



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME FREITAS OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO À FORÇA CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO SEM E COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO**

PAU DOS FERROS/RN

JUNHO DE 2022

GUILHERME FREITAS OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO À FORÇA CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO SEM E COM ADIÇÃO DE FIBRAS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira

PAU DOS FERROS/RN

JUNHO DE 2022

© 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.

048 Oliveira, Guilherme Freitas .
 Dimensionamento à força cortante em vigas de
 concreto armado sem e com adição de fibras de aço /
 Guilherme Freitas Oliveira. - 2022.
 40 f. : il.

 Orientador: Leonardo Henrique Borges de
 Oliveira.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
 2022.

 1. Concreto. 2. Fibras de aço. 3. Força
 cortante. I. Oliveira, Leonardo Henrique Borges
 de, 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: 1115

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.

GUILHERME FREITAS OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO À FORÇA CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO SEM E COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: __10__ / __06__ / 2022_____.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA
Data: 23/06/2022 12:23:40-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira (UFERSA)

Presidente

**MATHEUS FERNANDES DE
ARAUJO SILVA:01435936418**

Assinado de forma digital por MATHEUS
FERNANDES DE ARAUJO SILVA:01435936418
Dados: 2022.06.22 19:37:01 -03'00'

Prof. Dr. Matheus Fernandes De Araújo Silva (UFERSA)

Membro Examinador



ADLA KELLEN DIONISIO SOUSA DE OLIVEIRA
Data: 23/06/2022 10:17:22-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dra. Adla Kellen Dionísio Sousa (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me concedido essa oportunidade e ter me fortalecido durante toda a caminhada.

Agradecer a UFERSA. Por todo apoio durante o curso, pela estadia, pelas oportunidades ofertadas e acima de tudo pelos ensinamentos.

Agradecer a todos professores que de forma direta ou indireta contribuíram na minha formação, em especial quero agradecer aos professores: Glaydson Francisco, por ter sido um professor exemplar e ter me concedido a oportunidade de ser monitor, Cláwsio Rogério, pelos ensinamentos e pela parceria na monitoria, Matheus Fernandes, por ser um excelente professor e tenho certeza que contribuiu muito na minha formação e, por fim, meu orientador de estágio e TCC, Leonardo Oliveira, quero agradece-lo pelos ensinamentos, pela confiança, paciência e orientações.

Agradecer a todos meus amigos e colegas que fizeram parte desta caminhada, em especial quero agradecer: Lucas Queiroz, Álisson Silva (Habadara), Antônio Wanderson, Claudio Rafael e, por último, Thiago Casimiro meu colega de curso e de trabalhos em que tive a oportunidade de conviver com ele, onde formamos uma parceria forte.

Agradecer a minha família! Por todo apoio, dedicação e confiança depositada em mim, quero agradecer a todos meus irmãos: Leonardo Oliveira, Lucélia Freitas, Daniela Freitas, Gabrielly Freitas e Michelly Freitas, em especial quero agradecer aos meus pais: José Leite e Maria do Socorro por serem pessoas extraordinárias e pela dedicação em formar seus filhos.

RESUMO

A adição de fibras de aço na matriz cimentícia do concreto vem ganhando destaque em seu uso/aplicação nos últimos anos, em que, entre outros aspectos, possui potencial de reduzir o comportamento frágil deste. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da adição de fibras de aço, e o comportamento estrutural do concreto armado, através de um estudo comparativo entre os modelos de cálculo estabelecidos pelas normativas brasileiras vigentes. Para o procedimento comparativo realizou-se uma análise paramétrica referente a parcela resistente do concreto frente a força cortante em uma viga dimensionada a partir de uma concepção adotada. Neste procedimento conferiu-se por meio da análise paramétrica a resistência do concreto mediante a força cortante. Os parâmetros variados foram: solicitação, resistência característica do concreto, altura da seção e armadura longitudinal. Os resultados demonstraram que o efeito da adição de fibras pode atribuir ao concreto maiores resistências em relação ao concreto convencional, sendo capaz de substituir totalmente ou parcialmente a armadura.

Palavras-chave: Concreto; Fibras de aço; Força cortante.

ABSTRACT

The addition of steel fibers in the cementitious matrix of concrete has been gaining prominence in its use/application in recent years, on what, among other aspects, has the potential to reduce the brittle behavior of this. In this sense, the present work aims to analyze the effects of the addition of steel fibers, and the structural behavior of reinforced concrete, through a comparative study between the calculation models established by the current Brazilian regulations. For the comparative procedure, a parametric analysis was carried out regarding the resistant portion of the concrete against the shear force in a beam dimensioned from a design adopted. In this procedure, the strength of the concrete through the shear force was verified through parametric analysis. The varied parameters were: load, characteristic strength of the concrete, section height and longitudinal reinforcement, The results showed that the effect of the addition of fibers can give the concrete greater strength compared to conventional concrete, being able to fully or partially replace the armor.

