



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS – CMPF
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ABNADABE FERREIRA GONÇALVES RODRIGUES

PROPOSTA DE MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO PARA CONSOLOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO

PAU DOS FERROS
2023

ABNADABE FERREIRA GONÇALVES RODRIGUES

PROPOSTA DE MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO PARA CONSOLOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Fernandes de
Araújo Silva.

PAU DOS FERROS
2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

RR696 Rodrigues, Abnadabe Ferreira Gonçalves.
p Proposta de modelo analítico de cálculo da
resistência ao cisalhamento para consolos com
adição de fibras de aço / Abnadabe Ferreira
Gonçalves Rodrigues. - 2023.
33 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Concreto armado. 2. Fibras de aço. 3.
Consolo. 4. Modelo de cálculo. I. Silva, Matheus
Fernandes de Araújo, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ABNADABE FERREIRA GONÇALVES RODRIGUES

**PROPOSTA DE MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO PARA CONSOLOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO SILVA**
Data: 15/04/2024 12:38:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Matheus Fernandes de Araújo Silva
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **JOSE HENRIQUE MACIEL DE QUEIROZ**
Data: 15/04/2024 14:21:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Jose Henrique Maciel de Queiroz
Primeiro Membro

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA**
Data: 17/04/2024 08:13:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Leonardo Henrique Borges de Oliveira
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me conduziu e me deu forças desde sempre, e sem ele nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais pelo enorme apoio, incentivo e dedicação ao meu trabalho desde o início. Foram eles que sempre batalharam e dedicaram-se para me proporcionarem o melhor.

Agradeço aos meus irmãos e namorada, que me apoiaram, contribuíram de forma direta e indireta, e sempre estiveram ao meu lado.

Expresso minha gratidão aos familiares e amigos por todo apoio durante essa jornada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva, pela dedicação, ensinamentos e por transmitir todo o conhecimento necessário, estando a frente e conduzindo esse trabalho de pesquisa.

*“Consagre ao senhor tudo o que você faz, e seus planos
serão bem-sucedidos.”*

(Provérbios 16:3)

RESUMO

O consolo desempenha um papel crucial como elemento estrutural de suporte para outros elementos, transferindo a carga aplicada para a face do pilar por meio de uma biela comprimida e seu dimensionamento é baseado no modelo biela-tirante. Dada a importância desse elemento, é relevante que nesses elementos haja um aumento de resistência, com isso, tem-se como uma das soluções a adição de fibras de aço. A introdução de fibras de aço na matriz de concreto surge como uma solução viável, já que essas fibras distribuem as tensões de forma uniforme por meio de fissuras, aumentando assim seu estado de limite último (ELU). O propósito deste estudo é propor um modelo analítico, visando consolos que em sua matriz de concreto apresentem fibras de aço, partindo de análises comparativas de um modelo analítico de cálculo e modelos experimentais. O presente estudo apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais relacionados ao tema em estudo. Além disso, compara resultados obtidos a partir de ensaios experimentais de consolos curtos com fibra de aço em sua matriz com os resultados teóricos de cálculo obtido por meio de modelos analíticos. Durante a análise comparativa, identificou-se a necessidade de ajustar o modelo de cálculo para melhor alinhar os resultados experimentais com os teóricos, uma vez que o modelo analítico original não incluía considerações sobre o volume de fibra. Após a revisão do modelo analítico, foi notada uma redução nos valores dos parâmetros estatísticos. Isso ocorreu devido ao aumento da precisão do cálculo, aproximando-o mais do resultado experimental, apresentando resultados bem satisfatórios.

Palavras-Chave: Concreto armado. Fibras de aço. Consolo. Modelo de cálculo.

ABSTRACT

The corbel plays a crucial role as a structural support element for other elements, transferring the applied load to the face of the column through a compressed strut and its design is based on the strut-tie model. Given the importance of this element, it is important that these elements have an increase in resistance, therefore, one of the solutions is the addition of steel fibers. The introduction of steel fibers into the concrete matrix appears as a viable solution, as these fibers distribute stress evenly through cracks, thus increasing their ultimate limit state (ELU). The purpose of this study is to propose an analytical model, aiming at corbels that have steel fibers in their concrete matrix, based on comparative analyzes of an analytical calculation model and experimental models. The present study presents a bibliographical review of the fundamental concepts related to the topic under study. Furthermore, it compares results obtained from experimental tests of short corbels with steel fiber in their matrix with theoretical calculation results obtained through analytical models. During the comparative analysis, the need to adjust the calculation model was identified to better align the experimental results with the theoretical ones, since the original analytical model did not include fiber volume considerations. After reviewing the analytical model, a reduction in the values of the statistical parameters was noted. This was due to the increase in the precision of the calculation, bringing it closer to the experimental result, presenting very satisfactory results.

Keywords: Reinforced concrete. Steel fibers. Corbels. Calculation model.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	PROBLEMATIZAÇÃO.....	10
3	OBJETIVOS	11
3.1	Gerais.....	11
3.2	Específicos.....	11
4	JUSTIFICATIVA.....	11
5	REVISÃO TEÓRICA	12
5.1	Consolo.....	12
5.2	Tipos de Ruptura	13
5.2.1	Ruptura por flexão	14
5.2.2	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida	14
5.2.3	Ruptura por cisalhamento	15
5.2.4	Ruptura por falha na ancoragem.....	15
5.2.5	Ruptura por esmagamento	16
5.2.6	Ruptura por ações horizontais	16
5.3	Concreto reforçado com fibras de aço.....	17
5.4	Modelos de cálculo para consolos.....	19
5.4.1	Modelo biela e tirante	19
5.4.2	Modelo de cálculo através da NBR 6062/2017	19
5.4.3	Fernandes e El Debs (2005).....	21
6	METODOLOGIA.....	23
7	RESULTADOS.....	24
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
	REFERÊNCIAS	31
	APÊNDICE	33

1 INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante evolução, podemos elencar como exemplo dessa evolução os elementos pré-fabricados, na qual são elementos produzidos fora do canteiro de obras, com um controle de qualidade rigoroso e que trazem diversos pontos positivos, entre eles: redução de perda de materiais, redução de tempo de obra, sustentabilidade, entre outros.

Um elemento pré-fabricado de significativa importância é o consolo, destacando-se pelo papel crucial que desempenha na estrutura global. Sua principal função consiste em transmitir as cargas externas, geralmente provenientes de vigas, até a face do pilar por meio de bielas comprimidas.

Considerando que o consolo é um elemento estrutural de ligação, ele apresenta uma notável relevância não só na distribuição dos esforços na estrutura, mas também na estabilidade global. Logo é de suma importância o estudo dessas ligações, tendo em vista que a forma em que a estrutura irá se comportar depende do conhecimento dessas ligações e de como ocorre a distribuição dos esforços.

De acordo com El Debs (2000), consolos desempenham o papel de suporte para outras partes da estrutura ou para cargas de utilização. Eles são frequentemente empregados na transferência de esforços da viga para a face do pilar, devido à sua conexão entre os elementos estruturais, especialmente em estruturas pré-fabricadas.

Conforme indicado por Hwang et al. (2000), o consolo desempenha um papel estrutural fundamental, oferecendo suporte a outros elementos e buscando redistribuir os esforços cortantes. Devido à sua função, compreender a conexão entre o consolo e o pilar é de extrema importância. O termo consolo, conforme definido por Hwang et al. (2000), refere-se a elementos com um equilíbrio em que a relação entre vão e altura útil é inferior a unidade. Nesse contexto, o modelo de cálculo baseado na teoria clássica de flexão revela-se inadequado para fornecer uma solução apropriada para este tipo específico de elemento estrutural.

NBR 6118/2023, categoriza o consolo em duas modalidades: consolo curto ou muito curto. O que determina sua classificação é a relação a/d que o consolo apresenta, onde “a” representa a distância da aplicação da carga até a face do pilar, e “d” corresponde à altura útil

do consolo. Se a condição ($0,5d \leq a \leq d$) for satisfeita, o consolo é considerado curto; caso contrário se ($a < 0,5d$), é classificado como muito curto.

Considerando a significativa importância desses elementos para a construção civil, torna-se imperativo buscar técnicas que aprimorem a resistência do concreto. Nesse contexto, a inclusão de fibras de aço no concreto surge como alternativa relevante. A ideia principal por trás dessa abordagem é a necessidade de elevar o estado limite último do elemento estrutural. Ao invés de o elemento se romper ao atingir o estágio de fissuração, as fibras de aço desempenham o papel de “ponte”, permitindo a transmissão dos esforços através da fissura.

