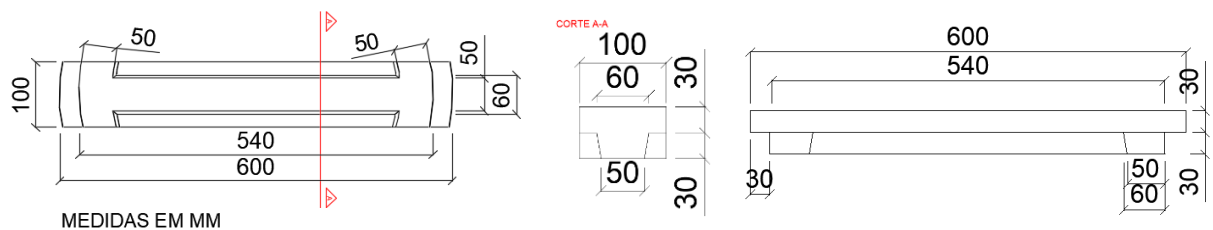
(b) Dimensões da tampa 1

(c) Dimensões da tampa 2

Fonte: Autoria própria (2025)

A seção viga T do modelo de tampa 1 (T plana), demonstrada na Figura 5, dispõe de 100 mm de largura (mesa), 600 mm de comprimento e 60 mm de altura. Apresenta uma única nervura centralizada ao longo de seu comprimento, mantendo recuo em relação às extremidades de 30 mm, e em sua altura possui um ângulo de $9,45^\circ$ de inclinação para facilitar a desmoldagem da tampa fundida em CAAF.

Figura 5 – seção viga T do modelo 1.



(a) Vista inferior da viga T plana

(b) corte A-A

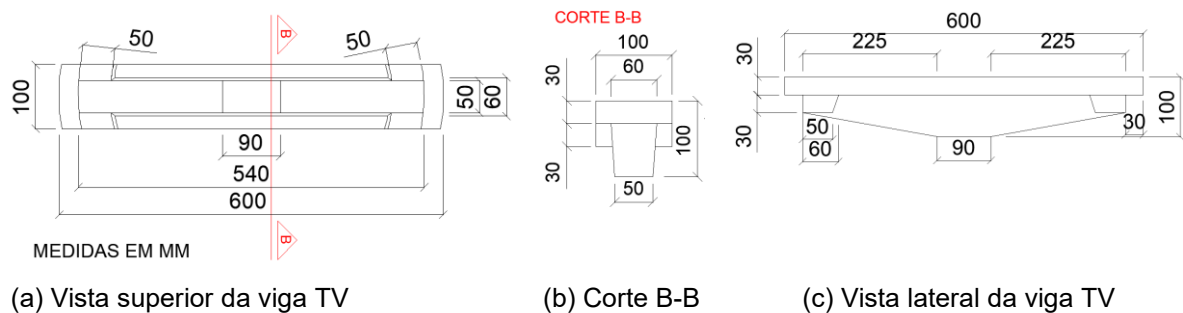
(c) Vista lateral da viga T plana

Fonte: Autoria própria (2025)

A modelagem da segunda proposta é demonstrada na Figura 4c, e apresenta uma diferença na geometria das nervuras da parte inferior da tampa em relação a primeira proposta, mantendo a mesma quantidade de nervuras, porém com uma inclinação variável das extremidades em direção ao centro da tampa, resultando numa altura de 100 mm.

A seção em viga T do modelo 2 (TV) é apresentada na Figura 6. A geometria da seção dispõe de 100 mm de largura da mesa e 600 mm de comprimento, sendo a laje superior mantida com espessura constante de 30 mm. A seção apresenta uma nervura central ao longo do comprimento, com recuo de 30 mm em cada extremidade. A altura da nervura varia ao longo do comprimento da viga, iniciando com 30 mm nas regiões de recuo e aumentando gradualmente por meio de superfícies inclinadas até atingir sua altura máxima de 70 mm. Essa altura máxima da nervura é mantida constante ao longo de um trecho central de 90 mm, resultando em uma altura total da seção de 100 mm nessa região, conforme ilustrado na Figura 6c.

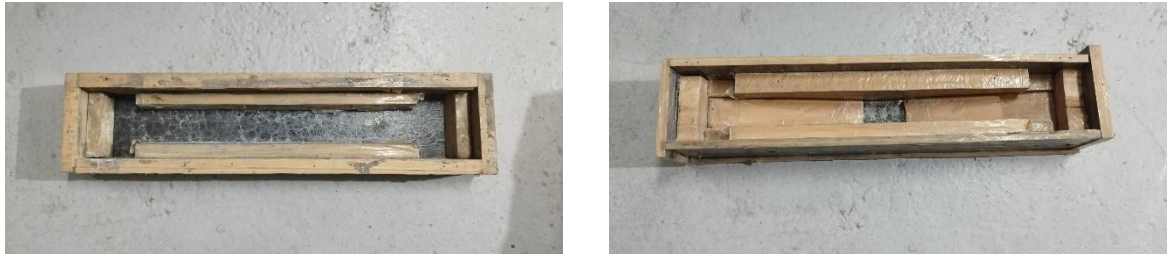
Figura 6 – Seção viga T da tampa 2.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a produção de ambas as propostas de vigas T, foram confeccionadas formas em madeira, produzidas conforme as respectivas geometrias e fixadas com parafusos, de modo a permitir sua desmontagem no momento da desmoldagem. As formas montadas podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7 - Formas de madeira para Vigas T.



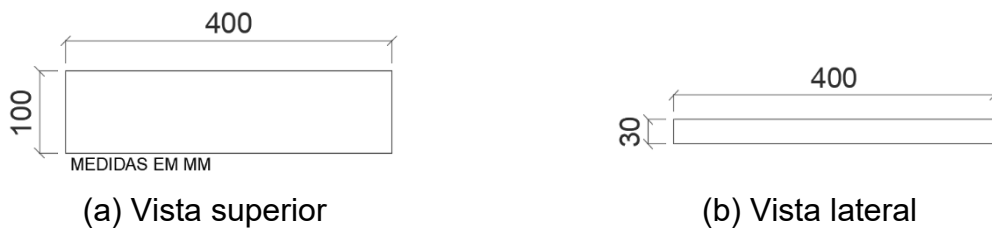
(a) Forma para Viga T plana

(b) Forma para Viga T variável

Fonte: Autoria própria (2025)

A seção placa que representa a laje entre as nervuras (Figura 8a) é representada por uma peça de concreto com 400 mm de comprimento, 100 mm de largura e 30 mm de altura (Figura 8).

Figura 8 – Dimensões da Placa.



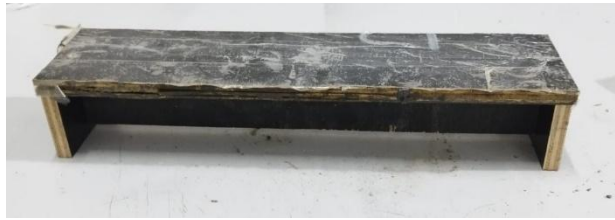
(a) Vista superior

(b) Vista lateral

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a moldagem dessa seção, foram utilizadas as fôrmas de metal disponíveis no LEMAC – Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Universidade Federal do Pampa – Unipampa. As fôrmas possuem as dimensões de 400 mm de comprimento, 100 mm de largura e 100 mm de altura. Como a altura das fôrmas é superior à necessária para a seção em forma de placa, foi confeccionada uma estrutura de madeira com 70 mm de altura (Figura 9), adaptada ao interior das fôrmas metálicas. Essa estrutura foi usada para limitar a altura do concreto e permitir a moldagem precisa das placas conforme as dimensões especificadas.

Figura 9 - Estrutura usada para a moldagem das placas.

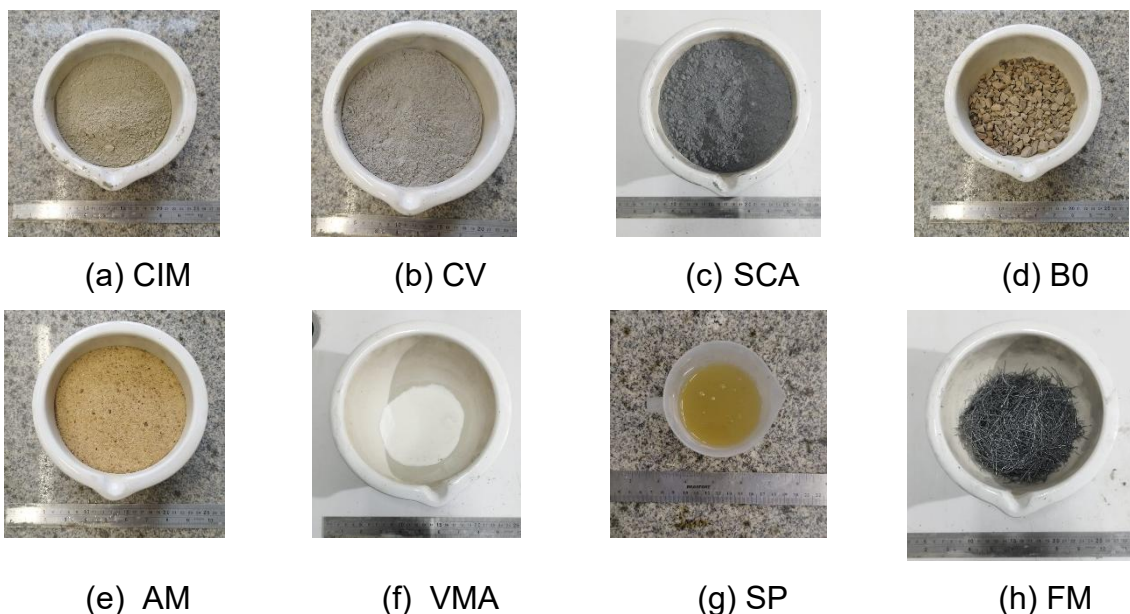


Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para a produção do concreto autoadensável com fibras (CAAF), foram cimento Portland V-ARI (CIM), cinza volante (CV), sílica da casca de arroz (SCA), brita 0 (B0) como agregado graúdo, areia média (AM) como agregado miúdo, agente modificador de viscosidade (VMA) Rheomac UW 410, superplastificante (SP) sintético MC-PowerFlow 4001, à base de policarboxilatos (PCE) e fibras metálicas (FM) Dramix 3D 65/35 BG, com diâmetro nominal de 0,55 mm e comprimento de 35 mm (Figura 10).