Keywords: Concrete; Steel fibers; Cutting force.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Exemplos de perfis de fibra de arames trefilados a frio.....	15
Figura 02: Curva Carga - CMOD.....	16
Figura 03: Treliça generalizada com diagonais comprimidas inclinadas com ângulo θ e armadura transversal inclinada com ângulo α	18
Figura 04: Modelos de cálculos em função da inclinação das bielas comprimidas.	20
Figura 05: Sistema de laje convencional.	24
Figura 06: Representação da viga bi apoiada.	25
Figura 07: Área de Influência (hachurado).....	26
Figura 8: Taxa de armadura em função da solicitação.	33
Figura 09: Taxa de armadura em função da solicitação para diferentes classes de fibras.	35
Figura 10: Parcela resistente do concreto em função do f_{ck}	36
Figura 11: Parcela resistente do concreto em função da armadura de flexão.....	37
Figura 12: Parcela resistente do concreto em função da altura útil.	38

LISTA DE SIMBOLOS

A_{inf}	Área de influência
A_s	Área de aço da armadura longitudinal
$\frac{A_{sw}}{s}$	Área de aço por espaçamento
b	Largura do corpo-de-prova
b_w	Largura da seção
$CMOD_j$	Espessura da abertura do entalhe
d	Altura útil da seção
d'	Distância do centróide das armaduras longitudinais ao bordo mais externo da viga
f_{cd}	Resistência de cálculo à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ct,d}$	Resistência à tração do concreto de cálculo
$f_{ct,m}$	Resistência média à tração do concreto
F_j	Carga correspondente ao $CMOD_j$
$f_{R,j}$	Resistência residual à tração do CRF correspondente ao $CMOD_j$
f_{yd}	Tensão de escoamento do aço
f_{Ftuk}	Resistência residual última característica à tração do CRF
f_{Ftud}	Resistência residual última de cálculo à tração do CRF
γ_f	Coefficiente de ponderação da resistência residual do CRF no estado limite último
h	Altura da seção
h_{sp}	Distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo-de-prova
l	Vão de ensaio do corpo-de-prova
$M_{m\acute{a}x}$	Momento máximo atuante na viga
M_{sd}	Momento solicitante de cálculo
q_{barras}	Quantidade de barras da armadura longitudinal
q_{comb}	Carga distribuída proveniente da combinação
q_{pplaje}	Carga distribuída na viga oriunda do peso próprio da laje
q_{ppviga}	Carga distribuída na viga oriunda do peso próprio da viga
q_{var}	Carga variável de acordo com o tipo da edificação e ambiente
$q_{varviga}$	Carga variável distribuída na viga

V_c	Parcela resistente a força cortante do concreto convencional
$V_{m\acute{a}x}$	Força cortante máxima
$V_{Rd,F}$	Parcela resistente a força cortante do concreto reforçado com fibras de aço
V_{Rd2}	É a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto
V_{Rd3}	É a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal
α_{v2}	Eficiência do concreto
V_{sd}	Força cortante solicitante de cálculo
V_{sw}	Força resistente a força cortante das armaduras transversais
ρ_1	Taxa de armadura longitudinal
σ_{cp}	É a tensão média na seção transversal de concreto (A_c) por ação de força axial (N_{ed}) devida ao carregamento ou ações de pré-tensão ($N_{Fd} > 0$ para compressão)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	GERAL.....	13
2.2	ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO TEÓRICA	14
3.1	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	14
3.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	15
3.2.1	Resistência à compressão	15
3.2.2	Resistência à tração	16
3.2.3	Caracterização das resistências	17
3.3	ESTADO LIMITE ÚLTIMO – FORÇA CORTANTE	17
3.3.1	Dimensionamento a força cortante em elementos moldados em concreto armado convencional.....	19
3.3.1.2	Modelo de cálculo I (diagonais com inclinação de 45°).	20
3.3.1.3	Modelo de cálculo II (diagonais comprimidas com inclinação entre 30° e 45°).....	21
3.3.1.3	Taxa de armadura mínima	22
3.3.2	Dimensionamento a força cortante com CRFA	22
4	METODOLOGIA	24
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS VIGAS	24
4.2.1	Etapa 1 – caracterização da geometria.....	24
4.2.1	Etapa 2 – Análise estrutural	25
4.2.1	Etapa 3 – Dimensionamento	29
4.2.1.1	Armadura longitudinal.....	29
4.2.1.2	Armadura transversal (concreto armado convencional).	30
4.2.1.3	Armadura transversal (CRFA).....	31

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	ANÁLISE PARAMÉTRICA	33
5.1.2	Efeito da taxa de armadura	33
5.1.3	Influência das classes do CRFA	34
5.1.4	Influência da classe do concreto	36
5.1.1	Influência da área de aço da armadura longitudinal	37
5.1.5	Influência da altura útil da seção	38
6	CONCLUSÕES	39
6.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que obteve grande avanço nos últimos anos, condicionada por inovação e fatores que permitem realizar construções visando um ótimo desempenho. Paralelo a isso, sabe-se que há diversos fatores embasados no procedimento construtivo de uma obra, os materiais, por exemplo, são primordiais no andamento e desempenho da construção sendo que devem apresentar características adequadas frente a sua utilização.

Dentre os materiais de construção ressalta-se o concreto, este, por sua vez é utilizado em larga escala no ramo da construção, de modo que seu emprego decorre em razão de apresentar aspectos favoráveis mediante a dinâmica da construção, entre alguns confere-se: versatilidade de aplicação, elevada resistência a compressão, baixo custo e durabilidade. No entanto, o concreto apresenta algumas limitações como baixa resistência a tração e pequena capacidade de deformação o que o torna um material frágil (FIGUEIREDO, 2011).

Além disso, conforme Ibracon (2016), é o segundo material mais consumido do mundo com exceção da água. Mediante a esta utilidade, sabe-se que o concreto é um dos principais componentes estrutural, assim, busca-se inovar e verificar a otimização dele através de mecanismos que possuam potencial de absorver as solicitações que lhe são impostas.