Oliveira (2012) ilustra que uma das justificativa para a adição de fibras no concreto reside no fato de que essas fibras se dispersam de maneira aleatória na matriz do concreto, sendo capazes de costurar fissuras que possam surgir fora do alcance das armaduras tradicionais. Além disso, estudos indicam que as fibras de aço têm a capacidade de conferir confinamento ao concreto nas regiões das bielas de compressão, resultando, por conseguinte, em uma resistência mais elevada.

2 PROBLEMATIZAÇÃO

É reconhecido que, mesmo possuindo dimensões reduzidas, os consolos apresentam elevadas taxas de armaduras, desempenhando uma função de importância crucial para a estabilidade global da estrutura. Dado que o principal esforço atuante é o cortante, resultando em altas tensões de cisalhamento no elemento, seu comportamento estrutural não segue uma abordagem idênticas à das vigas, diferindo, neste caso, da teoria clássica da flexão.

O consolo é um elemento estrutural de grande relevância, uma vez que desempenha o papel de suporte para outros elementos na estrutura. Portanto, é fundamental ter uma compreensão sólida dos mecanismos de resistência aos esforços atuantes e adotar técnicas que aprimorem o desempenho desse elemento. Atualmente, observa-se uma carência de fundamento teóricos sólidos tanto na parte de projetos como de execução desses elementos

Considerando que os modelos de cálculos de resistência ao cisalhamento, conforme descrito em normas e na maioria dos livros, focalizam exclusivamente o concreto convencional, é crucial empreender estudos e análises que validem modelos analíticos para o concreto reforçado com fibras de aço. A escassez de investigações pode ser atribuída, em parte, à complexidade inerente ao processo de transferência da força cortante nas fibras de

aço, o que torna desafiador antecipar com precisão o incremento na resistência ao cisalhamento do consolo com fibras de aço.

3 OBJETIVOS

3.1 Gerais

Propor um modelo analítico para calcular a resistência ao cisalhamento de consolos quando há a inclusão de fibras de aço no concreto. Este modelo fundamenta-se em uma análise de estudos experimentais.

3.2 Específicos

- Aprimorar base de dados obtidas em trabalhos anteriores;
- Analisar resultados experimentais de consolos com adição de fibra de aço;
- Corrigir a equação proposta por Fernandes e El Debs (2005).

4 JUSTIFICATIVA

Com a crescente utilização de elementos pré-fabricados faz-se necessário o estudo quanto a forma de moldagem e técnicas para garantir a qualidade dos elementos pré-fabricados, além disso, é de fundamental importância que esses elementos desempenhem sua função de forma que traga segurança e durabilidade para a edificação.

Como mencionado anteriormente, o consolo está sujeito ao esforço cortante, resultando em elevadas tensões de cisalhamento na interface do pilar. Nesse contexto, a inclusão de fibras de aço surge como uma solução para esse desafio, uma vez que essa adição proporciona um aumento na resistência à ruptura do consolo. Além disso, contribui para a redução da probabilidade de fissuração na biela de compressão.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar conjuntos de dados experimentais para determinar melhorias na resistência ao cisalhamento através da inclusão de fibras de aço. Os resultados, validados por um modelo analítico de cálculo, visam estabelecer uma base sólida para investigações futuras sobre questões relacionadas a este tema.

5 REVISÃO TEÓRICA

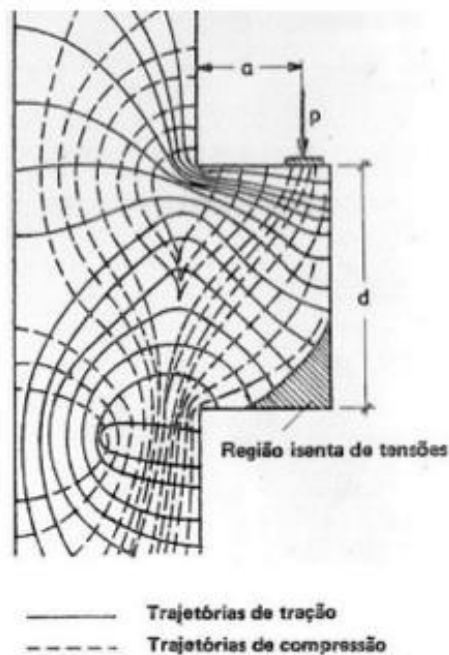
5.1 Consolo

Consolo é um elemento estrutural que serve de apoio para outros elementos, comumente utilizado como fora de transferência dos esforços provenientes de vigas a pilares, muito utilizado por empresas de pré-fabricados.

G. Fran e H. Niedenhoff (1963) e posteriormente A. Mehmel e W. Freitag (1967), realizaram os primeiros estudos sobre o tema, donde determinaram que para o consolo seja capaz de suportar as cargas de solicitação sua altura “d” seja maior que o comprimento em balanço, e que o resultado da relação (a/d) deve estar entre, 0,6 e 0,5.

G. Fran e H. Niedenhoff (1963) também concluiu que a parte inferior do consolo não é tão solicitada, de tal modo que não existe contribuição para sua resistência, outro ponto que foi possível afirmar é sobre a trajetória das tensões no interior do consolo. Existem praticamente dois tipos de tensões presentes no elemento estrutural, as tensões horizontais de tração na face superior, necessitando de uma armadura local (tirante), e as tensões diagonais de compressão que partem do ponto de aplicação da carga até a base do pilar, nesse caso utiliza-se a biela comprimida, conforme evidenciado na Figura 1.

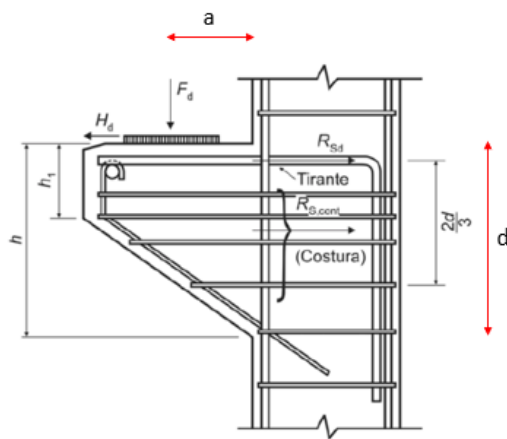
Figura 1 - Trajetória das Tensões



Fonte: Adaptada Leonhardt e Mönning, (1978).

NBR 6118/2023, classifica o consolo de duas formas, consolo curto ou muito curto, a classificação do consolo é determinada levando em consideração a relação a/d (relação entre a distância de aplicação da força até a face do pilar e a altura útil do consolo), se $(0,5d \leq a \leq d)$ é considerado como sendo curto, caso contrário se $(a < 0,5d)$, muito curto, Figura 2. Considerando que se trata de elementos em balanço com vãos curtos, o comportamento estrutural difere das vigas, uma vez que não é viável aplicar a teoria clássica da flexão.

Figura 2 - Representação Consolo, Posição de “a” e “d”



Fonte: Adaptada NBR 6118, (2023).

Almeida et al. (2013) destaca que esses elementos estruturais não se enquadra a teoria clássica da flexão, pois a hipótese de Bernoulli não representa adequadamente o comportamento estrutural ou a distribuição das tensões, tendo em vista que o consolo apresenta uma distribuição não linear das tensões, como também apresenta um valor significativo de tensões de cisalhamento.

Segundo Putri (2018) a fissuração nos consolos é comumente devido aos esforços de cisalhamento. O autor ainda pontua que a fissuração pode ser vertical ou inclinada. Essas fissuras no elemento quando submetido a esforços maiores, seguem um caminho que vai do local em que foi aplicada a carga vertical, se propagando na diagonal até a ligação entre o consolo e a face do pilar.

5.2 Tipos de ruptura

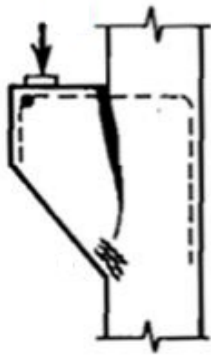
Existem diversas maneiras do consolo atingir o colapso, o modo em que absorver menos energia, será predominante para ruptura do elemento. Park e Paulay (1974) define seis

modos de ruptura: Ruptura por flexão; Ruptura por fendilhamento da biela comprimida; Ruptura por cisalhamento; Ruptura por falha na ancoragem; Ruptura por esmagamento e Ruptura por ações horizontais

5.2.1 Ruptura por flexão

Aqui o consolo apresentará fissuras na interface do consolo com o pilar, resultando no esmagamento da parte inferior, isso se dá pelo fato do escoamento da armadura principal ou até mesmo pela falta desta armadura. É admissível que após o escoamento da armadura principal, aconteça o esmagamento da biela comprimida. (Figura 3).