Figura 10 - Materiais utilizados.



Fonte: Autoria própria (2025)

Os materiais empregados na produção do concreto foram previamente caracterizados por Jucá (2020), cuja dissertação fornece informações detalhadas sobre as propriedades físicas e químicas desses insumos.

Algumas alterações foram realizadas na composição do concreto, como substituição da sílica #325 pela sílica da casca de arroz (SCA) que foi realizada considerando, como critério inicial, a similaridade entre as curvas granulométricas, o que permite uma comparação preliminar do efeito físico do material na matriz cimentícia. Ressalta-se, entretanto, que a similaridade granulométrica, por si só, não garante equivalência entre as propriedades químicas, reativas e morfológicas dos materiais, as quais podem influenciar significativamente o desempenho do concreto autoadensável.

O SP utilizado foi fornecido pelo grupo de pesquisa Modelagem e Análise Experimental de Compósitos (MAEC). A composição dos materiais utilizados é conforme os estudos de Jucá (2020).

3.3 Caracterização

Para a caracterização dos materiais empregados na produção do CAAF, foram adotados os valores obtidos nos estudos de Jucá (2020), com exceção do aditivo superplastificante, cuja caracterização foi realizada especificamente para esta pesquisa (Quadro 1).

Quadro 1 – Caracterização dos Materiais

Material	Propriedade	Valor
Cimento CPV ARI-RS	Massa específica	2,98 g/cm ³
Cinza Volante	Massa específica	1,98 g/cm ³
Sílica da Casca de Arroz	Dióxido de Silício (SiO ₂)	91,48%
Agregado Miúdo	Diâmetro máximo	1,18 mm
	Módulo de finura	2,00
	Massa específica	2,64 g/cm ³
Agregado Graúdo	Diâmetro máximo	9,5 mm
	Módulo de finura	5,79
	Massa específica	2,70 g/cm ³
	Massa específica aparente	2,54 g/cm ³
	Absorção de água	3,94%
	Massa unitária	1,33 g/cm ³

Fonte: Adaptado de Jucá 2020

3.3.1 Caracterização do SP

O SP utilizado na mistura foi caracterizado por meio da análise do teor de sólidos totais. Este ensaio determina a quantidade de substâncias sólidas presentes no SP, que são responsáveis pela melhoria das propriedades reológicas do concreto, como sua fluidez e trabalhabilidade. A determinação do teor de sólidos totais também é essencial para o ajuste da dosagem do aditivo na mistura, garantindo que a fluidez desejada seja alcançada sem comprometer a resistência do concreto.

O ensaio foi realizado conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 11768-3:2019. Os dados obtidos foram de densidade ($1,05 \text{ g/cm}^3$) e o teor de sólidos (28,3%)

3.4 Produção do CAAF

Para a mistura do concreto, foi utilizado o misturador planetário estático CIBI M 600 (Figura 11), que possui um volume de 600 litros e capacidade efetiva de 480 kg ou 200 litros, dependendo das condições operacionais e da densidade da mistura.

Figura 11 – Misturador planetário estático CIBI M 600.



(a) Misturador CIBI M 600



(b) Interior do misturador

Fonte: Autoria própria (2025)

Antes do preparo do CAAF, realizou-se a dosagem e pesagem criteriosa de todos os materiais, conforme o traço previamente calculado com base no volume

necessário para o preenchimento completo das formas, acrescido de 15% para compensar eventuais perdas durante o processo.

O CAAF foi preparado de modo organizado e cronometrado, conforme especificado a seguir:

- 1 – Umedeceu-se o misturador, para evitar que este absorvesse a água do traço;
- 2 – Adicionou-se o agregado graúdo B0 e o agregado miúdo AM, e misturou-se por 1 minuto;
- 3 – Adicionou-se os materiais cimentícios, CIM, CV e SCA, e misturou-se por mais 1 minuto;
- 4 – Com o misturador em movimento, acrescentou-se 80% do volume de água;
- 5 – Incorporou-se o SP;
- 6 – Finalizou-se a adição da água e realizou-se a mistura por mais 10 minutos;
- 7 – Foi interrompido o processo de mistura por 1 minuto para realização da raspagem;
- 8 – Após foram colocadas as fibras e misturou-se por 4 minutos;
- 9 – Foi feito um ensaio de espalhamento do tronco de cone de acordo com a ABNT NBR 15823-2:2017, o resultado foi acima de 60 cm, logo mostrou-se necessária a inserção do VMA;
- 10 – Acrescentou-se o VMA e misturou-se por mais 5 minutos.
- 11 – Após o preparo foi feito um novo ensaio de espalhamento do tronco de cone, conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Espalhamento do CAAF.



Fonte: Autoria própria (2025)

Foram moldados 5 cubos, 3 placas, 6 vigas T planas sem barra (TPSB), 6 vigas T planas com barra (TPCB), 6 vigas T variáveis sem barra (TVSB), e 6 vigas T variáveis com barra (TVCB).

As barras de aço foram posicionadas com cobrimento de 5 mm na face inferior das vigas, de modo a acompanhar a geometria da base dos elementos. Ressalta-se que esse valor de cobrimento é inferior aos usualmente recomendados para elementos de concreto armado expostos a ambientes externos, sendo adotado neste estudo exclusivamente com finalidade experimental, visando à avaliação do comportamento estrutural dos elementos em ensaio. Após 48 horas da concretagem os corpos de prova foram desenformados cuidadosamente e acondicionados em câmara úmida para a cura do concreto por um período de 28 dias.

3.5 Ensaios Mecânicos

3.5.1 Ensaio de compressão Axial

O ensaio de compressão realizou-se em corpos de prova cúbicos, com dimensões de 100 x 100 x 100 mm.

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina universal de ensaios Instron, com capacidade de carga de 1500 kN (Figura 13). A carga foi aplicada de forma pontual, com uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,05mm/min.

Figura 13 – Máquina universal de ensaios Instron.



Fonte: Autoria própria (2025)

A tensão foi determinada pela Equação (Eq. 1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

σ = tensão de ruptura (MPa)

F = força máxima aplicada (N)

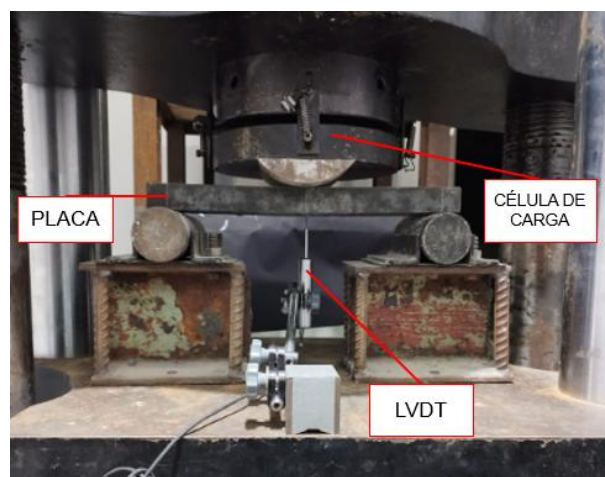
A = Área da seção transversal comprimida (mm²)

3.5.2 Ensaio de tração na flexão em três pontos nas placas

O ensaio de tração na flexão foi realizado na máquina universal de ensaios Instron com o objetivo de determinar a resistência à flexão em três pontos da placa. Um LVDT foi posicionado no centro da face inferior para monitorar deslocamentos. A seção foi posicionada em dois apoios, cada um posicionado a 25 mm de distância de cada extremidade. Uma carga pontual foi aplicada no centro da peça, em sua parte superior, conforme demonstrado na Figura 14.

Nos ensaios de flexão das vigas T planas sem barra, a primeira amostra (T3) foi submetida a carregamento com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min. Após esse teste inicial, a velocidade foi ajustada para 0,3 mm/min, sendo esse valor utilizado nas demais amostras do mesmo grupo.

Figura 14 – Configuração para ensaios das placas.



Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nas Equações 2 e 3, foi possível determinar a tensão de tração na flexão.

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

σ : tensão na fibra mais afastada da seção neutra (MPa)

M: momento fletor no centro da viga (N·mm)

y: distância do centroide até a borda da seção (mm)

I: momento de inércia da seção transversal (mm⁴)

O momento foi considerado com base em carga centralizada bi apoiada, determinado através da (Eq. 3).

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad (\text{Eq. 3})$$

3.5.3 Ensaio de flexão das vigas T

O programa experimental foi delineado para verificar a capacidade de suporte das vigas em relação à classe de desempenho TB 450. Para tal, estabeleceu-se a força pretendida de 25 kN por viga, valor de referência proporcional para a tampa completa, cuja carga total de projeto é de 75 kN. Reconhece-se que a equivalência adotada de 25 kN por viga constitui uma simplificação do comportamento real da tampa, uma vez que as condições de contorno do ensaio diferem daquelas observadas em tampas com bordo totalmente apoiado. Dessa forma, o valor adotado deve ser compreendido como um parâmetro de referência para avaliação comparativa do desempenho estrutural das vigas ensaiadas, e não como uma representação exata da carga atuante em serviço.

Para o ensaio de flexão realizado nas vigas T foi adaptada uma estrutura montada na máquina universal de ensaios Instron. Adotou-se uma configuração composta por quatro pilares metálicos posicionados sob um anel de ferro fundido. A estrutura está apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Estrutura montada para ensaio das seções viga T.



Fonte: Aatoria própria (2025)

Este anel possui diâmetro interno de 600 mm e inclui um rebaixo interno (freio) de aproximadamente 20 mm de largura. As vigas T foram posicionadas dentro do anel, simulando as condições reais de uso, com o apoio fornecido pelo rebaixo.