Tais solicitações são esforços oriundos de cargas aplicadas a estrutura, bem como seu peso próprio, pode-se citar alguns deles como, esforços normais (compressão e tração), flexão, torção e cortante. O concreto armado convencional possui armaduras que são projetadas para suportar tais esforços, estas, por sua vez, são dispostas de duas formas: longitudinal, em que sua finalidade é resistir aos esforços de flexão, e de forma transversal, as quais se opõem aos esforços de cisalhamento.

Esta última, é chamada de estribos, sua quantidade, diâmetro e espaçamento entre si dependem de alguns fatores relativos aos esforços atuantes na viga, assim como a geometria da mesma e conforme as prescrições da ABNT NBR 6118 (2014). No entanto, a busca por inovação e otimização dos mecanismos resistentes do concreto faz com que surja novas tecnologias voltadas para a utilização de materiais que apresentem características compatíveis com as condições de aperfeiçoamento do material.

Conforme apresentado por Santos Júnior (2021), um material cujo seu emprego vem em uma crescente nos últimos anos são os concretos reforçados com fibras de aço (CRFA). Sua utilização no Brasil vem ganhando espaço, sendo que sua aplicação está concentrada em baixo consumo de fibras. O objetivo do incremento de fibras de aço no concreto, é entre outros, o de

reduzir o comportamento frágil característico do concreto, uma vez que passa a apresentar uma resistência residual à tração mesmo após fissuração, a qual é dada pelo somatório de pequenas forças provenientes das fibras que possuem a capacidade de transferir tensões ao longo da fissura (FIGUEIREDO, 2011).

Nesse contexto, é viável o estudo deste material, tendo em vista que apresenta mecanismos com capacidade de inibir as deficiências do concreto. Neste limiar, é importante analisar os efeitos da adição de fibras de aço sobre o comportamento ao cisalhamento em vigas de concreto armado, por meio de um estudo comparativo entre os modelos de cálculo para o dimensionamento estabelecidos pelas normas brasileiras. Assim, este estudo busca contribuir com a compreensão das especificações de projeto e aperfeiçoamento do concreto armado reforçado com fibras de aço e avaliar as vantagens dessa tecnologia, no que diz respeito ao seu desempenho estrutural.

2 OBJETIVOS

Neste item serão apresentados os objetivos, de modo geral e específico, que se pretende atingir com a realização desta pesquisa.

2.1 GERAL

- ✓ Comparar os parâmetros inerentes ao dimensionamento para esforço cortante de uma viga moldada em concreto reforçado com fibras de aço e uma viga moldada em concreto convencional conforme recomendações da ABNT NBR 16935 (2021).

2.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Desenvolver o procedimento de dimensionamento para esforço cortante de uma viga de concreto armado convencional;
- ✓ Desenvolver o procedimento de dimensionamento para esforço cortante de uma viga de concreto armado com adição de fibras;
- ✓ Analisar uma viga modelo reforçada com fibras de aço e uma viga convencional.

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

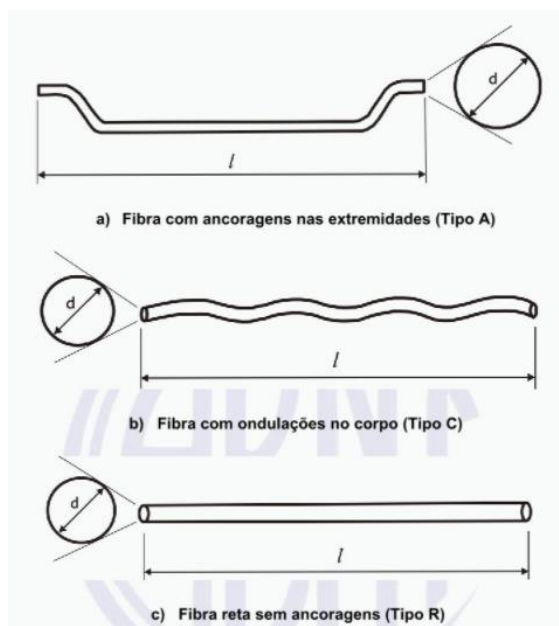
O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é um material compósito em que as fibras são introduzidas na matriz cimentícia do concreto. As fibras são elementos descontínuos, as quais possuem comprimento muito superior a maior dimensão da seção transversal, geralmente mede entre 25mm (fibras curtas) a 60mm (fibras longas), quanto a sua disposição, podem ser fornecidas soltas ou coladas em pente, esta última, facilita no processo de mistura e homogeneização do material (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo Santos Júnior (2021), no Brasil a utilização deste compósito data desde o final da década de 80 e início da década de 90, em que a fibra mais utilizada são as fibras de aço (Concreto Reforçado com Fibra de Aço – CRFA). Geralmente é adicionada em baixo teor, uma vez que os principais objetivos são tornar o concreto mais dúctil, tenaz, e promover o controle da fissuração.

Entretanto, em alguns casos é conveniente aumentar o teor de fibras no concreto, por exemplo, para melhorar a resistência a tração caso este que é possível com elevados teores de fibras. Contudo, em relação às reações das fibras aderidas no concreto frente as solicitações impostas a ela podem-se obter resultados efetivos, como por exemplo em uma viga de concreto onde os cálculos exigem apenas uma taxa mínima de armaduras transversais, nessas situações as fibras podem suprir a ausência dos estribos, desempenhando o papel dos mesmos (SANTOS JÚNIOR, 2021).