Figura 3 - Ruptura por Flexão

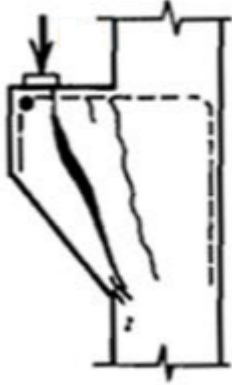


Fonte: Park e Paulay, (1974).

5.2.2 Ruptura por fendilhamento da biela comprimida

Em seguida das fissuras na interface do consolo com o pilar, é possível que comecem a surgir fissuras na diagonal (45°) que partem do ponto de aplicação da carga até a base do consolo. Pode ser ocasionada pela falta de armadura ao longo da área que está sujeita a compressão ou pela falta de área de concreto. (Figura 4).

Figura 4 - Ruptura por Fendilhamento da Biela Comprimida



Fonte: Park e Paulay, (1974).

5.2.3 Ruptura por cisalhamento

Esse tipo de ruptura ocorre comumente em consolos muito curto, onde apresentam fissuras na junção do consolo com o pilar, acarretando o deslizamento do consolo. (Figura 5).

Figura 5 - Ruptura por Cisalhamento



Fonte: Park e Paulay, (1974).

5.2.4 Ruptura por falha na ancoragem

Ocorre quando a carga é aplicada junto a extremidade do consolo, a ancoragem não envolve adequadamente o carregamento, o que pode causar fissuras que seguem o contorno da armação. (Figura 6).

Figura 6 - Ruptura por Falha de Ancoragem

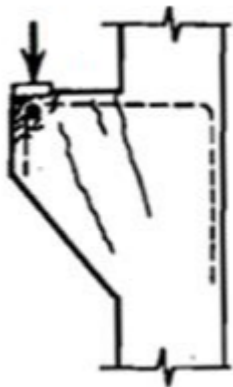


Fonte: Park e Paulay, (1974).

5.2.5 Ruptura por Esmagamento

Quando a região se encontra bastante confinada, sem que haja a correta distribuição das tensões, e se aplica uma carga muito elevada, acarretará falha na distribuição provocando o esmagamento do local da peça. (Figura 7).

Figura 7 - Ruptura por Esmagamento



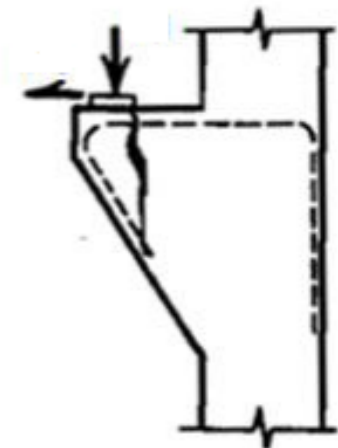
Fonte: Park e Paulay, (1974).

5.2.6 Ruptura por ações horizontais

Quando acontece uma força na horizontal além da vertical, muitos dos mecanismos de ruptura citados anteriormente são amplificados, esse efeito pode ser provocado por efeitos dinâmicos ou ser induzidos pela deformação, variação de temperaturas. As fissuras que

surgem devido a essas ações costuma percorrer todo o consolo, embora não se prolongue até a face do pilar. (Figura 8).

Figura 8 - Ruptura por Ações Horizontais



Fonte: Park e Paulay, (1974).

5.3 Concreto reforçado com fibras de aço

O concreto convencional (agregado graúdo e miúdo, aglomerantes e água) é hoje o material mais utilizado em obra. Segundo Góis (2010), o concreto convencional apresenta grande limitação que é a baixa resistência a tração, com o avanço dos estudos e tecnologia para suprir essa necessidade, foram surgindo os concretos especiais, dentre eles podemos citar os concretos adicionados de fibra, que tem principal finalidade aumentar a capacidade de resistência a tração.

Dentre os diversos tipos de fibras, as fibras de aço são as mais utilizadas para aplicação estruturais, em que apresentam formatos diversificados a fim de elevar sua aderência com a matriz concreto. O concreto adicionado de fibras de aço é uma técnica em ascensão e tem como base aprimorar o concreto a resistir esforços de tração, deste modo as fibras ajudam as barras de aço a resistir ao surgimento de fissuras nos elementos estruturais.

Com a adição de fibra ao concreto, é comprovado que a resistência as tensões têm um ganho significativo, considerando que introduzindo fibras de aço ao concreto, existe a possibilidade de as tensões serem transmitidas de forma uniforme por meio das fissuras. Segundo Trautwein et al (2018) o que explica essa transmissão de esforços é a capacidade de o concreto com fibras de aço apresentar características pseudodúctil, ou seja, apresenta resistência aos esforços mesmo após fissuração.

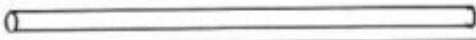
De acordo com Ferreira (2017) é afirmado que os concretos que apresentam volume de até 1,5% de fibra de aço, manifestam um aumento considerável na resistência a tração direta. No entanto, a contribuição primordial das fibras ocorre na região pós-pico do gráfico tensão-deformação, devido sua resistência residual e aumento de energia de deformação.

Segundo Góis (2010), com a dosagem correta de fibra no concreto, a matriz do concreto adquire melhorias nas suas propriedades, entre elas podemos destacar: Ductilidade, Absorção de energia, Comportamento sob fissuração.

Figueiredo (2005) recomenda que o comprimento da fibra seja maior ou igual a duas vezes o tamanho máximo do agregado, pois se as fibras são muito curtas não interceptam as fissuras, por outro lado se forem longas elas afetarão nas propriedades no estado fresco, consequentemente poderá levar a problemas no estado endurecido.

De acordo com a NBR 15530/2019, que traz uma abordagem teórica das fibras de aço, a mesma vai determinar que o seu desempenho destas fibras de aço está diretamente interligado com sua geometria e sua categoria. Conforme a Figura 9, é viável observar diversos tipos de fibras, classificadas de acordo com seu tipo e classe.

Figura 9 - Geometria das Fibras

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Matni et. al, (2023).

Existem três tipos de fibras, conforme representado na Figura 9, designados como A, C e R. As fibras do tipo “A” possuem ancoragem em suas extremidades; as fibras do tipo “C” são corrugadas; e as fibras do tipo “R” são caracterizadas por não apresentarem curvatura ao longo de seu comprimento.

Em relação a classe das fibras, existem 3 classes, na qual está diretamente relacionada à sua resistência à tração e ao fator de forma, vale salientar que o fator de forma depende do tipo de aço utilizado na sua origem. Logo, a classe está vinculada à origem do material.

Classe I – Fibra originada de arame trefilado a frio;

Classe II – Fibra originada de chapa laminada cortada a frio;

Classe III – Fibra originada de arame trefilado e escarificado.

5.4 Modelos de cálculo para consolos

O consolo apresenta uma distribuição não linear das tensões. Logo, a distribuição linear de tensões na seção transversal não se aplica para este tipo de peça. Assim, para analisar esse elemento os principais modelo de cálculo são baseados no modelo de bielas e tirantes ou modelo atrito cisalhante, tendo em vista que o presente estudo foca em consolos curtos, é importante destacar que o modelo adequado para esta categoria de consolo é o modelo de biela e tirantes.

5.4.1 Modelo biela e tirante

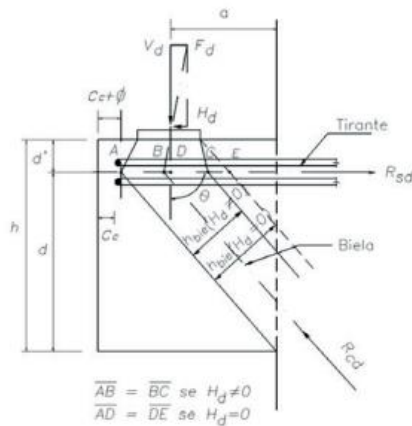
No início do século XX, Ritter e Morsch iniciaram os estudos do modelo biela e tirante. Eles propuseram um modelo equivalente ao de treliça para representar uma viga, a partir dos campos das tensões principais (Tração e Compressão).

O modelo bielas e tirantes idealiza uma treliça que seja capaz de representar o fluxo das tensões principais. Nessa treliça os locais que apresenta tensão de tração aplicam-se os tirantes, na qual a sua resistência depende da área de aço adotada. Por outro lado, nas regiões onde há tensão de compressão, utiliza-se as bielas, que dependem da resistência de compressão do concreto e da área de aço da biela.

5.4.2 Modelo de cálculo através da NBR 6062/2017

Este modelo foi normalizado no Brasil, na qual a ruptura do elemento pode ocorrer por meio do escoamento do tirante ou pela ruptura a biela comprimida. De acordo com o modelo biela e tirante seria necessário a verificação de tensões nos nós, contudo a NBR 9062/2017 não exige a verificação, seu dimensionamento é feito segundo o modelo matemático de uma treliça de barras, baseando-se na Figura 10.