A carga foi aplicada no centro da seção viga T por meio do travessão da máquina de ensaios de com rótula de 25 cm, à uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,3 mm/min.

Foi posicionado um transdutor de deslocamento linear (LVDT) na face inferior, no comprimento médio do corpo de prova, para medir os deslocamentos verticais ao longo do ensaio (Figura 16).

Esta configuração permitiu uma análise da resistência à flexão em três pontos e o monitoramento das fissuras até o ponto de ruptura.

Figura 16 – Configuração para ensaios das Vigas T.



Fonte: Aatoria própria (2025)

Para encontrar a tensão de tração na flexão nas amostras sem barra, foi utilizada a equação clássica da flexão simples (Eq. 2).

Para vigas reforçadas com barras de aço, foram utilizadas as equações baseadas na seção transformada, que consideram a contribuição da armadura por meio da área equivalente de concreto.

Inicialmente, foi determinada a posição da linha neutra da seção transversal por meio do equilíbrio do momento estático da seção transformada, conforme expresso na Eq. (4). Para as vigas armadas analisadas, verificou-se que a linha neutra permaneceu localizada integralmente no interior da mesa da seção. Nessas condições, a seção pode ser caracterizada como uma T falsa. Assim, para fins de cálculo das tensões normais, a seção pôde ser considerada equivalente a uma seção retangular. Com a posição da linha neutra definida, foram então determinadas as distâncias y em relação a essa linha, as quais foram utilizadas nas equações de flexão para o cálculo das tensões normais no concreto e na armadura.

$$bh' \cdot \left(\frac{h'}{2}\right) - \eta A_{aço}(d - h') = 0 \quad (4)$$

Onde:

b : largura da alma (mm)

h' : altura da parte comprimida (mm)

$A_{aço}$: área da barra de aço (mm²)

d : distância do centroide da armadura à borda comprimida (mm)

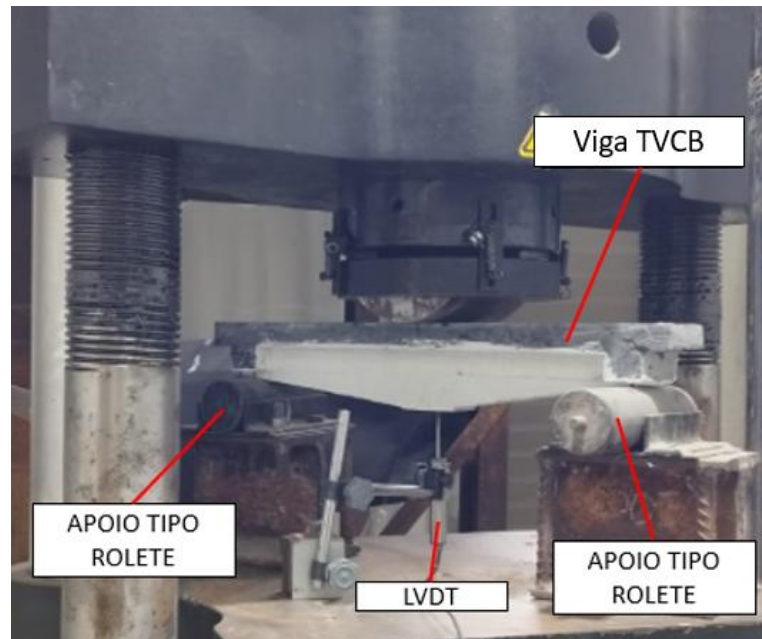
n : razão modular ($E_{aço}/E_{concreto}$)

O valor do módulo de elasticidade do aço foi considerado como 200 GPa. O módulo de elasticidade secante do concreto foi adotado com base nos estudos de Jucá (2020), que encontrou um valor de 33,85 GPa para concretos com características semelhantes ao utilizado neste trabalho.

Durante os ensaios iniciais das vigas T variáveis com barra (TVCB), foi identificada a ocorrência de rupturas por cisalhamento, localizadas na região de apoio, o que inviabilizou a análise precisa do comportamento à flexão. Para contornar essa limitação, foi realizado um segundo conjunto de ensaios com essas amostras, adotando-se uma redução do vão livre entre os apoios. Para os novos ensaios

realizados, a viga foi posicionada sobre dois apoios do tipo rolete, reduzindo o vão de 57cm (apoiado no anel de ferro fundido) para 52 cm. A carga foi aplicada verticalmente no centro da viga, caracterizando um ensaio de flexão com carregamento concentrado na região central, como demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Rearranjo para ensaio de tração na flexão em 3 pontos nas TVCB.

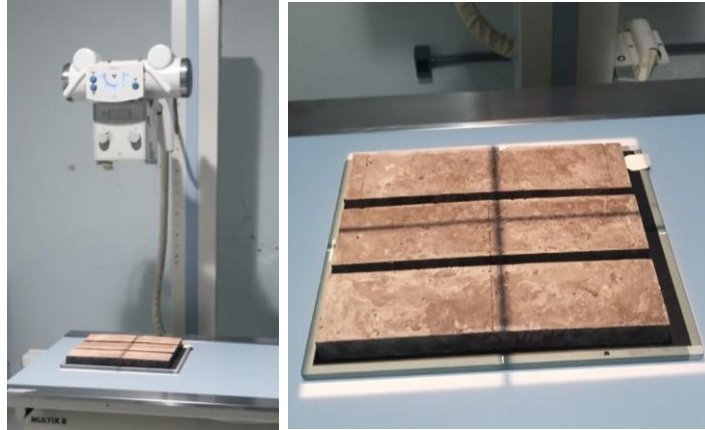


Fonte: Autoria própria (2025)

3.6 Imagens de Raio-X

As placas foram submetidas a análise por radiografia (raio-X) para avaliar a distribuição das fibras no interior do concreto, conforme a Figura 18. Esse procedimento permite uma visualização detalhada da dispersão das fibras metálicas dentro da matriz do concreto, contribuindo para a compreensão de seu comportamento estrutural e da eficiência do reforço. As imagens serão comparadas com os resultados dos ensaios de flexão nas placas.

Figura 18 – Amostras preparadas para radiografia.



Fonte: Autoria própria (2025)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados. Primeiramente, são discutidos os valores obtidos nos ensaios de compressão simples em corpos de prova cúbicos, seguidos dos resultados dos ensaios de flexão nas placas e vigas T.

4.1 Comportamento à Compressão Axial

Os ensaios de compressão axial foram realizados em corpos de prova cúbicos moldados com arestas de 100 mm. Foram testadas cinco amostras, e os valores de força máxima obtidos foram utilizados para o cálculo da tensão de ruptura à compressão.

A tensão máxima, média, desvio padrão e coeficiente de variação são apresentadas na

Tabela 1.

Tabela 1 - Resistência à compressão.

Amostras	Força máx (kN)	Compressão máx (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
CP1	857,73	85,77			
CP2	812,64	81,26			
CP3	851,17	85,12	85,27	4,70	5,51
CP4	937,06	93,71			

CP5

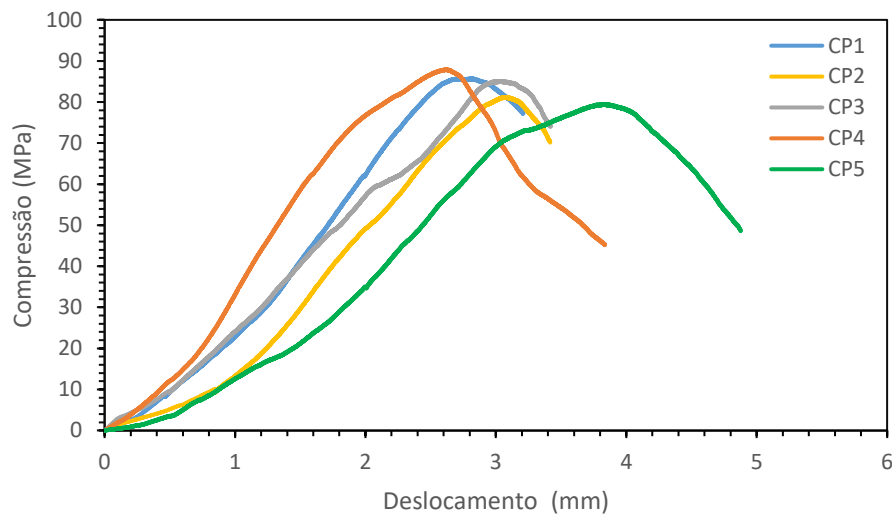
804,81

80,48

Fonte: Aatoria própria (2025)

Os comportamentos da resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos ensaiados à compressão axial, no que se refere à relação tensão x deslocamento da mesa da máquina de ensaios universais, são apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Comportamento tensão de compressão x deslocamento.



Fonte: Aatoria própria (2025)

A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de compressão axial revela uma tensão média de ruptura de 85,27 MPa. O desvio padrão foi de 4,70 MPa, indicando uma variação aceitável entre os resultados. O coeficiente de variação (CV) calculado foi de 5,51%.

As curvas de tensão x deslocamento dos corpos de prova submetidos à compressão axial exibem trechos retílineos paralelos na parte ascendente, indicando uma rigidez semelhante. Após o pico, o comportamento é de perda gradual da tensão com o aumento do deslocamento, indicando que as fibras estão agindo, fazendo pontes de ligação para manter e restringir os deslocamentos impostos.

A Figura 20 ilustra o aspecto dos corpos de prova após a realização dos ensaios de compressão simples. A ruptura ocorreu por esmagamento do concreto, com formação de fissuras predominantemente verticais, típicas de ensaios de compressão em corpos de prova cúbicos.

Figura 20 – Corpos de prova após ensaio de compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Ensaios de Tração na Flexão em Três Pontos

4.2.1 Seção placa

As placas, moldadas com o mesmo concreto utilizado nas vigas, foram ensaiadas com o objetivo de avaliar a resistência à tração na flexão em elementos planos. Os corpos de prova foram submetidos a carregamento central em apoio simples.