Nesse sentido, a ABNT NBR 15530 (2019) prevê três tipos de fibras de aço em função de seus perfis: tipo A (fibra de aço com ancoragem nas extremidades), tipo C (fibra de aço corrugada) e tipo R (fibra de aço reta sem ancoragens). Esta especificação se refere ao perfil longitudinal da fibra de aço em que se pode ser visto na Figura 01.

Figura 01: Exemplos de perfis de fibra de arames trefilados a frio.



Fonte: NBR 15530 (2019).

3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

3.2.1 Resistência à compressão

No que se remete a cargas uniaxiais aplicadas ao CRFA, Torres (2018) disserta que os efeitos são variáveis e que alguns aspectos podem influenciar na variabilidade dos ensaios, dentre eles, tem-se: geometria do molde utilizado (cilíndrico ou cúbico), métodos de compactação, vibração das amostras, entre outros. Em geral as relações de compressão válidas para o concreto convencional são aplicadas para o concreto reforçado com fibras de aço.

Segundo Torres (2018), a adição de fibras de aço com ganchos no concreto não resulta em mudanças significativas no valor da resistência à compressão, sendo que em alguns casos a resistência pode atingir valores inferiores relativos ao concreto sem fibras. Entretanto, o aumento do teor de fibras no concreto influencia no comportamento relacionado a curva tensão-deformação, em que após atingir o patamar mais elevado de tensão, a curva possui inclinação no ramo descendente menos abrupta (TAHENNI, CHEMROUK E LECOMPTE, 2016).

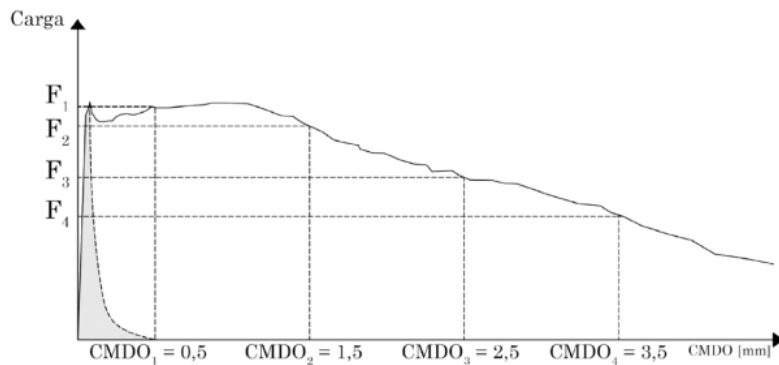
3.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração é um dos principais aspectos influenciados a partir do incremento das fibras de aço na matriz cimentícia do concreto. Para Braz e Nascimento (2015), a adição das fibras de aço ao concreto produz um aumento significativo da resistência à tração e esse comportamento é um dos principais objetivos da adição, tendo em vista que o concreto convencional apresenta apenas de 7 a 10% de sua resistência a compressão.

Nesse contexto, as fibras atuam de forma a se opor a propagação de fissuras oriundas das solicitações de tração, logo estas combatem tal patologia atuando como uma ponte de ligação, as quais transferem os esforços de um lado para o outro da matriz, minimizando as tensões nas extremidades das fissuras. Entretanto, alguns parâmetros influenciam fortemente na resistência à tração desse concreto reforçado, tais como: teor de fibras, fator de forma das fibras, características geométricas das fibras, forma da ligação entre a fibra e a matriz de concreto e o processo de mistura realizado (BRAZ E NASCIMENTO, 2015).

As resistências residuais à tração são determinadas por meio da curva Carga - CMOD, obtida através do ensaio de flexão prescrito pela Prática Recomendada: Caracterização do concreto reforçado com fibras por ensaio de flexão, conforme apresentado na Figura 02.

Figura 02: Curva Carga - CMOD.



Fonte: IBRACON (2016).

Dessa forma, a resistência residual à tração do CRF é obtida através da Equação (1):

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (1)$$

Onde:

$f_{R,j}$ é a resistência residual à tração do CRF correspondente ao $CMOD_j$;

F_j é a carga correspondente ao $CMOD_j$;

l é o vão de ensaio do corpo-de-prova;

b é a largura do corpo-de-prova;

h_{sp} é a distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo-de-prova.

3.2.3 Caracterização das resistências

Uma das características intrínsecas do CRFA é a resistência residual pós-fissuração a qual é classificada utilizando quatro letras: **a**, **b**, **c** e **d** e **e** em que correspondem a intervalos os quais compreendem extremos da razão entre a resistência residual (f_{R3}) e a resistência residual (f_{R1}). Sendo assim, tem-se os seguintes intervalos correspondentes (IBRACON/ABECE, 2016).

a: $0,7 > \frac{f_{R3}}{f_{R1}} \geq 0,5;$

b: $0,9 > \frac{f_{R3}}{f_{R1}} \geq 0,7;$

c: $1,1 > \frac{f_{R3}}{f_{R1}} \geq 0,9;$

d: $1,3 > \frac{f_{R3}}{f_{R1}} \geq 1,1;$

e: $1,5 > \frac{f_{R3}}{f_{R1}} \geq 1,3.$

3.3 ESTADO LIMITE ÚLTIMO – FORÇA CORTANTE

Geralmente as estruturas de concreto estão submetidas a vários esforços provenientes das ações externas, sejam elas permanentes, variáveis ou excepcionais, sendo assim estas ações geram tensões normais e tangenciais no elemento estrutural. Esta última, por sua vez, é oriunda de esforços que tendem a cortar ou torcer o material e, portanto, exige do concreto mecanismo que combatam tais solicitações.