Figura 10 - Modelo de Consolo Curto



Fonte: NBR 9062, (2006).

A armadura total do tirante ($A_{s,tir}$) de consolo curtos segundo a NBR 9062/2017 é determinada por meio da Equação 1.

$$A_{s,tir} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) \cdot \frac{V_d}{f_{yd}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- a – Distância do local de aplicação de carga até a face do pila
- d – Altura útil do consolo
- f_{yd} – Resistência de cálculo ao escoamento do aço.

Para determinar a força relativa de escoamento do tirante presente no consolo, basta isolar o (V_d) da equação acima, donde surge a Equação 2.

$$V_d = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\left(0,1 + \frac{a}{d}\right)} \quad \text{Equação 2}$$

Conforme a NBR 9062/2017, para que o consolo não sofra esmagamento do concreto, a tensão de compressão na biela comprimida não pode ultrapassar os seguintes valores.

- f_{cd} , para carga direta;
- $0,85 \cdot f_{cd}$, para carga indireta.

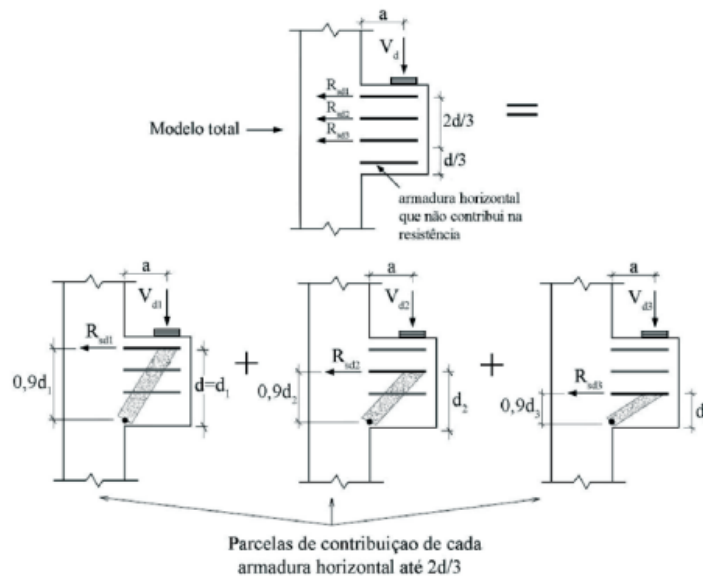
A tensão na compressão da biela pode ser obtida através da Equação 3.

$$\sigma_{cb} = \frac{f_d \cdot \sqrt{0,9^2 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}}{0,18 \cdot b \cdot d} \quad \text{Equação 3}$$

5.4.3 Fernandes e El Debs (2005)

Dentre os diversos modelos existentes, Fernandes e El Debs propuseram um modelo que se baseia na ideia de Leonhardt e Monnig (1978) e que leva em conta a contribuição da armadura de costura nas equações, resultado uma reescrita das equações originais de Leonhardt e Monnig. Conforme a Figura 11.

Figura 11 - Modelo Proposto por Fernandes e El Debs Baseado no Modelo de Leonhardt e Monnig



Fonte: Fernandes e El Debs, (2005).

Uma vez que uma das causas da ruína do consolo é a flexão devido o escoamento da armadura principal(tirante), a força de ruína no tirante é dada pela Equação 4.

$$V_{d1} = \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot f_{ydi} \cdot \frac{z_i}{a} \cdot \frac{d_i}{d} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$$z_i = 0,9d_i$$

d_i , altura útil efetiva da armadura i

d, altura útil.

A Equação 5 é usada para avaliar a força de ruína do consolo por esmagamento do concreto.

$$V_{d2} = \frac{0,18 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^*}{\sqrt{0,9^2 + \left(\frac{a}{d^*}\right)^2}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$$d^* = \sum_{i=1}^n \frac{d_i \cdot R_{sdi}}{R_{sd}}$$

$$R_{sdi} = A_{si} \cdot f_{ydi}$$

$$R_{sd} = \sum_{i=1}^n R_{sdi}$$

6 METODOLOGIA

A abordagem utilizada neste trabalho fundamenta-se em uma revisão bibliográfica, análises numéricas e estatísticas de dados experimentais. O levantamento de ensaios experimentais teve como propósito aprimorar um banco de dados desenvolvidos por Beatriz Souza (2022) e Luiz Oliveira (2022) em semestres anteriores, o qual foi utilizado para analisar o comportamento dos modelos analíticos de cálculos quando se existe o acréscimo de fibra de aço na matriz de concreto.

De início, o objetivo era obter resultados experimentais em consolo que contêm adição de fibra de aço. Para isso, foram examinados diversos artigos e teses. Após extensa pesquisa, os principais artigos foram selecionados para servirem como base na organização das referências para o desenvolvimento do presente trabalho.

Neste processo de organização, uma avaliação criteriosa foi conduzida em relação ao site a ser pesquisado. Como resultado, os dados experimentais foram obtidos de artigos encontrados nos portais ResearchGate e SciELO. Nos sites, foi realizada uma filtragem criteriosa utilizando palavras-chave específicas, tais como: "Consolo com fibras de aço", "Resistência ao cisalhamento de consolos" e "Ensaio experimentais de consolo reforçado com fibras". Considerando a grande limitação de estudos em relação ao tema, houve uma grande adesão de estudos internacionais para o estudo.

Com os resultados obtidos da pesquisa, foi possível melhorar uma planilha em Excel que continha informações acerca dos ensaios experimentais. Essas informações foram empregadas para extrair dados significativos relacionados à incorporação de fibras de aço na região do consolo e sua influência na resistência ao cisalhamento, por meio de análises estatísticas e plotagem de gráficos.

Posteriormente, foi calculado a resistência dos consolos presente no banco de dados, utilizando a Equação 4 e a Equação 5. A Equação 4 considera a ruína do consolo devido ao escoamento da armadura principal, enquanto a Equação 5 trata da falha devido ao esmagamento do concreto. Sendo assim, foi aplicado um filtro nos ensaios experimentais para excluir do banco de dados os consolos que falharam devido ao escoamento do tirante, uma vez que, para este estudo, é crucial considerar apenas os consolos que falharam devido ao esmagamento do concreto.

Obtidos os resultados experimentais e os resultados teóricos de cálculo, houve a possibilidade de compará-los. Permitindo a obtenção da variável aleatória conhecida como Erro de modelo, Equação 6:

$$E_{mod} = \frac{V_{exp}}{V_{r2}} \quad \text{Equação 6}$$

Essa expressão envolve a análise dos resultados da resistência do conjunto de ensaios previsto por um modelo analítico específico, permitindo uma avaliação precisa da variável Erro de modelo.

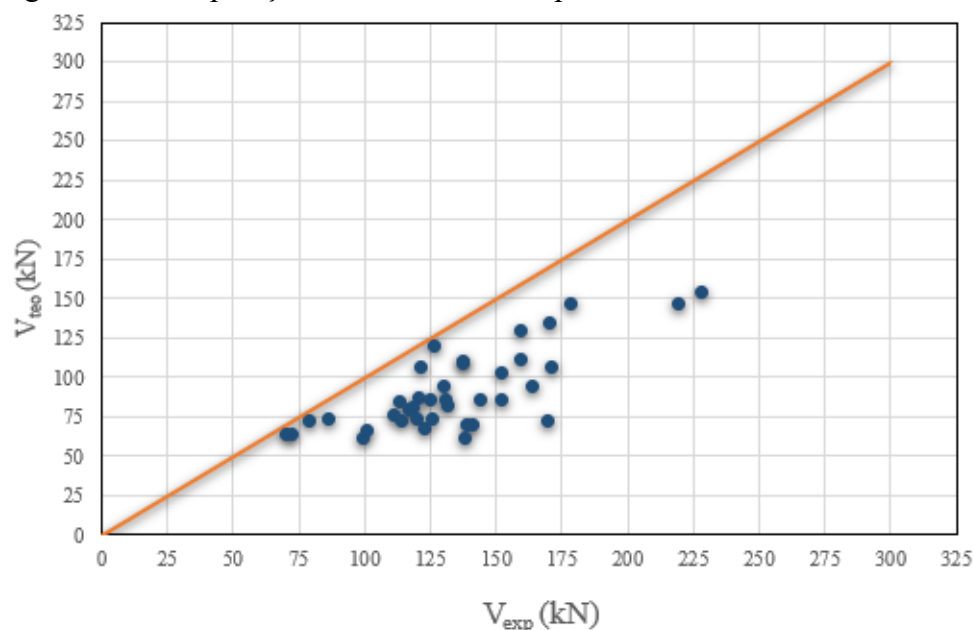
Também a partir das análises e plotagem dos gráficos, conforme a Figura 14 e Figura 15, foi possível criar uma curva de tendência para facilitar a compreensão das informações e dados. Nesse processo, foi identificada a importância de obter a equação da linha de tendência como pré-requisito para a proposição do erro de modelo citado acima. Com a variável de erro de modelo obtida para cada ensaio é possível indicar o caráter de tendenciosidade do modelo analítico seja ele conservador ou inseguro.