A Tabela 2 apresenta os valores de força máxima e as respectivas tensões de ruptura obtidas para cada amostra, bem como a tensão de tração e o deslocamento na primeira fissura.

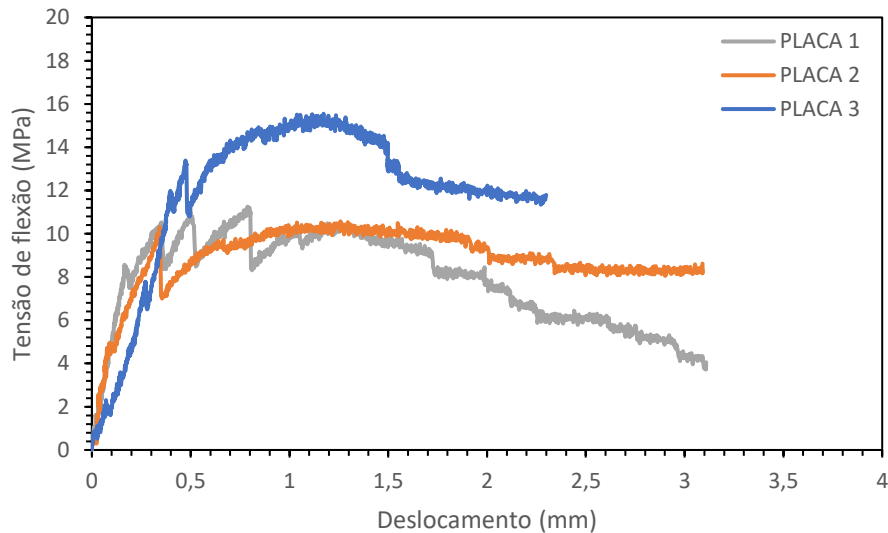
Tabela 2 – Comportamento à Flexão – Seção Placa.

Amostras	Força máx (kN)	Tração na primeira fissura (MPa)	Deslocamento na primeira fissura (mm)	Tração máx (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
Placa 1	1,90	3,82	0,07	11,25			
Placa 2	1,79	4,94	0,12	10,57	12,46	2,20	17,69
Placa 3	2,66	2,26	0,10	15,55			

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 21 apresenta os gráficos de carga em função do deslocamento obtidos nos ensaios das placas, permitindo observar o comportamento mecânico das amostras até o ponto de parada da máquina de ensaios.

Figura 21 - Comportamento tensão de flexão x deslocamento nas placas.



Fonte: Autoria própria (2025)

A tensão de tração e o deslocamento na primeira fissura apresentaram variações entre as amostras, com valores variando entre 2,26 MPa e 4,94 MPa. Essa dispersão está associada ao processo de início da fissuração, que ocorre ao longo do trecho ascendente do gráfico força \times deslocamento, sendo identificado por pequenas quedas abruptas de força antes do pico máximo. Embora, até esse ponto, o comportamento do compósito seja predominantemente dominado pela matriz de concreto, que representa aproximadamente 98% do volume do material, contra cerca de 1,5% de fibras, o surgimento das primeiras fissuras é influenciado por heterogeneidades locais da matriz cimentícia, como microfissuras e defeitos internos.

A causa mais provável para essa não uniformidade é a presença de defeitos micro, meso ou macroestruturais inerentes ao material, que podem estar relacionados à distribuição irregular da fibra no concreto, atuando como pontos de concentração de tensões em diferentes locais de cada amostra. Os deslocamentos de primeira fissura variaram entre 0,10 a 0,18 mm, estando dentro dos limites da literatura (RILEM TC 162-TDF 2001). Adicionalmente, normas específicas para ensaios de flexão em três pontos, como a ASTM C1609/C1609M (2019), permitem uma melhor interpretação do deslocamento na primeira fissura e do comportamento pós-fissuração.

A Tabela 2 apresenta a variação nos valores de tensão máxima obtidos nos ensaios, que foi de 10,57 MPa a 15,55 MPa. O coeficiente de variação calculado foi de 17,69%, que pode ser considerado um valor alto.

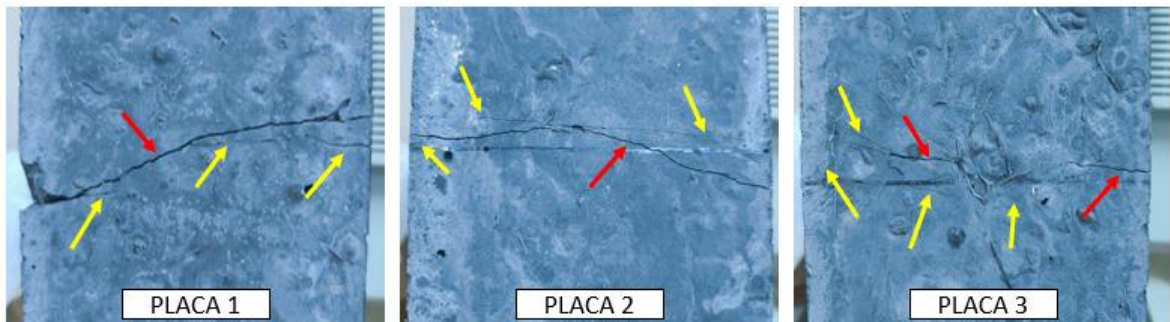
Essa elevada dispersão é um reflexo direto da heterogeneidade inerente ao concreto reforçado com fibras sob flexão. A resistência à tração na flexão em compósitos fibrosos depende crucialmente da orientação, da distribuição e do número de fibras que efetivamente cruzam a fissura principal (efeito ponte) na seção crítica. Visto que a dispersão das fibras é um processo essencialmente aleatório no CAAF, cada corpo de prova apresenta uma microestrutura única na zona de maior tensão. A diferença observada pode ser justificada pela variação na orientação das fibras. Estes aspectos serão avaliados em detalhe na página 58, com auxílio das imagens obtidas por raios X. Na Figura 21 observa-se que o ramo ascendente das curvas apresenta rigidez compatível entre si. Após a primeira fissura, há uma queda em todas elas, seguida da recuperação da carga até atingir seu pico máximo. Cada queda observada no gráfico pode ser atribuída a formação de uma nova fissura ou nucleação de fissuras no entorno da fissura principal, que pode ser aparente ou não. Esse comportamento é típico de amostras de material cimentício reforçado com fibras. Além disso, também é possível observar que, aproximadamente entre 0,5 mm e 2 mm, existe uma manutenção constante da carga, indicando que as fibras estão realizando pontes de ligação entre as fissuras. Após essa manutenção de carregamento há uma mudança de inclinação da curva descendente, mais acentuada, indicando a perda de aderência das fibras. Possivelmente nesse trecho ocorre somente o arrancamento das fibras da matriz, sendo a tensão superficial dominante, o atrito.

Na Figura 22 é possível observar imagens ampliadas das regiões fissuradas de cada uma das três placas analisadas, com destaque para a fissura principal evidenciada pela seta vermelha e para fissuras secundárias associadas demonstradas pelas setas amarelas. As imagens permitem uma observação mais precisa da morfologia das fissuras. Em todas as placas é possível identificar claramente uma fissura principal, que se desenvolve predominantemente na região central do elemento, acompanhando a trajetória típica de tração na flexão. Esta fissura principal é correspondente à primeira fissura observada nos gráficos.

Além disso, a morfologia das fissuras, evidenciada na Figura 22, revela a presença de fissuras secundárias ramificadas, menores e distribuídas em torno da fissura principal. Este fenômeno é o indicativo da elevada capacidade de absorção de

energia do material, pois as fibras atuam no efeito ponte através da fissura principal. Essa ação de reforço não só absorve e redistribui a energia de tração, como também retarda a propagação da fissura e evita a falha frágil.

Figura 22 - Imagens ampliadas das fissuras principais e secundárias nas placas ensaiadas.

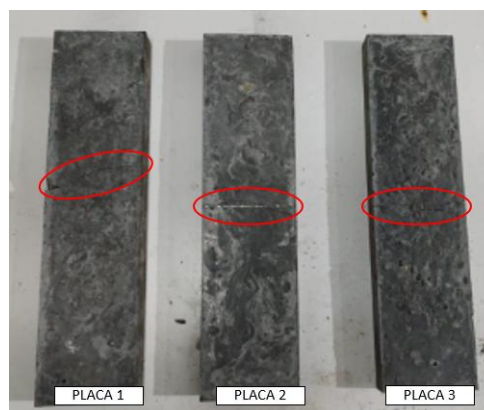


Fonte: Autoria própria (2025)

Como complemento à análise experimental das placas, foram obtidas imagens de raios X dos corpos de prova com o objetivo de avaliar qualitativamente a distribuição das fibras metálicas no interior do concreto. Essa técnica permite verificar a dispersão das fibras e avaliar o caminho que a fissura percorreu nos ensaios de flexão.

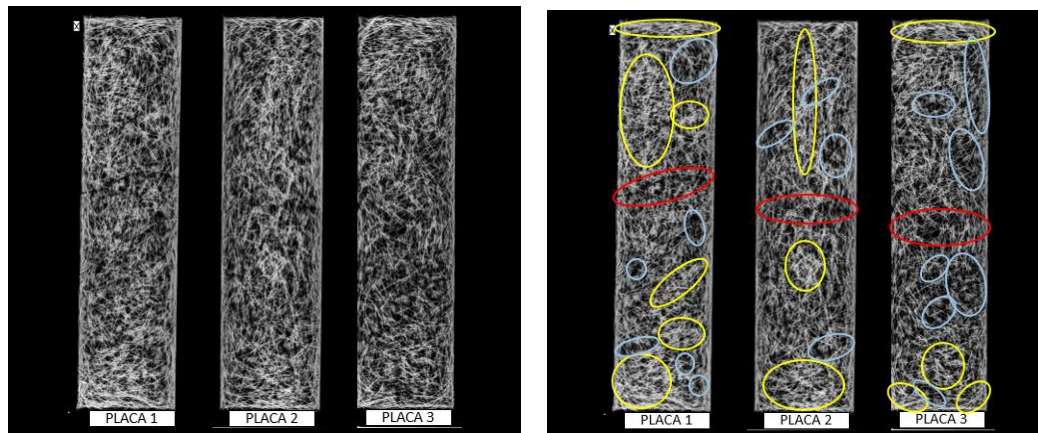
As Figura 23 e Figura 24 apresentam os locais de fissuração, bem como as imagens obtidas através da radiografia das três seções placas moldadas, evidenciando a orientação das fibras ao longo do corpo de prova.