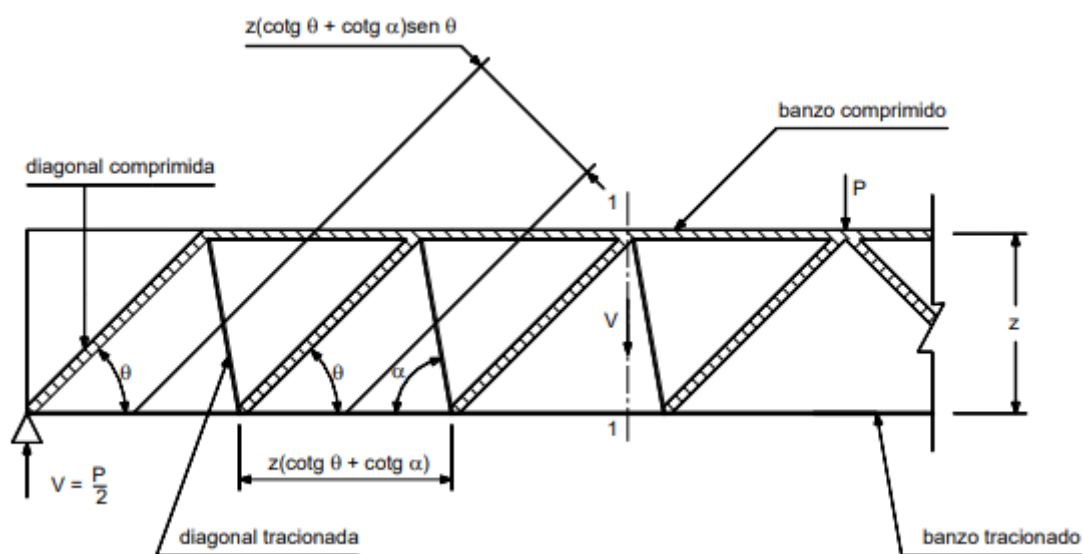
Atualmente, um dos mecanismos que desempenha a função estrutural frente as solicitações tangenciais são chamadas de estribos, o qual é uma armadura de aço que em consonância com o concreto tem a capacidade de dissipar tais esforços. Estas armaduras geralmente são dispostas perpendicular as armaduras de flexão de forma que atuam frente a esforços distintos e não interferem nos seus mecanismos resistentes. Logo, segundo Carvalho e Filho (2014), como ainda não há uma solução que seja simultaneamente precisa e simples a maioria dos procedimentos adota uma tratativa independente para as tensões de cisalhamento e

flexão de uma viga, além de admitir que a contribuição das armaduras transversais e do concreto comprimido, mediante ao esforço cortante, pode ser obtida por meio da analogia de treliça de Ritter-Mörsch.

Esta analogia foi uma proposta feita em 1900 por W. Ritter e E. Mörsch, segundo eles para a determinação da armadura transversal é necessário verificar o equilíbrio da viga a qual possui seu mecanismo resistente associado a uma treliça, sendo que as armaduras transversais e o concreto equilibram conjuntamente o esforço cortante. Embora este modelo inicialmente não ter sido bem aceito, após realizados ensaios de elementos estruturais e feitos alguns ajustes, continuam válidos e são base de cálculo referente ao cisalhamento dos mais importantes regulamentos (CARVALHO E FILHO, 2014).

Dessa forma, tendo em vista o comportamento da viga na ruptura, segundo Bastos (2021), Mörsch idealizou os mecanismos resistentes da viga similar aos de uma treliça, com banzos paralelos e isostática, cujo elementos resistentes são as armaduras longitudinais, as transversais, assim como o concreto comprimido (as diagonais e na região da borda superior), em que as intersecções formam os nós da treliça, essa analogia está representada na Figura 03. Sendo assim, nota-se que o concreto comprimido tem participação relevante na oposição ao cisalhamento, a qual esta resistência é resultado das diagonais de compressão (concreto íntegro entre as fissuras) que, por sua vez, une-se as armaduras potencializando a resistência do elemento estrutural, (CARVALHO E FILHO, 2014).

Figura 03: Treliça generalizada com diagonais comprimidas inclinadas com ângulo θ e armadura transversal inclinada com ângulo α .



Fonte: Bastos (2021).

Mediante esta analogia e através de métodos empíricos, desenvolveu-se modelos de cálculo voltados para o dimensionamento das armaduras transversais, em que dependem de diversos fatores que fazem parte do conjunto de uma viga. Estes fatores referem-se a classe do concreto utilizado, resistência característica, geometria da seção, solicitações, entre outros. Tendo em vista a quantidade de incógnitas envolvidas no tipo e solicitações internas, ressalta-se a ABNT NBR 6118 (2014), a qual prescreve diretrizes, recomendações e especificações dirigidas ao dimensionamento das armaduras.

3.3.1 Dimensionamento a força cortante em elementos moldados em concreto armado convencional

Mediante a análise e informações do comportamento da peça ao cisalhamento, a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece critérios e parâmetros, assim como diretrizes para proceder com a avaliação dos mecanismos resistentes do concreto perante a força cortante.