7 RESULTADOS

Foram feitas comparações entre os resultados experimentais e analíticos, utilizando o banco de dados e um modelo analítico de cálculo, na qual os resultados analíticos foram obtidos a partir do modelo proposto por Fernandes e El Debs (2005). Considerando isso, foi realizada uma análise paramétrica para avaliar a discrepância dos resultados teóricos e experimentais, visando comparar o erro de modelo em relação ao volume de fibra de aço.

Os resultados dessa comparação podem ser visualizados na Figura 12. A partir dela, conclui-se que os resultados experimentais superaram significativamente os teóricos. Essa análise indica que o modelo analítico de cálculo não é preciso quando aplicado a consolos com fibras de aço. Além disso, a grande dispersão nos resultados reforça essa conclusão, como também a discrepância em relação à linha de 45° corrobora essa afirmação.

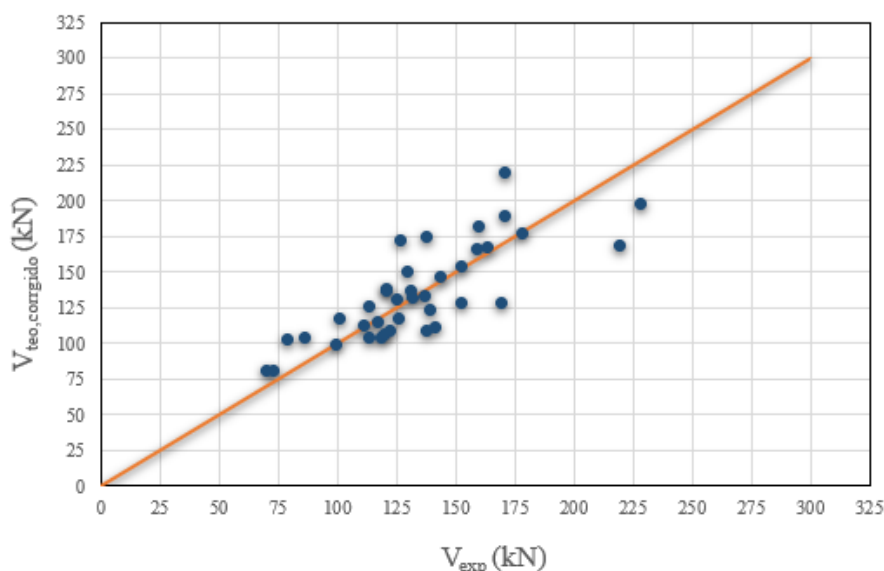
Figura 12 - Comparação dos Resultados Experimentais e Teóricos de Cálculo



Fonte: Autoria própria, (2023).

Diante disto, viu-se a necessidade de ajustar a Equação 5, assim, foi calculada uma nova resistência teórica utilizando a Equação 7. Logo, os resultados mostram que os dados se aproximaram dos resultados experimentais, confirmando que a equação foi ajustada corretamente. Isso se deve ao fato de que a equação ajustada passou a considerar os volumes de fibras na matriz de concreto, obtendo valores muito mais próximos da linha de 45° e resultando em uma dispersão significativamente menor em comparação com o caso anterior. A Figura 13 ilustra essa melhoria.

Figura 13 – Comparação dos Resultados Experimentais e Teóricos de Cálculo Corrigido

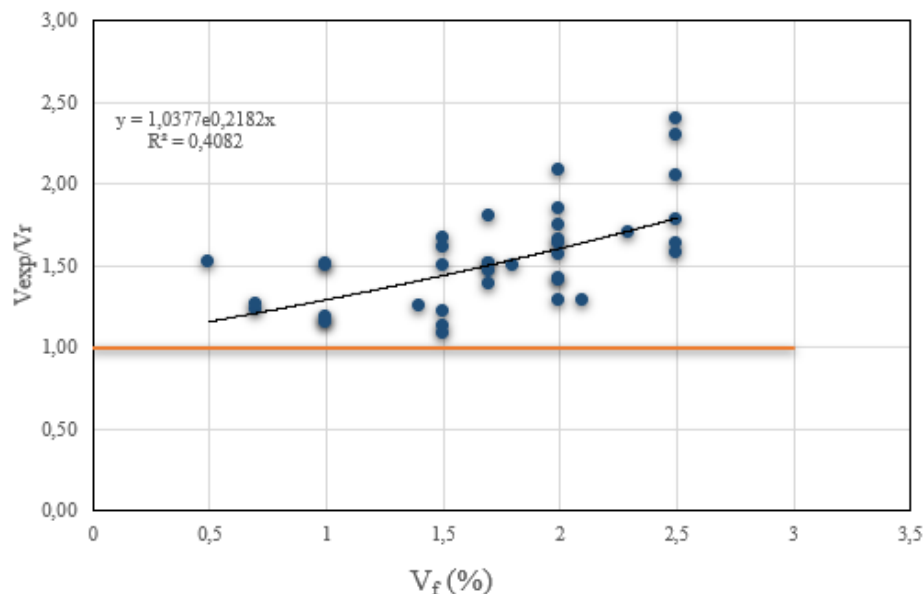


Fonte: Autoria própria, (2023).

Ao esclarecer que o impacto da fibra de aço na matriz de concreto é mais significativo quando o consolo atinge a ruptura devido ao esmagamento do concreto, é importante notar que tal ruptura possibilita a transmissão uniforme das tensões através das fissuras, conferindo resistência aos esforços mesmo após a fissuração, ou seja, aumentando a resistência do estado limite último (ELU). Assim, uma filtragem foi realizada aplicando a Equação 4 e Equação 5, resultando na identificação dos consolos que sofreram ruptura devido ao esmagamento do concreto, conforme mostra o APÊNDICE A.

A partir dos consolos que sofreram ruptura devido ao esmagamento do concreto, foi elaborado um gráfico correlacionando o erro de modelo com a porcentagem da fibra de aço. Conforme a Figura 14, observa-se que com o aumento do volume de fibra de aço na matriz de concreto está associado a um aumento no erro de modelo. Isso se deve à inadequação do modelo analítico de cálculo, pois ele não leva em consideração o volume de fibra.

Figura 14 - Erro de Modelo X Volume de Fibra



Fonte: Autoria própria, (2023).

Conforme a Figura 14, é importante destacar que a tendência exponencial foi a que apresentou maior correlação entre os resultados, resultando na formulação da linha de tendência para os dados. A variável (x) da equação corresponde ao volume de fibra presente na matriz de concreto, que deve variar entre 0,5% e 2,5%.

Uma conclusão adicional que pode ser observada na Figura 14 é que o modelo de cálculo proposto por Fernandes e El Delbs (2005) é bastante conservador, pois todos os experimentos apresentam valores acima da linha unitária, que representa os resultados experimentais em relação aos teóricos. O que pode afirmar essa afirmação é a média obtida do erro de modelos dos consolos, tendo em vista que 54% dos resultados experimentais são maiores que o resultado teórico calculado, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros Estatístico do Erro de Modelo

MÉDIA DO ERRO DE MODELO	DESVIO PADRÃO DO ERRO DE MODELO
1,54	31%

Fonte: Autoria Própria, (2023).

A partir do desvio padrão mostrado na Quadro 1. é possível afirmar que os resultados apresentam uma dispersão de 31% em relação ao valor médio, o que torna claro que, os resultados do erro de modelo mesmo que variando para valores abaixo da média, os resultados

ainda demonstram uma abordagem conservadora no modelo de cálculo proposto por Fernandes e El Debs (2005).