Figura 23 – Fissuras nas placas.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 24 – Radiografia das placas.



(a) Radiografia das placas

(b) Radiografia com demarcações de fissuras, aglomerados e vazios

Fonte: Autoria própria (2025)

A avaliação da distribuição de fibras por meio de imagens de raio-X possui caráter essencialmente qualitativo, sendo empregada como ferramenta visual para a identificação de tendências gerais de dispersão no interior das placas. Nesse contexto, a distribuição observada pode ser considerada relativamente homogênea em escala global, embora a presença pontual de aglomerados de fibras e vazios indique que tal homogeneidade não é completa. Essas heterogeneidades locais podem contribuir para a elevada dispersão observada nos resultados dos ensaios mecânicos das placas, expressa pelo coeficiente de variação de 17,69%, não sendo possível, entretanto, estabelecer uma correlação direta e individualizada entre regiões específicas observadas nas imagens e o comportamento mecânico de cada placa ensaiada.

As regiões destacadas em vermelho indicam os locais onde ocorreram as fissuras durante o ensaio mecânico, indicando zonas críticas de concentração de tensões. Essas fissuras se concentram majoritariamente na região central das placas, indicando o caminho mais frágil encontrado onde ocorre o momento máximo de flexão.

As áreas marcadas em amarelo representam regiões maior concentração de fibras, evidenciando aglomerados que podem ter sido o resultado de falhas no processo de mistura ou lançamento do concreto autoadensável fibroso. A concentração irregular de fibras pode ocasionar heterogeneidade local, impactando negativamente o desempenho mecânico do compósito.

Por outro lado, as áreas destacadas em azul (e em vermelho também) indicam regiões com ausência ou baixa densidade de fibras, configurando zonas potencialmente vulneráveis à fissuração. A inexistência de fibras nessas regiões reduz a capacidade do material em controlar o avanço de microfissuras, o que pode justificar a ocorrência das falhas observadas.

4.2.2 Viga T sem barra

Os ensaios de flexão realizados nas vigas T planas e variáveis sem barra permitiram calcular a resistência máxima à tração e à compressão na flexão. As forças máximas registradas e as respectivas tensões são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Comportamento à tensão na Flexão - Vigas TSB.

Amostras	Força máx (kN)	Média (kN)	Tração na primeira fissura (MPa)	Deslocamento na primeira fissura (mm)	Tração máx (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
T1PSB	2,87		5,62	0,28	13,17			
T2PSB	2,83	2,85	5,13	0,16	13,02	13,10	0,08	0,58
T3PSB*	5,32		13,16	0,25	24,44			
T1VSB	11,27		12,36	0,12	18,84			
T2VSB	7,30	9,73	9,84	0,05	12,09	15,71	3,40	21,66
T3VSB	9,73		9,58	0,06	16,21			

* Ensaio feito com velocidade diferente, valores descartados para obtenção de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que entre as amostras planas, a T3PSB apresentou um comportamento significativamente superior, dado ao fato de a velocidade de carregamento de execução do ensaio ter sido diferente dos outros ensaios. Este valor foi descartado devido estar muito diferente dos outros dois.

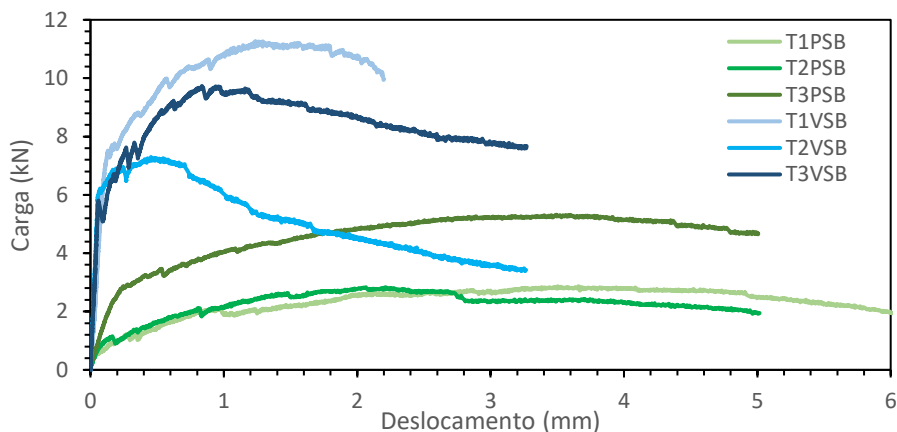
As amostras planas apresentaram uma tração média de primeira fissura de 5,38 MPa e uma tensão máxima de 13,10 MPa. A tensão máxima atingida é 2,43 vezes superior à tração de primeira fissura. Este aumento na capacidade é o principal indicativo da contribuição na resistência à flexão e na tenacidade conferida pelas fibras metálicas no regime pós-fissuração (Estádio II), demonstrando a capacidade do material em sustentar a carga após a fissura inicial.

Por outro lado, as amostras variáveis apresentaram uma tração média de primeira fissura de 10,59 MPa e uma tensão máxima de 15,71 MPa. A força máxima

média atingida por estas amostras foi de 9,73 kN, o que representa um aumento de 3,41 vezes em relação à capacidade das vigas planas (2,85 kN), indicando a influência da geometria da seção. A tensão máxima nas vigas variáveis é 1,61 vezes superior à tração de primeira fissura. Este ganho de resistência menor do que nas vigas planas, justifica-se pela entrada precoce na fase de fissuração. Um coeficiente de variação de 21,66% nas amostras variáveis aponta para uma elevada dispersão dos resultados, frequentemente relacionada a desafios no controle de qualidade da moldagem ou no posicionamento da armadura.

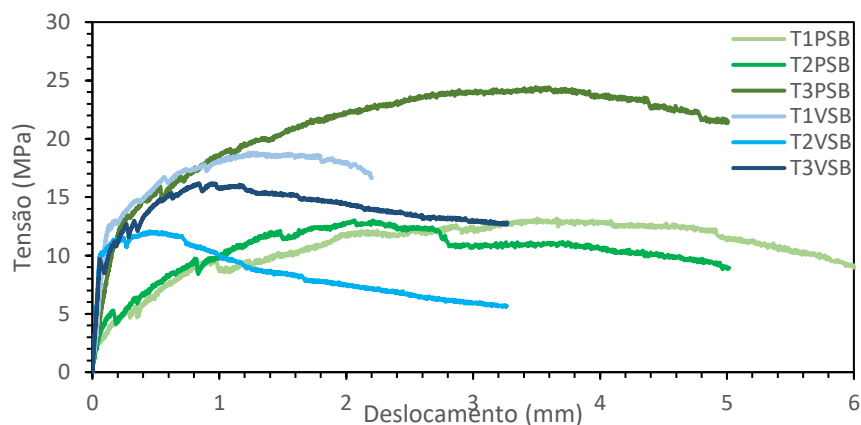
. As Figura 25 e Figura 26 apresentam os gráficos de carga x deslocamento e tensão calculada x deslocamento no meio da viga, evidenciando o comportamento mecânico das amostras.

Figura 25 – Comportamento carga x deslocamento vigas T sem barra



Fonte: Autoria própria

Figura 26 – Comportamento tensão x deslocamento no meio das vigas TSB.



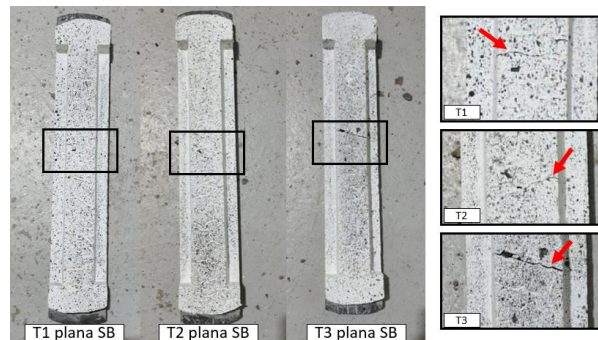
Fonte: Autoria própria

Nas vigas planas, nota-se um crescimento progressivo até o pico, seguido por uma redução gradual da capacidade resistente, quase que linear. O formato das curvas, levemente parabólico após a tensão máxima, indica que as vigas mantiveram capacidade de manutenção da carga mesmo após o início da fissuração. Esse comportamento só foi possível devido a inserção de fibras ao concreto, pois caso contrário as mesmas teriam ruptura frágil.

Em contrapartida, as vigas variáveis demonstraram um comportamento pós-pico menos expressivo. A redução da capacidade resistente após o pico de tensão se mostrou mais acentuada e menos gradual do que nas vigas planas

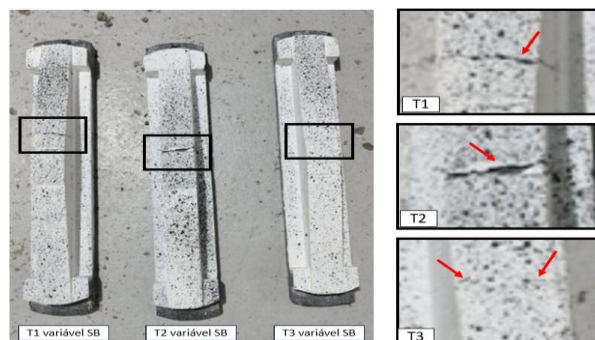
Complementando os gráficos, as Figura 27 e Figura 28 mostram as vigas TPSB e TVSB, respectivamente, após os ensaios de flexão. Nota-se que as fissuras ocorreram em regiões muito próximas entre as amostras, concentradas na parte inferior central das peças, onde se localiza o momento fletor máximo.