Segundo a NBR 6118 (2014), a resistência em uma determinada seção transversal é garantida quando satisfazer simultaneamente as duas seguintes equações:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (2)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_C + V_{SW} \quad (3)$$

Em que:

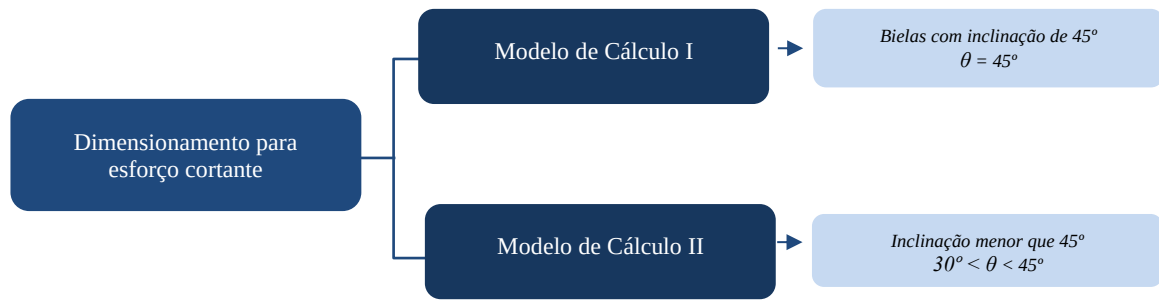
V_{Sd} : é a força cortante solicitante de cálculo, na seção;

V_{Rd2} : é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

$V_{Rd3} = V_C + V_{SW}$: é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal, onde V_C é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça e V_{SW} a parcela resistida pela armadura transversal.

Por sua vez, a Equação 02 refere-se à verificação das diagonais comprimidas, enquanto a Equação 03, verifica a região tracionada dos estribos. A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece dois modelos de cálculo em função da inclinação das diagonais comprimidas.

Figura 04: Modelos de cálculo em função da inclinação das bielas comprimidas.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Em decorrência destes modelos a NBR 6118 (2014) demonstra como se verifica a resistência das diagonais comprimidas, assim como as armaduras transversais.

3.3.1.2 Modelo de cálculo I (diagonais com inclinação de 45°).

Este modelo admite que as diagonais de compressão são inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, além disso, admite que a parcela complementar do concreto V_c tem valor constante, independente de V_{sd} .

A força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas é calculada segundo a Equação 04.

Verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

Onde:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}, f_{ck} \text{ expresso em (MPa)}. \quad (5)$$

Em relação ao cálculo da armadura transversal, a parcela da força cortante V_{sw} a ser absorvida pela armadura é obtida por meio da Equação 6. Sendo que a força cortante resistente de cálculo V_{Rd3} deve ser no mínimo, igual à força cortante solicitante de cálculo V_{sd} ($V_{Rd3} = V_{sd}$).

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (6)$$

Em que a força cortante resistida pela armadura transversal em uma determinada seção é expressa pela Equação 7.

$$V_{SW} = \frac{A_{sw}}{S} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (7)$$

A parcela de força cortante absorvida por mecanismo complementares ao de treliça, ou seja, a parcela resistida pelo concreto íntegro entre as fissuras é obtida através da Equação 8, em que este valor é quantificado para diversas situações de solicitações, conforme a NBR 6118 (2014), no caso de flexão simples e flexotração com a linha neutra cortando a seção a Equação 8 é voltada para tal parcela.

$$V_C = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (8)$$

Resistência do concreto à tração de cálculo:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (9)$$

Segundo a NBR 6118 (2014), f_{ywd} se refere a tensão na armadura transversal passiva, limitada ao valor f_{yd} no caso de estribos e a 70 % desse valor no caso de barras dobradas, não se tomando, para ambos os casos, valores superiores a 435 MPa. α é o ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, podendo-se tomar $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

3.3.1.3 Modelo de cálculo II (diagonais comprimidas com inclinação entre 30° e 45°).

Este modelo admite que as diagonais de compressão têm inclinação θ diferente de 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, podendo ser arbitrada livremente no intervalo $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, nesse caso, considera-se que a parcela complementar V_C sofra redução com o aumento de V_{sd} .

Verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \alpha_{V2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta (\cot \alpha + \cot \theta) \quad (10)$$

Com: $\alpha_{V2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$, f_{ck} expresso em (MPa)

Cálculo da armadura transversal:

$$V_{Rd3} = V_C + V_{SW}$$

Onde:

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{S} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \cdot \sen \alpha \quad (11)$$

$$V_c = V_{c1} \quad (12)$$

$$V_{c1} = \begin{cases} V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \rightarrow V_{sd} \leq V_{c0} \\ V_{c0} \cdot \left(\frac{V_{Rd2} - V_{sd}}{V_{Rd2} - V_{c0}} \right) \rightarrow V_{c0} < V_{sd} < V_{Rd2} \end{cases} \quad (13)$$

3.3.1.3 Taxa de armadura mínima

Para elementos lineares submetido a força cortante, a NBR 6118 (2014), fixou uma quantidade de armadura mínima, a qual é expressa pela Equação 14, chamada de taxa geométrica:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s \cdot \sen \alpha} \geq 0,2 \cdot \frac{f_{ct,m}}{f_{ywk}} \quad (14)$$

Em que:

A_{sw} é a área da seção transversal dos estribos;

s é o espaçamento dos estribos, medindo segundo o eixo longitudinal;

α é a inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal;

b_w é a largura média da alma, mediada ao longo da altura útil da seção;

f_{ywk} é a resistência característica ao escoamento do aço;

$f_{ct,m}$ é a resistência a tração média do concreto.