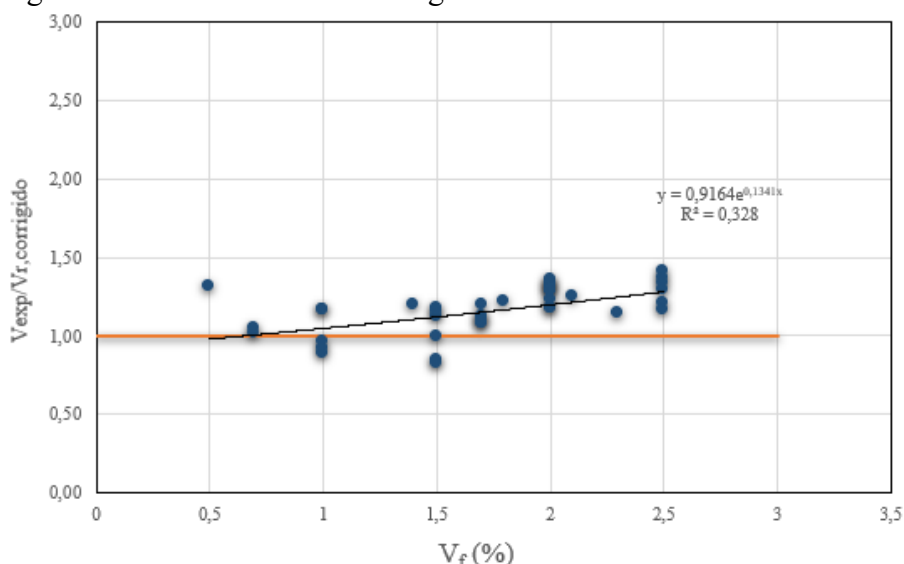
Utilizando a linha de tendência do erro de modelo, foi possível corrigir a Equação 5, que considera a ruptura do consolo devido ao esmagamento do concreto. Essa correção exigiu a correlação entre da equação proposta por Fernandes e El Debs (2005) com o erro de modelo, resultando na Equação 7.

$$V_{R2,corrigido} = \frac{0,18 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d}{\sqrt{0,9^2 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}} \cdot 1,0377 \cdot e^{21,82x} \quad \text{Equação 7}$$

A partir da Equação 7, foi possível obter um novo gráfico, sendo que agora com o resultado teórico corrigido, como mostra a Figura 15. Como no caso anterior, aqui também a tendência exponencial foi a que melhor apresentou correlação entre os dados.

Com base na Figura 15, é possível notar que vários pontos exibiram um erro de modelo inferior à linha unitária. Isso indica que, após a correção da Equação 5, o modelo analítico de cálculo aumentou a resistência teórica cálculo. Em outras palavras, os valores teóricos calculados se aproximaram mais dos valores experimentais, resultando que alguns dos resultados experimentais fosse menor do que o teóricos.

Figura 15 - Erro de Modelo Corrigido X Volume de Fibra



Fonte: Autoria própria, (2023).

Da mesma forma que na situação anterior, foram examinados os parâmetros estatísticos, incluindo a média e o desvio padrão. Neste caso específico, a média revelou que apenas 11% dos resultados experimentais são superiores ao resultado teórico calculado, e que os resultados teóricos se aproximaram mais do erro de modelo, conforme Quadro 2. Essa porcentagem diminui em comparação com o caso anterior devido ao aumento do valor da resistência teórica calculada, já que, neste caso, o modelo analítico passou a considerar a porcentagem de fibra na matriz de concreto.

Quadro 2 - Parâmetros Estatístico do Erro de Modelo Corrigido

MÉDIA DO ERRO DE MODELO CORRIGIDO	DESVIO PADRÃO DO ERRO DE MODELO CORRIGIDO
1,11	19%

Fonte: Autoria própria, (2023).

A partir do desvio padrão mostrado na Quadro 2, é possível afirmar que os resultados apresentam uma dispersão de apenas 19% em relação ao valor médio, ou seja, um conjunto de dados bem mais próximos da média que no caso anterior, apresentando um valor bem mais homogêneo.

É importante destacar que o modelo possui algumas limitações de cálculo, uma vez que o banco de dados se concentra em ensaios experimentais nos quais o volume de fibras varia apenas de 0,5% a 2,5%. Portanto, a Equação 7 só é aplicável a consolos cuja matriz de concreto contenha essa porcentagem de fibras.

Outra limitação do modelo proposto está relacionada à falta de informações sobre as fibras de aço utilizadas nos ensaios. Parâmetros de grande importância, como comprimento, rugosidade, tipo de ancoragem, entre outros, não foram detalhados nos estudos utilizados.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi conduzida uma investigação sobre a influência das fibras de aço na matriz de concreto do consolo. Foi observado que as fibras de aço contribuem para um aumento na resistência do concreto, especialmente em consolos que sofrem falha devido ao esmagamento do concreto.

Essa investigação se deu por meio da comparação de resultados experimentais (APENDICE A) com os resultados analítico de cálculo proposto por Fernandes e El Debs (2005). Nesta análise foi verificado o parâmetro da resistência do consolo reforçado com fibras de aço.

Foi analisada especialmente a Equação 5, na qual constatou-se que a resistência dos experimentos foi maior do que o resultado analítico. Isso confirma que a Equação 5 não leva em consideração a porcentagem de fibra e que se mostra ineficaz para consolos que contêm fibras de aço em sua matriz de concreto. Além disso, é relevante destacar que o modelo de cálculo proposto por Fernandes e El Debs se comportou de forma a favor da segurança, visto que os valores obtidos ficaram acima da linha unitária.

Apoiando nisso, a correção da Equação 5 teve como objetivo principal aproximar ao máximo os valores experimentais dos teóricos. Depois da correção do modelo analítico, apenas 11% dos resultados experimentais excederam o resultado teórico corrigido, e os dados mostraram uma dispersão de apenas 19%, o que é bastante satisfatório, considerando as limitações encontradas durante o processo de estudo. Portanto, é possível concluir que o objetivo foi alcançado, uma vez que as resistências experimentais e teóricas se aproximaram consideravelmente.

Para futuros estudos, sugere-se minimizar ao máximo as limitações encontradas neste estudo. Por exemplo, no banco de dados, considerar apenas consolos que contenham uma única fibra de aço ou até mesmo ampliar a variação do volume de fibras.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.
- ALMEIDA, V. S.; SIMONETTI, H. L.; NETO, L. O. The strut-and-tie models in reinforced concrete structures analysed by a numerical technique. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 1, p. 139-157, 2013.
- CEDRIM, M. B. M. **Aplicação do método das bielas para o dimensionamento de consolos curtos com suporte da otimização topológica**. 2019.
- COSTA, J. B. A. **Estudo Experimental de Consolos de Concreto com Fibras Moldados em Etapas Distintas dos Pilares**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- Fattuhi, N.I. **Strength of SFRC corbels subjected to vertical load**. J. Struct. Eng., 116(3), 701-718, 1990.
- Fattuhi, N.I. **Strength of FRC corbels in flexure**. J. Struct. Eng., 120(2), 360-377, 1994.
- FERNANDES, R. M.; EL DEBS, M. K. **Análise da capacidade resistente de consolos de concreto armado considerando a contribuição da armadura de costura**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.7, n.25, 2005; p.103– 128
- FERREIRA, Josyverton Gomes. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/Pb, 2017.
- FIGUEIREDO, A.D. – Concreto Com Fibras. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ed. G. C. ISAIA, **IBRACON**, 2005.
- FRANZ, G. e NIEDENHOFF, H. **Die bewehrung von konsolen und gedrungeenen balken**. Beton und stahlbetonbau, vol.58, n.5, p. 112-120, 1963.
- GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço**: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.
- HWANG, S.-J.; LU, W.; LEE, H.-J. Sheer strength prediction for reinforced concrete corbels. **Aci Structural Journal**, v. 97, p. 543–552, 1 jul. 2000.
- Matni, L. C. dos S.; Beserra, A. A. F.; Neto, B. B. P. A influência da adição de fibras de aço em tubos de concreto. **Revista Eletrônica Multidisciplinar – FACEAR**, v. 1, n. 1, p.1-15,

2023.

OLIVEIRA, E. M. **Consolos de concreto moldados em duas etapas**: Influência do tratamento da interface e da adição de fibras de aço. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

PAULAY, T.; PARK, R. **Reinforced Concrete Structures**. Christchurch: University of Canterbury, 1974.

PUTRI, M. R. et al. **Reinforced Concrete Corbel's Behavior using Strut and Tie Model**. Journal of the Civil Engineering Forum, v. 4, n. 2, p.97, 2018.