Figura 27 – Mapa de fissura dos corpos de prova vigas TPSB após ensaio.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 28 - Mapa de fissura dos corpos de prova vigas TPSB após ensaio.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.3 Viga T com barra

Nos ensaios das vigas T plana e variáveis com barra, foram obtidos os valores de carga máxima, tração e deslocamento na primeira fissura, bem como as tensões máximas nas regiões tracionadas (barra de aço) e comprimidas da seção demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comportamento à tensão na Flexão - Vigas TCB

Amostras	Carga máx (kN)	Tração na primeira fissura (MPa)	Deslocamento na primeira fissura (mm)	Tração máx armadura (MPa)	Média (MPa) / DP / CV (%)	Compressão máx concreto (MPa)	Média (MPa) / DP / CV (%)
T1PCB	14,41	14,77	0,15	391,16	393,36	88,98	89,48
T2PCB	15,06	10,25	0,21	408,90	14,56	93,01	3,31
T3PCB	14,00	19,78	0,46	380,03	3,70	86,45	3,70
T1VCB	14,8	15,06	0,11	229,03	203,56	38,72	34,41
T2VCB	13,21	15,49	0,17	204,57	25,99	34,58	4,39
T3VCB	11,44	16,4	0,17	177,07	12,77	29,94	12,77

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que entre as vigas planas com barra, os valores de tração na primeira fissura apresentaram uma variação considerável, situando-se entre 10,25 MPa (T2PCB) e 19,78 MPa (T3PCB). Os deslocamentos nessa fase inicial se mantiveram relativamente baixos, variando de 0,15 mm a 0,46 mm. A ampla dispersão da tração na primeira fissura contribuiu para o coeficiente de variação de 3,70% na tensão máxima de tração nas PCB.

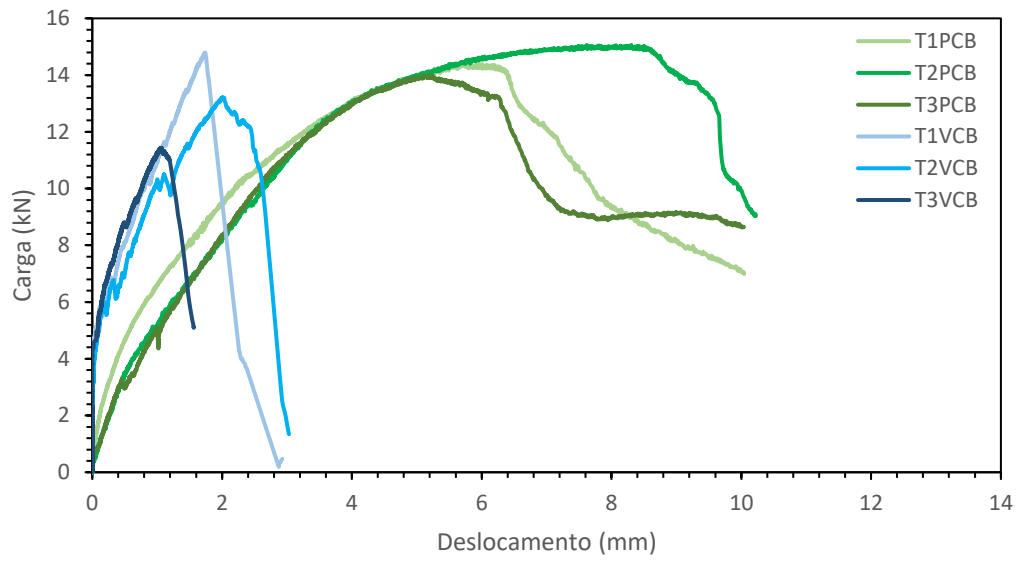
Entre as amostras VCB, os valores de tensão de tração na primeira fissura foram mais elevados e homogêneos, variando de 15,06 MPa a 16,40 MPa, enquanto os deslocamentos na primeira fissura se mantiveram reduzidos, entre 0,11 mm e 0,17 mm, evidenciando a maior rigidez inicial da seção em comparação às vigas planas. Durante o primeiro ensaio, as vigas VCB apresentaram ruptura prematura por cisalhamento, o que condicionou o comportamento observado no estágio último. Em função desse modo de falha, a carga máxima média suportada pelas amostras VCB foi de 13,15 kN, valor inferior à média das vigas planas (14,49 kN). Essa diferença não deve ser interpretada como uma limitação intrínseca da geometria variável à flexão, mas como consequência direta da ruptura por cisalhamento, que impediu a mobilização plena da capacidade resistente à flexão, restringindo a comparação direta

de desempenho máximo entre os dois grupos. Nota-se também que o valor médio de tensão máxima de compressão no concreto das vigas PCB (89,48 MPa) foi superior ao valor de 85,27 MPa obtido nos ensaios de compressão axial. Esse resultado é validado pela observação de um leve esmagamento na parte superior da viga após o ensaio e justifica uma tensão de compressão acima da resistência característica.

As tensões máximas de tração nas vigas planas obtiveram uma média de 393,36 MPa, significativamente superior à média observada nas amostras variáveis de 203,56 MPa. O ganho de resistência entre a primeira fissura e o pico de tensão foi notavelmente mais expressivo nas vigas planas. Essa disparidade é explicada pelo modo de falha prematuro observado nas vigas VCB: o elemento estrutural falhou por um modo de falha não previsto, como a ruptura do apoio por cisalhamento, e não por flexão pura. Essa falha antecipada, induzida pela fragilidade geométrica ou pelas condições de contorno, impediu que a armadura de tração fosse mobilizada em sua capacidade máxima. Conseqüentemente, a tensão final registrada na armadura das VCB (203,56 MPa) é um valor que subestima a real capacidade de flexão da amostra, indicando que o ensaio foi interrompido antes que a barra de aço atingisse o escoamento. Este cenário demonstra que, para esta geometria, a resistência ao cisalhamento e a integridade da região de apoio se estabeleceram como o fator limitante de desempenho, e não a capacidade da seção à flexão. O coeficiente de variação para a tensão máxima de compressão reforça que as vigas variáveis apresentaram maior dispersão nos resultados (12,77%) do que as vigas planas (3,7%), indicando um comportamento mais uniforme das amostras planas neste quesito.

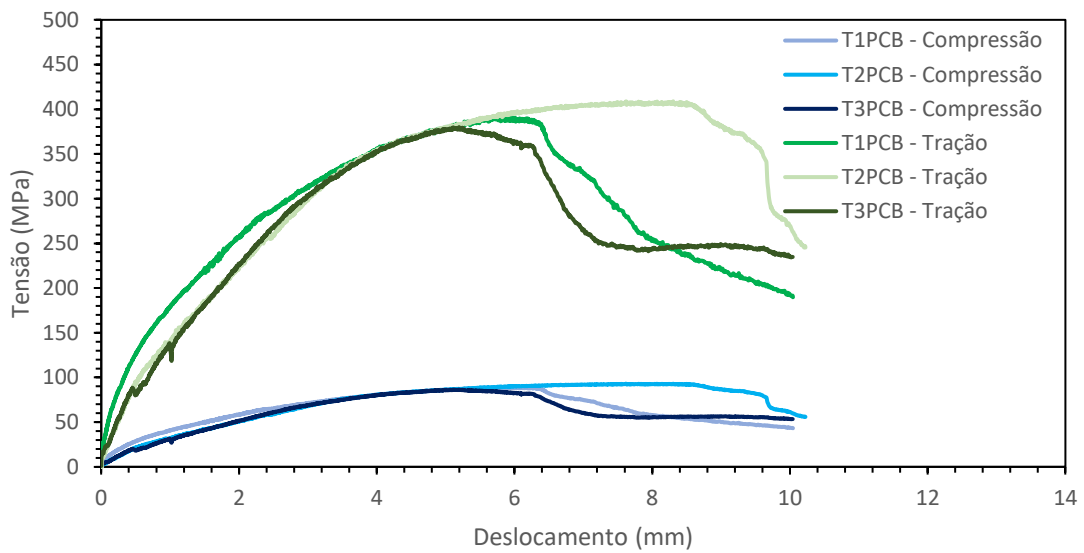
Na sequência, são apresentados os gráficos de carga x deslocamento do meio da viga (Figura 29) e o comportamento das tensões no concreto e na armadura x deslocamento para a viga plana (Figura 30) e para a viga variável (Figura 31).

Figura 29 - Comportamento carga x deslocamento das vigas T com barra.



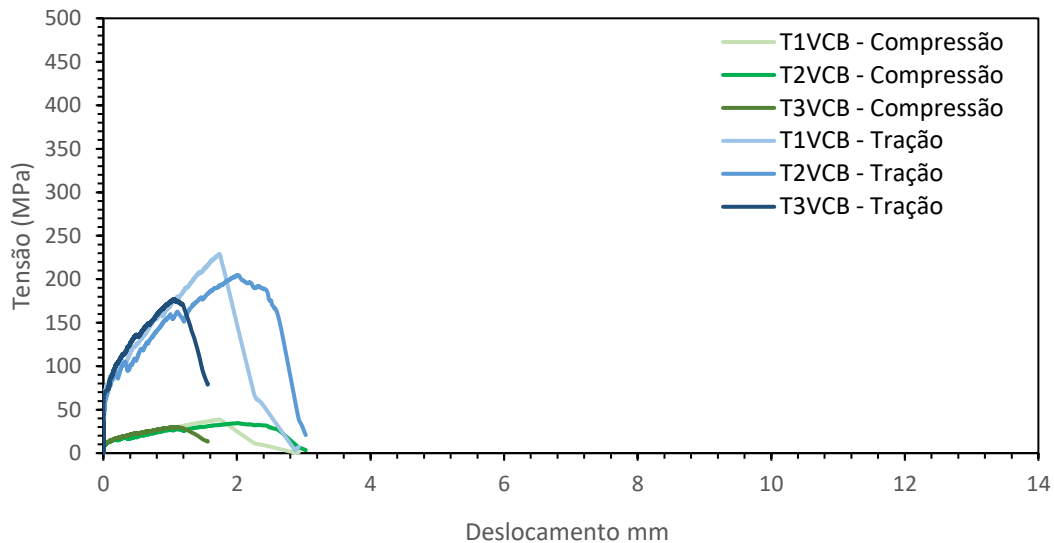
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 30 - Comportamentos de tração na armadura e de compressão no concreto x deslocamento no meio das vigas TPCB.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 31 - Comportamentos de tração na armadura e de compressão no concreto x deslocamento no meio das vigas TVCB.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 29, observa-se o comportamento carga \times deslocamento, com o comportamento das curvas semelhantes entre as amostras. As vigas apresentam resposta linear no início do carregamento, com inclinação equivalente entre as curvas, indicando comportamento elástico semelhante.