3.3.2 Dimensionamento a força cortante com CRFA

Perante os conceitos apresentados e discutidos, considera-se a importância de integrar as fibras de aço a matriz cimentícia do concreto, uma vez que esta composição altera benéficamente as propriedades mecânicas dele. A NBR 16935 (2021), prescreve entre outros aspectos, procedimentos a respeito do CRFA, assim como compõem modelos de cálculos voltados aos dimensionamentos de estruturas de concreto perante a adição de fibras de aço.

Dessa forma, de acordo com a norma supracitada segue os procedimentos direcionados ao dimensionamento de vigas de CRFA, em que a resistência do elemento estrutural em uma

determinada seção transversal deve ser considerada satisfatória, pela condição apresentada na Equação 15:

$$V_{sd} \leq V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{sw} \quad (15)$$

Onde:

V_{sw} : parcela do mecanismo treliça;

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,Fmin} \quad (16)$$

Sendo:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0; \quad (17)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d}; \quad (18)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd}; \quad (19)$$

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d; \quad (20)$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

O valor de $V_{Rd,Fmin}$ é limitado superiormente pelo valor obtido pela equação a seguir:

$$V_{Rd,Fmax} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot g \theta + \cot g \alpha}{1 + \cot g^2 \theta}; \quad (22)$$

$$k_c = 0,5 \cdot \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 0,5 \quad (23)$$

Em que a resistência característica à tração direta do CRF, valor último; γ_c é o coeficiente de ponderação do CRF; d é a altura útil da seção transversal, expressa em milímetros (mm); A_{sl} é a área da seção transversal da armadura que se estende além da seção considerada ($\geq l_{bd} + d$); ρ_1 é a taxa de armadura longitudinal; f_{Ftuk} é a resistência característica a tração direta do CRF, valor último, considerando $w_u = 1,5mm$; f_{ctk} resistência característica do concreto à tração direta; f_{ck} resistência característica à compressão do concreto; σ_{cp} é a tensão média na seção transversal de concreto (A_c) por ação de força axial (N_{ed}) devida ao carregamento ou ações de pré-tensão ($N_{Fd} > 0$ para compressão); b_w é a menor largura da seção transversal na zona de tração.

4 METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho consiste em realizar uma análise paramétrica sobre o comportamento do concreto armado convencional e com adição de fibras. Para esta análise, foi adotada uma situação prática em que se considerou um sistema de uma laje apoiada em vigas e, dessa forma, pôde-se realizar a análise de distribuição de cargas da laje para a viga pelo método das charneiras plásticas e consequentemente o dimensionamento da viga.

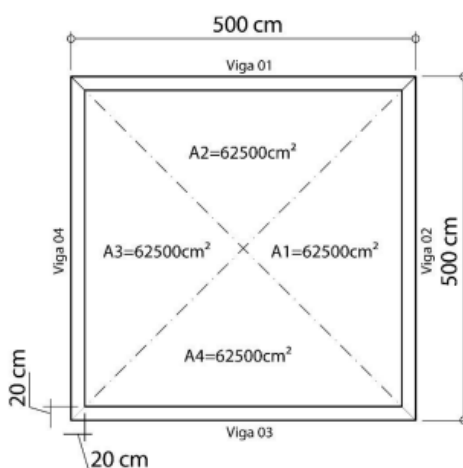
A partir deste dimensionamento pôde-se proceder a análise paramétrica em que variou-se alguns parâmetros relativos a tal resistência, tais como: solicitação, resistência característica do concreto, altura útil da seção, classe das fibras de aço e área da armadura de flexão. Os valores de resistência foram dispostos em gráficos em função destas variáveis e pode-se comparar, através das curvas, a parcela resistente do concreto armado frente a força cortante.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS VIGAS

4.2.1 Etapa 1 – caracterização da geometria

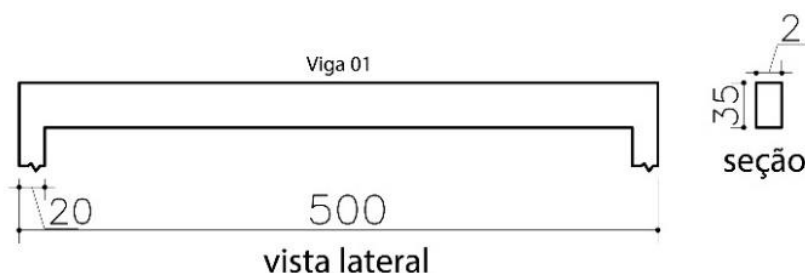
Em procedimento semelhante a Pereira (2021), considera-se um sistema de laje a qual transfere as solicitações para as vigas. Estes esforços são decorrentes do peso próprio (carga permanente) e utilização (carga variável), a Figura 05 ilustra tal estrutura.

Figura 05: Sistema de laje convencional.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 06: Representação da viga bi apoiada.



Fonte: Autoria Própria (2022).

A Figura 05 apresenta um painel de laje em que sua geometria se assemelha a um quadrado, o qual possui dimensões medindo 500cm. A laje está apoiada em quatro vigas iguais, isto é, possui a mesma seção e o mesmo vão teórico de 480cm, a Figura 06 ilustra a disposição de uma destas vigas, bem como apresenta a seção transversal da mesma.

Tendo em vista esse sistema, a partir do método das charneiras plásticas, em que confere as cargas atuantes na laje e transfere para as vigas por intermédio da área influência (A_{inf}). Na Figura 05 nota-se que área da laje foi subdividida em triângulos adjacentes as vigas, estes são as superfícies que transmitem as cargas para elas (ver Figura 07).