VITOR, Paula de Carvalho Palma; SANTOS, Antônio Carlos dos; TRAUTWEIN, Leandro Mouta. **Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço**. Ambiente Construído, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 255-270, set. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300280>

APÊNDICE A – BANCO DE DADOS

Quadro 3.1 - Banco de dados do consolo

Referência	Modelo	Tipo de Fibra	a (mm)	b (mm)	d (mm)	h (mm)	a/d	ρ	A _{s,br} (mm²)	Z _{br} (mm)	f _t (MPa)	f _y (MPa)	f _c (MPa)	f _t (MPa)	v _r	v _r (%)	A _{s,br,fy} (kN)	d* (mm)	V _{exp} (kN)	V _{R1} (kN)	V _{R2} (kN)	Modo de Ruptura analítico	V _{exp} /V _R	V _{R2,corrigido} (kN)	Modo de Ruptura corrigido	V _{exp} /V _{R,corrigido}
Fattuhi (1990)	1	Fibra de aço	80	152,5	123	149	0,65	1,00%	227,23	110,70	1100	452	33,53	5,84	0,017	1,7	102,71	123,00	153	142,12	101,95	Esm. do concreto	1,50	153,31	Esc. das armaduras	1,08
	2	Fibra de aço	80	155	124	150	0,65	0,98%	227,85	111,60	1100	449	35,15	5,44	0,017	1,7	102,30	124,00	160	142,71	109,82	Esm. do concreto	1,46	165,13	Esc. das armaduras	1,12
	3	Fibra de aço	80	152,5	126	150	0,63	0,44%	100,65	113,40	1100	451	34,02	4,86	0,017	1,7	45,39	126,00	91,2	64,34	106,83	Esc. das armaduras	1,42	160,64	Esc. das armaduras	1,42
	4	Fibra de aço	80	155	125	149	0,64	0,44%	101,62	112,50	1100	451	32,89	5,3	0,017	1,7	45,83	125,00	93	64,45	103,87	Esc. das armaduras	1,44	156,18	Esc. das armaduras	1,44
	9	Fibra de aço	80	152,5	123	149	0,65	1,00%	227,23	110,70	1100	452	27,95	5,29	0,017	1,7	102,71	123,00	152,9	142,12	84,99	Esm. do concreto	1,80	127,79	Esm. do concreto	1,20
	12	Fibra de aço	80	154	125	149	0,64	0,44%	100,96	112,50	1100	451	30,78	3,89	0,0070	0,70	45,53	125,00	92	64,03	96,57	Esc. das armaduras	1,44	116,75	Esc. das armaduras	1,44
	13	Fibra de aço	110	154,7	123	149	0,89	0,99%	228,20	110,70	1100	452	27,54	5,04	0,017	1,7	103,15	123,00	111,7	103,80	74,34	Esm. do concreto	1,50	111,79	Esc. das armaduras	1,08
	14	Fibra de aço	110	153,5	125	149	0,88	0,44%	100,63	112,50	1100	451	29,57	4,24	0,007	0,7	45,39	125,00	68,3	46,42	81,14	Esc. das armaduras	1,47	98,09	Esc. das armaduras	1,47
	15	Fibra de aço	110	152,5	126	150	0,87	0,44%	100,65	113,40	1100	451	31,59	3,92	0,007	0,7	45,39	126,00	67,2	46,80	87,14	Esc. das armaduras	1,44	105,35	Esc. das armaduras	1,44
	16	Fibra de aço	110	154,5	123,5	149,5	0,89	0,98%	226,36	111,15	1100	452	30,54	4,24	0,017	1,7	102,31	123,50	114,3	103,38	82,84	Esm. do concreto	1,38	124,56	Esc. das armaduras	1,11
	18	Fibra de aço	89	154	124,5	150,5	0,71	0,98%	227,13	112,05	1100	452	26,41	4,98	0,01	1	102,66	124,50	119	129,25	79,30	Esm. do concreto	1,50	102,36	Esm. do concreto	1,16
	20	Fibra de aço	110	153	123,5	149,5	0,89	0,99%	226,45	111,15	1100	452	31,27	5,43	0,018	1,80	102,35	123,50	126	103,42	83,99	Esm. do concreto	1,50	129,09	Esc. das armaduras	1,22
	21	Fibra de aço	110	156	122	148	0,90	0,98%	226,26	109,80	1100	452	29,27	4,73	0,015	1,5	102,27	122,00	118	102,08	78,71	Esm. do concreto	1,50	113,30	Esc. das armaduras	1,16
	22	Fibra de aço	110	153	123	149	0,89	0,69%	157,30	110,70	1100	454	29,27	4,73	0,015	1,5	71,41	123,00	108,5	71,87	78,15	Esc. das armaduras	1,51	112,49	Esc. das armaduras	1,51
	23	Fibra de aço	110	153	122,5	148,5	0,90	1,00%	227,21	110,25	1100	452	27,38	5,12	0,02	2	102,70	122,50	126,5	102,93	72,66	Esm. do concreto	1,74	116,65	Esc. das armaduras	1,23
	24	Fibra de aço	80	153	124	150	0,65	0,69%	158,36	111,60	1100	454	27,38	5,12	0,02	2	71,89	124,00	131,5	100,29	84,44	Esm. do concreto	1,56	135,56	Esc. das armaduras	1,31
	27	Fibra de aço	80	153,5	123,5	149,5	0,65	0,99%	227,19	111,15	1100	452	34,26	6,29	0,025	2,5	102,69	123,50	171,5	142,67	105,43	Esm. do concreto	1,63	188,77	Esc. das armaduras	1,20
	29	Fibra de aço	75	151,5	122,5	148,5	0,61	0,45%	101,24	110,25	1100	451	30,21	4,42	0,01	1	45,66	122,50	100	67,12	92,71	Esc. das armaduras	1,49	119,67	Esc. das armaduras	1,49
	30	Fibra de aço	120	153,9	120,2	146,2	1,00	0,70%	157,50	108,18	1100	454	30,21	4,42	0,01	1	71,51	120,20	86,5	64,46	74,84	Esc. das armaduras	1,34	96,60	Esc. das armaduras	1,34
	32	Fibra de aço	120	154	120,2	146,2	1,00	1,23%	276,93	108,18	1100	452	32,89	5,5	0,02	2	125,17	120,20	132,5	112,84	81,53	Esm. do concreto	1,63	130,89	Esc. das armaduras	1,17
	38	Fibra de aço	110	152,2	124	150	0,89	0,44%	100,45	111,60	1100	451	32,08	5,72	0,02	2	45,30	124,00	74	45,96	86,24	Esc. das armaduras	1,61	138,45	Esc. das armaduras	1,61
	39	Fibra de aço	110	153,5	124	150	0,89	1,20%	276,30	111,60	1100	452	31,35	5,64	0,023	2,3	124,89	124,00	144,5	126,70	85,00	Esm. do concreto	1,70	145,69	Esc. das armaduras	1,14
	46	Fibra de aço	75	154,5	92	146	0,82	0,45%	101,51	82,80	1100	451	28,19	5,64	0,01	1	45,78	92,00	74,5	50,54	59,39	Esc. das armaduras	1,47	76,66	Esc. das armaduras	1,47
	48	Fibra de aço	80	155,5	93,2	148,2	0,86	0,68%	156,71	83,88	1100	454	28,92	4,37	0,02	2	71,14	93,20	100	74,60	60,66	Esm. do concreto	1,65	97,39	Esc. das armaduras	1,34
	49	Fibra de aço	80	154,1	122,1	148,2	0,66	1,00%	228,38	109,89	1100	452	30,46	5,16	0,025	2,5	103,23	122,10	164,5	141,79	92,67	Esm. do concreto	1,78	165,93	Esc. das armaduras	1,16
	51	Fibra de aço	110	153,4	132,3	148,3	0,83	1,00%	227,49	119,07	1100	451	31,27	5,81	0,02	2	102,60	132,30	130,5	111,06	93,23	Esm. do concreto	1,40	149,68	Esc. das armaduras	1,18
	55	Fibra de aço	75	153,7	135,3	149,3	0,55	0,44%	100,97	121,77	1100	451	29,89	4,06	0,01	1	45,54	135,30	104,5	73,93	105,85	Esc. das armaduras	1,41	136,62	Esc. das armaduras	1,41
	56	Fibra de aço	75	152,9	115,8	149,8	0,65	0,44%	100,78	104,22	1100	451	29,89	4,06	0,01	1	45,45	115,80	95,5	63,16	85,91	Esc. das armaduras	1,51	110,89	Esc. das armaduras	1,51
	57	Fibra de aço	80	152,2	135,1	150,1	0,59	0,69%	157,63	121,59	1100	451	31,43	5,92	0,02	2	71,09	135,10	138,5	108,05	107,98	Esm. do concreto	1,28	173,35	Esc. das armaduras	1,28
	58	Fibra de aço	80	152,8	113,3	148,3	0,71	0,69%	156,36	101,97	1100	451	31,43	5,92	0,02	2	70,52	113,30	121,5	89,88	85,62	Esm. do concreto	1,42	137,46	Esc. das armaduras	1,35
	60	Fibra de aço	110	152,8	112,6	148,6	0,98	1,49%	338,32	101,34	1100	451	29,32	5,37	0,02	2	152,58	112,60	142	140,57	68,36	Esm. do concreto	2,08	109,75	Esm. do concreto	1,29
Fattuhi (1994)	61	Fibra de aço	60	152,6	95	149	0,63	0,44%	100,04	85,50	1100	451	29,4	4,82	0,015	1,5	45,12	95,00	98,5	64,30	69,78	Esc. das armaduras	1,53	100,44	Esc. das armaduras	1,53
	63	Fibra de aço	80	153	94	150	0,85	0,68%	156,06	84,60	1100	451	30,94	5,94	0,025	2,5	70,38	94,00	101,8	74,43	64,66	Esm. do concreto	1,57	115,78	Esc. das armaduras	1,37
	64	Fibra de aço	60	152,6	92,5	147,5	0,65	1,00%	225,09	83,25	1100	451	30,94	5,94	0,025	2,5	101,51	92,50	170	140,85	70,86	Esm. do concreto	2,40	126,88	Esm. do concreto	1,34
	75	Fibra de aço	75	154,3	125,9	149,9	0,60	0,44%	101,77	113,31	1100	451	25,11	4,05	0,01	1	45,90	125,90	94,8	69,34	81,35	Esc. das armaduras	1,37	105,00	Esc. das armaduras	1,37
	76	Fibra de aço	75	154,5	94,8	148,8	0,79	0,44%	101,15	85,32	1100	451	25,11	4,05	0,01	1	45,62	94,80	73,5	51,90	55,25	Esc. das armaduras	1,42	71,31	Esc. das armaduras	1,42
	77	Fibra de aço	110	153,1	122,3	148,3	0,90	1,00%	227,05	110,07	1100	451	26,89	4,96	0,015	1,5	102,40	122,30	114,5	102,46	71,23	Esm. do concreto	1,61	102,53	Esc. das armaduras	1,12
	80	Fibra de aço	110	154	122,1	148,1	0,90	1,00%	228,07	109,89	1100	451	27,38	5,26	0,015	1,5	102,86	122,10	120,8	102,76	72,77	Esm. do concreto	1,66	104,76	Esc. das armaduras	1,18
	85	Fibra de aço	110	154,2	112,5	148,5	0,98	0,99%	226,70	101,25	1100	451	28,43	4,96	0,02	2	102,24	112,50	123,3	94,11	66,80	Esm. do concreto	1,85	107,25	Esc. das armaduras	1,31
	87	Fibra de aço	60	152,9	93,5	148,5	0,64	0,69%	156,67	84,15	1100	451	29,32	6,01	0,025	2,5	70,66	93,50	139,8	99,10	68,26	Esm. do concreto	2,05	122,22	Esc. das armaduras	1,41
	88	Fibra de aço	80	153,1	93,1	149,1	0,86	1,00%	228,27	83,79	1100	451	29,32	6,01	0,025	2,5	102,95	93,10	138,8	107,83	60,45	Esm. do concreto	2,30	108,24	Esc. das armaduras	1,29
Gulsan (2015)	30-1-10-100	Fibra de aço	103,75	150	125	150	0,83	0,70%	157,50	112,50	1200	560	40													