As Figura 30 e Figura 31 apresentam a evolução das tensões no concreto (compressão) e na armadura (tração) em função do deslocamento vertical no meio do vão das vigas T plana.

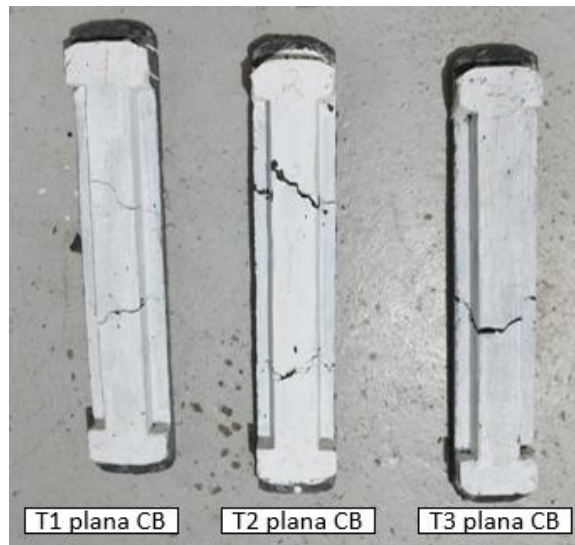
O comportamento das vigas com barra difere substancialmente daquele observado nas vigas sem barra. Nas amostras PSB, a resistência à tração era integralmente proporcionada pelas fibras no regime pós-fissuração (Estádio II). Essa diferença é quantificada pela capacidade de carga máxima, onde as vigas PCB atingiram uma média de 14,49 kN. Esse valor representa um aumento de mais de três vezes em relação à média das vigas PSB, que foi de 2,85 kN, demonstrando a dominância da armadura na capacidade final de resistência à flexão. Nas vigas com barra, embora a barra de aço absorva a maior parte da tração, o compósito de concreto reforçado com fibras abaixo da linha neutra ainda fornece uma tensão de tração pós-fissura que contribui para a capacidade estrutural, o que contrasta com a premissa adotada no dimensionamento em Estado Limite Último (ELU) da teoria

tradicional do concreto armado, na qual o concreto tracionado é desprezado no cálculo da resistência última, embora sua contribuição seja reconhecida no Estado Limite de Serviço (ELS)..

Outro fator que merece destaque da presença das fibras no compósito é sua contribuição significativa para o mecanismo de aderência entre o compósito de concreto e a armadura de aço. Esta observação é corroborada pelo mecanismo de aumento de rigidez por tração (*tension stiffening*) documentado por Marangon et al. (2025). Isso ocorre porque as fibras atuam como pontes nas microfissuras que se formam adjacentes à barra, limitando a abertura e a propagação das fissuras. Conseqüentemente, o melhor confinamento da armadura resulta em um aumento da resistência à aderência e uma ancoragem mais eficiente, retardando a perda de ligação.

Na Figura 32 é possível observar o modo de fratura dos corpos de prova das vigas TPCB após os ensaios de flexão.

Figura 32 – Corpos de prova viga TPCB após ensaio.



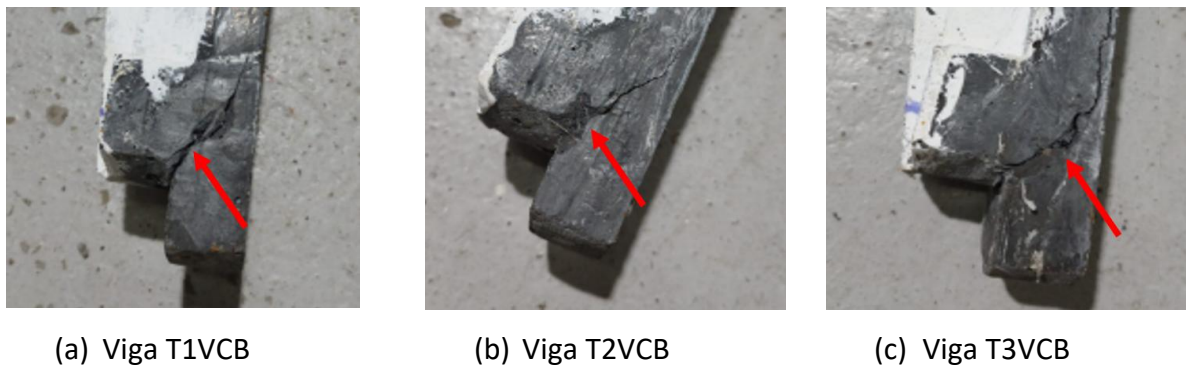
Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que as vigas T1 e T2 exibem duas fissuras localizadas próximas ao terço médio, mantendo simetria em relação ao centro da peça e um alinhamento com a rótula, o que pode significar que a falha ocorreu por cisalhamento.

Em comparação com as vigas TPSB, observa-se que as vigas com barra atingiram maiores deslocamentos até a ruptura.

Nas amostras da viga TVCB, a ruptura prematura por cisalhamento junto aos apoios (Figura 33) impossibilitou a análise integral da flexão na configuração original. Visando observar o comportamento sob flexão, realizou-se um ensaio complementar com ajuste do vão livre. Contudo, ressalta-se que, devido aos danos estruturais pré-existentes, estes resultados possuem caráter estritamente exploratório e não são comparáveis quantitativamente às demais séries.

Figura 33 – Corpos de prova cisalhados junto ao apoio.



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a adaptação do ensaio com a redução do vão livre, os corpos de prova da viga TVCB apresentaram ruptura predominante na região central inferior, conforme mostrado na Figura 34. Essa nova configuração possibilitou que o colapso ocorresse por flexão, permitindo a obtenção de dados á flexão das vigas. A presença da barra de aço contribuiu para a formação de fissuras mais graduais e para um comportamento estrutural mais dúctil.

Figura 34 - Corpos de prova viga TVCB após o segundo ensaio.



Fonte: Autoria própria (2025)

O comportamento mecânico das vigas T variáveis com barra, após o ajuste do vão livre, é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Comportamento à tensão na Flexão – segundo vão

Amostras	Força máx (kN)	Média (kN)	Tração na primeira fissura (MPa)	Deslocamento na primeira fissura (mm)	Tração máx armadura (MPa)	Média (kN) / DP / CV (%)	Compressão máx concreto (MPa)	Média (kN) / DP / CV (%)
T1VCB	18,93		4,34	0,15	228,88	203,82	38,69	34,46
T2VCB	16,31	16,31	3,86	0,16	197,21	22,49	33,34	3,80
T3VCB	15,33		5,19	0,14	185,38	11,04	31,34	11,04

Fonte: Aatoria própria (2025)

A análise dos resultados do segundo ensaio, conduzido com vão diferente (Tabela 5), mostra que a média das forças máximas obtidas para as vigas variáveis foi de 16,86 kN, sendo a amostra T1VCB a de maior resistência, com 18,93 kN. A força máxima obtida neste segundo ensaio, inclusive, superou a média do primeiro ensaio.

Entretanto, devido ao dano permanente causado pelo primeiro ensaio e à alteração no vão, não é possível realizar uma análise aprofundada e segura sobre a real capacidade de carga dessas vigas variáveis com barras, já que o elemento estrutural não estava em sua condição original de ensaio.

5 CONCLUSÃO

No trabalho foi avaliado o comportamento à flexão de vigas de seção T produzidas em concreto autoadensável com reforço híbrido (fibras e armadura de aço), com o objetivo de fornecer subsídios técnicos para o pré-dimensionamento de tampas de poço de visita, visando o atendimento da classe de desempenho TB-450.

Os ensaios de compressão axial evidenciam a elevada resistência do concreto autoadensável, com o material alcançando aproximadamente 85 MPa. A presença das fibras de aço demonstrou ser crucial para a melhoria do comportamento pós-pico da matriz. O reforço de fibras de aço contribuiu para um modo de falha mais gradual e dúctil, o que aumentou a tenacidade do compósito e lhe conferiu uma capacidade residual de suporte de carga após o pico de tensão.

A análise da seção placa, que representa a laje da tampa e é composta por CAAF sem a presença de barra de aço, permitiu avaliar o desempenho do material à tração na flexão. Os ensaios registraram uma tração máxima média de 12,46 MPa, com um Coeficiente de Variação (CV) de 17,69%. Este CV relativamente alto reflete a heterogeneidade inerente ao compósito, onde a resistência é sensível à distribuição e orientação aleatória das fibras, conforme evidenciado pelas imagens de raios X. Estas imagens demonstraram que a disposição das fibras foi predominantemente aleatória, o que justifica a dispersão dos valores e o surgimento de uma fissura primária dominante seguida por fissuras secundárias menores. O comportamento pós-fissuração demonstrou a função primária do reforço fibroso: a manutenção de uma capacidade residual de suporte de carga, o que confirma a contribuição das fibras para a tenacidade da laje.

Para as vigas reforçadas apenas com fibras com geometria plana (PSB) foi obtido a carga máxima de 2,85 kN e uma média de tensão de tração na primeira fissura de 5,37 MPa, com deslocamento correspondente de 0,22 mm. Para a carga máxima a tensão foi de 13,1 MPa, com destaque para a baixa dispersão, com coeficiente de variação de 0,58%.

As vigas variáveis sem barras (VSB) apresentaram um valor máximo de carga de 9,73 kN. A tensão de tração média de primeira fissura para este grupo foi de 10,59 MPa, e o deslocamento para esse ponto foi de 0,15 mm (0,07 mm a menos).

Para os concretos com reforço híbrido, as vigas planas (PCB) demonstraram o maior desempenho em termos de resistência, atingindo uma carga máxima média de

14,49 kN. A fase de fissuração dessas vigas ocorreu com uma tração na primeira fissura de 14,93 MPa e um deslocamento de 0,27 mm. A tensão máxima de compressão calculada foi de 89,48 MPa e a de tração na armadura alcançou 393,36 MPa, com baixa dispersão nos resultados (Coeficiente de Variação de 3,70%). Por outro lado, as vigas de seção T variáveis (VCB) registraram uma carga máxima média de 13,15 kN e apresentaram maior rigidez inicial, com tração na primeira fissura de 15,65 MPa e deslocamento de 0,15 mm. Contudo, ressalta-se que estes resultados decorrem de um segundo estágio de ensaio, realizado após falha prematura por cisalhamento e com ajuste de vão. Em virtude dos danos estruturais pré-existentes e da alteração metodológica, tais valores possuem caráter meramente indicativo e exploratório, não sendo tecnicamente comparáveis aos resultados das demais séries em termos de capacidade de carga e desempenho resistente. A nova ruptura por cisalhamento impediu o pleno desenvolvimento do mecanismo de resistência, limitando as tensões calculadas de compressão (34,41 MPa) e tração na armadura (203,56 MPa) às condições de integridade comprometida das amostras.

A rigidez inicial das vigas de seção T (VCB), avaliada pela inclinação da curva carga versus deslocamento, mostrou-se superior à das vigas planas (PCB), resultado da maior altura útil conferida pela geometria. No que tange à capacidade de carga, a introdução do reforço híbrido elevou significativamente a capacidade de carga máxima. A capacidade de carga máxima das vigas com armadura (PCB), por exemplo, foi superior em mais de três vezes à capacidade das vigas reforçadas apenas com fibras (PSB), demonstrando que a armadura de aço foi determinante para esse acréscimo.

Essa elevação na capacidade de carga é diretamente refletida na zona de compressão: a tensão máxima de compressão no concreto das vigas com barra (CB) foi superior àquela observada no concreto das vigas sem barra (SB). Especificamente, a tensão máxima de compressão das vigas CB foi entre 4,4 (para as vigas variáveis) e 6,8 (para as vigas planas) vezes maior que as vigas SB. Este aumento da tensão máxima de compressão é uma consequência direta do princípio do equilíbrio de forças internas.

Quanto aos resultados do segundo ensaio das vigas TVCB, apresentados na Tabela 4, destaca-se que estes devem ser interpretados com cautela, uma vez que os elementos já apresentavam danos estruturais provenientes de ensaios anteriores. Conforme discutido na seção de resultados, essa condição inviabiliza uma análise

aprofundada e segura, não sendo, portanto, plenamente válida a comparação direta do desempenho estrutural dessas vigas com os demais modelos ensaiados.

Destaca-se que o cobrimento de 5 mm adotado nos ensaios, embora adequado para a avaliação do comportamento mecânico, não atende às exigências de durabilidade para elementos de infraestrutura, devendo ser revisto em aplicações reais.

Avaliando o desempenho global, nenhuma das configurações de vigas ensaiadas alcançou a força pretendida de aproximadamente 25 kN por viga, valor este estabelecido como referência proporcional para a tampa completa, cuja carga total de projeto é de 75 kN (dividido por 3 nervuras). A configuração mais resistente (TPCB) alcançou cargas máximas de 15,06 kN, ficando significativamente aquém do objetivo. Contudo, é fundamental salientar que, embora o protótipo não tenha atendido aos requisitos para a classe de maior solicitação pretendida, os valores obtidos permitem enquadrar o sistema na classificação TB 240, conforme os critérios da mesma norma. Assim, o modelo demonstra viabilidade técnica para aplicações em contextos de menor exigência de carga, onde o desempenho verificado é suficiente para garantir a segurança estrutural. Cabe ressaltar que a carga de 25 kN é uma estimativa de carregamento, e que sua consideração direta é falha, devido a que as condições de contorno de trabalho da tampa completa são favoráveis para o carregamento o qual ela é submetida.

Como continuidade do presente estudo, sugere-se a investigação do efeito do aumento da taxa de armadura longitudinal no comportamento estrutural das tampas, bem como a análise de modelos de viga plana com maior altura útil e cobrimento de armadura compatível com aplicações em infraestrutura. Recomenda-se, ainda, o aprofundamento da análise do comportamento ao cisalhamento das vigas VCB, visando compreender e mitigar esse modo de ruptura.

REFERÊNCIAS

AL RIFAI, Mohamed M.; SIKORA, Karol S.; HADI, Muhammad N. S. Effect of micro steel fibers volume fraction on behavior of high-strength self-compacting concrete. **Construction and building materials**, v. 450, n. 138709, p. 138709, 2024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138709>>. Acesso em: 04 nov. 2024.

ANGELIN, A. F.; CECHE LINTZ, R. C.; BARBOSA, L. A. G. Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 7, p. 76-94, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10160:2005** – Tampões e grelhas de ferro fundido: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768-2:2019** – Aditivos para concreto – Concreto autoadensável – Determinação da fluidez, viscosidade e resistência à segregação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768-3:2019** – Aditivos para concreto – Determinação do teor de sólidos totais. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-2:2017** – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual — Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605:2017** – Cimento Portland – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188:2024** – Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:2003** – Agregados para concreto – Determinação da granulometria. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:2006** – Agregados para concreto – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2006.

ASTM International. *ASTM C1609/C1609M: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 124: Gully tops and manhole tops for vehicular and pedestrian areas – Design requirements, type testing, marking, quality control. London: BSI Standards Publication, 2015.

CHEN, Yu; CHAVES FIGUEIREDO, Stefan; YALÇINKAYA, Çağlar; *et al.* The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing. **Materials**, v. 12, n. 9, p. 1374, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma12091374>>.

EVARISTO, W. F. de O.; ALMEIDA, V. L.; CAPUZZO, V. M. S. Influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, p. e13050, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/JMQkdbYkyq4r5hPwWshrsFC>. Acesso em: 05 nov. 2024.

FERREIRA, A. A.; RIBEIRO, R. C. Geração de tampas de bueiros formadas por resíduos de quartzitos e PU. In: **X Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste**. Fortaleza, 2019. Acesso em: 07 nov. 2024.

G1 PE. **Destruição e roubo de tampas de esgoto causam prejuízo de R\$ 32 milhões ao ano no Grande Recife**. *G1 Pernambuco*, 23 fev. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/destruicao-e-roubo-de-tampas-de-esgoto-causam-prejuizo-de-r-32-milhoes-ao-ano-no-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 03 nov. 2024.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. de. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. **São Paulo: Pini**, 2009.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de cimento Portland. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 2, p. 905-944, 2007.

JUCÁ, P. H. de O. **Avaliação do mecanismo de transferência de tensões e formação de fissuras no concreto autoadensável com reforço híbrido**. 2020. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2020.

KHAN, Hamza; RAHMAN, Syed Waqas Ur. **Composite Fibers in Concrete: Properties, Challenges, and Future Directions**. *Engineering Proceedings*, v. 44, n. 1, p. 17, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4591/44/1/17>. Acesso em: 06 nov. 2024.

MARANGON, E. **Caracterização material e estrutural de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**. 2011. 322 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MARANGON, Ederli; MOBASHER, Barzin; FERNANDES, Wagner Dambros; SILVA, Flávio de A.; RAMBO, Dimas A.S.; BATTISTA, Ronaldo C.; FAIRBAIRN, Eduardo M.R.; TOLEDO FILHO, Romildo D. Experimental investigation of tension stiffening in hybrid reinforced concrete ties. **Construction and Building Materials**, v. 458, art. 139505, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139505>. Acesso em: 01 nov. 2025.

MELO, G. M. M.; SILVA, M. A. A. da. Tampa de bueiro utilizando resíduo de vidro temperado como agregado graúdo. **Scientia Amazonia**, v. 1, p. 71-78, 2018. Acesso em: 05 nov. 2024.

Mesquita, Florêncio. **Roubo de tampas de bueiros ocasiona prejuízo de R\$1,5 milhão à Prefeitura de Manaus**. *A Crítica*, 2 jul. 2019. Disponível em: <https://www.acritica.com/manaus/roubo-de-tampas-de-bueiros-ocasiona-prejuizo-de-r-1-5-milh-o-a-prefeitura-de-manaus-1.114847>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MOHAMED, Osama; ZUAITER, Haya. Fresh properties, strength, and durability of fiber-reinforced geopolymer and conventional concrete: A review. **Polymers**, v. 16, n. 1, 2024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/polym16010141>>. Acesso em: 07 nov. 2024.

NGHIA, Hoang Tuan. Experimental study to produce manhole cover using ultra-high performance concrete. **International journal of GEOMATE**, v. 21, n. 85, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21660/2021.85.j2244>>. Acesso em: 06 nov. 2024.

SCHÄFER, Niklas; BREITENBÜCHER, Rolf. Microcrack behavior and fatigue performance of steel fiber reinforced concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 2023. Disponível em: <https://framcos.org>. Acesso em: 06 nov. 2024.

SORKHABI, Ramin Vafaei Pour; NASERI, Alireza. Studying the Strength of Self Compacting Concrete According to the Ratio of Plasticizers and Slump Flow Using Experimental Method. **Life Science Journal**, v. 10, n. 6s, p. 39-42, 2013. Disponível em: <http://www.lifesciencesite.com>. Acesso em: 11 nov. 2024.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.