Quadro 3.2 - Continuação banco de dados do consolo

Referência	Modelo	Tipo de Fibra	a (mm)	b (mm)	d (mm)	h (mm)	a/d	ρ	$A_{s, tir}$ (mm ²)	Z_{tir} (mm)	f_f (MPa)	f_y (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	v_f	v_f (%)	$A_{s, tir, fy}$ (kN)	d* (mm)	V_{exp} (kN)	V_{R1} (kN)	V_{R2} (kN)	Modo de Ruptura analítico	V_{exp}/V_R	$V_{R2, corrigido}$ (kN)	Modo de Ruptura corrigido	$V_{exp}/V_{R, corrigido}$
Fattuhi and Hughes (1989)	C28	Fibra de aço	89	151	123	148	0,72	0,45%	100,57	110,70	1100	495	45,12	6,09	0,007	0,7	49,78017	123,00	88,2	61,92	130,88	Esc. das armaduras	1,42	158,22	Esc. das armaduras	1,42
	C29	Fibra de aço	119	153	124	149	0,96	0,44%	100,31	111,60	1100	495	45,12	6,09	0,007	0,7	49,651866	124,00	65,9	46,56	117,09	Esc. das armaduras	1,42	141,56	Esc. das armaduras	1,42
	C31	Fibra de aço	67	153	121	146	0,55	1,02%	227,85	108,90	1100	491	46,17	5,05	0,007	0,7	111,873172	121,00	179	181,84	145,87	Esm. do concreto	1,23	176,35	Esm. do concreto	1,02
	T3	Fibra de aço	90	152	123	148	0,73	0,70%	157,47	110,70	1100	558	38,8	4,66	0,007	0,7	87,869376	123,00	133	108,08	112,68	Esc. das armaduras	1,23	136,22	Esc. das armaduras	1,23
	T4	Fibra de aço	88	151	122	147	0,72	0,71%	157,60	109,80	1100	558	45,28	6,19	0,014	1,4	87,9400746	122,00	142,5	109,73	130,27	Esc. das armaduras	1,30	183,48	Esc. das armaduras	1,30
	T6	Fibra de aço	88	152	122	147	0,72	0,70%	156,41	109,80	1100	537	46,49	9,28	0,021	2,1	83,991096	122,00	143	104,80	134,64	Esc. das armaduras	1,36	220,93	Esc. das armaduras	1,36
	T10	Fibra de aço	93	151	122	147	0,76	1,02%	226,41	109,80	1100	491	38,8	4,66	0,007	0,7	111,167015	122,00	138	131,25	109,22	Esm. do concreto	1,26	132,04	Esc. das armaduras	1,05
	T11	Fibra de aço	90	152	121	146	0,74	1,02%	226,36	108,90	1100	491	45,28	6,19	0,014	1,4	111,141974	121,00	160,2	134,48	128,65	Esm. do concreto	1,25	181,20	Esc. das armaduras	1,19
	T12	Fibra de aço	90	152	122	147	0,74	1,02%	227,91	109,80	1100	491	46,49	9,82	0,021	2,1	111,903221	122,00	171,2	136,52	133,18	Esm. do concreto	1,29	218,54	Esc. das armaduras	1,25
Costa (2009)	MBS1	Fibra de aço	131	270	175	200	0,75	0,45%	243	157,50	1100	556,5	44,06	2,77	0,02	2	135,2295	175,00	459,26	162,59	319,86	Esc. das armaduras	2,82	513,52	Esc. das armaduras	2,82
	MBC2	Fibra de aço	131	270	175	200	0,75	0,45%	243	157,50	1100	556,5	44,06	2,77	0,02	2	135,2295	175,00	485,28	162,59	319,86	Esc. das armaduras	2,98	513,52	Esc. das armaduras	2,98
	MMS3	Fibra de aço	131	270	175	200	0,75	1,10%	594	157,50	1100	517,3	92,24	4,08	0,02	2	307,2762	175,00	1094,6	369,44	669,63	Esc. das armaduras	2,96	1075,07	Esc. das armaduras	2,96
	MMC4	Fibra de aço	131	270	175	200	0,75	1,10%	594	157,50	1100	517,3	92,24	4,08	0,02	2	307,2762	175,00	1026,4	369,44	669,63	Esc. das armaduras	2,78	1075,07	Esc. das armaduras	2,78
	MMC5	Fibra de aço	131	270	175	200	0,75	1,10%	594	157,50	1100	517,3	73,9	2,45	0,02	2	307,2762	175,00	973,09	369,44	536,49	Esc. das armaduras	2,63	861,31	Esc. das armaduras	2,63
Silva (2017)	M2	Fibra de aço	100	160	170	200	0,59	1,10%	352	153	1000	512	31,85	3,2	0,005	0,5	180,224	170,00	220	275,74	145,03	Esm. do concreto	1,52	167,85	Esm. do concreto	1,31
	M3	Fibra de aço	100	160	170	200	0,59	1,10%	352	153	1000	512	33,51	3,4	0,01	1	180,224	170,00	229	275,74	152,59	Esm. do concreto	1,50	196,96	Esm. do concreto	1,16
Hasan et al (2017)	C8G3	Fibra de aço	150	150	202	250	0,74	1,32%	495	181,8	2600	642	150	15	0,03	3	317,79	202,00	701,65	385,16	701,15	Esc. das armaduras	1,82	1400,14	Esc. das armaduras	1,82
	C10G4	Fibra de aço	150	150	202	250	0,74	1,32%	495	181,8	2600	642	150	15	0,04	4	317,79	202,00	727,45	385,16	701,15	Esc. das armaduras	1,89	1741,55	Esc. das armaduras	1,89