Dessa forma, mediante a configuração da laje em questão é perceptível que para dimensionar as armaduras das vigas, resume-se ao dimensionamento de apenas uma delas, uma vez que as demais são idênticas, e recebem os mesmos esforços.

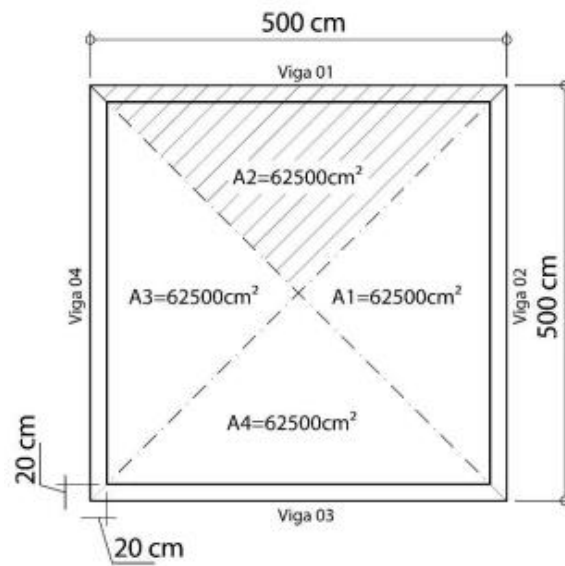
4.2.1 Etapa 2 – Análise estrutural

Para o dimensionamento da viga utiliza-se os preceitos normativos da NBR 6118 (2014), assim segue os cálculos, conforme a área de influência hachurada na Figura 07.

Cálculo da área de influência conforme a Equação 24:

$$A_{inf} = \frac{5m \cdot 5m}{4} = 6,25m^2 \quad (24)$$

Figura 07: Área de Influência (hachurado).



Fonte: Autoria Própria (2022).

Carga permanente:

Considera-se o peso próprio da viga (q_{ppviga}), bem como o da laje (q_{pplaje}), para tanto, conforme NBR 6120 (2019), utiliza-se o peso específico do concreto equivalente a 25kN/m^3 , assim, considerando à altura da laje de 9cm , tem-se:

Peso próprio da viga distribuído no seu comprimento (Equação 25):

$$q_{ppviga} = \frac{25\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,35\text{m} \cdot 0,2\text{m} = 1,75\text{kN/m} \quad (25)$$

Peso próprio da laje distribuído na viga (Equação 26):

$$q_{pplaje} = \frac{\frac{25\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,09\text{m} \cdot 6,25\text{m}^2}{5\text{m}} = 2,8125\text{kN/m} \quad (26)$$

Carga variável:

Para este tipo de carga é necessário consultar a NBR 6120 (2019), onde consta os valores de cargas variáveis conforme o tipo de edificação e o local dela. A Tabela 01 mostra o valor a ser utilizado neste trabalho, considerando uma edificação residencial, e uma laje destinada a uma sala.

Tabela 01: Valores característicos nominais de cargas variáveis.

Local		Carga uniformemente distribuída (kN/m^2)
Edifícios residenciais	Dormitórios	1,5
	Sala, copa, cozinha	1,5
	Sanitários	1,5
	Dispensa, área de serviço e lavadeira	2,0

Fonte: NBR 6120 (2019). Adaptado pelo Autor (2022).

Sendo assim, tem-se o valor da carga variável (q_{var}) medindo:

$$q_{var} = 1,5kN/m^2 \quad (27)$$

Dessa forma, calcula-se a carga transferida para a viga distribuída no seu comprimento, através da área de influência:

$$q_{varviga} = \frac{\frac{1,5kN}{m^2} \cdot 6,25m^2}{5m} = 1,875kN/m \quad (28)$$

Estes valores obtidos são as cargas atuantes na viga e são uma simplificação de cálculo do modelo, logo, para se determinar a carga distribuída total deve-se efetuar uma combinação última do tipo normal, em que as cargas permanentes é o peso dos elementos e tem-se apenas uma carga variável referente ao uso e ocupação. Assim, a Tabela 02 mostra a equação relativa a tal combinação.

Tabela 02: Combinações últimas.

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \Sigma \Psi_{0j} F_{qjk})$ $+ \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk}$

Fonte: NBR 6118 (2014). Adaptado pelo Autor (2022).

De acordo com a equação grifada na Tabela 02, e utilizando o coeficiente de segurança relativo as ações no estado-limite último conforme a NBR 6118 (2014), o qual equivale a 1,4 segue a combinação referente as cargas agindo na viga:

$$q_{comb} = \left(\frac{2,8125kN}{m} + \frac{1,875kN}{m} \right) \cdot 1,4 + \frac{1,5kN}{m} \cdot 1,4 = 8,6625kN/m \quad (29)$$

Diante desta configuração o momento fletor máximo atuante na viga ($M_{sd,máx}$) encontra-se na metade do vão, calculado a partir da Equação 30.

$$M_{sd,máx} = \frac{q_{comb} \cdot l^2}{8} = \frac{8,6625kN}{m} \cdot \frac{(4,8m)^2}{8} = 24,948kNm \quad (30)$$

A força cortante máxima ocorre nas extremidades da viga, isto é, nos locais próximos aos apoios, sendo que para uma carga distribuída uniforme tem-se que para força cortante máxima ($V_{sd,máx}$) equivale a reação de apoio, logo, confere a mesma por meio da Equação 31:

$$V_{sd,m\acute{a}x} = \frac{\frac{8,6625kN}{m} \cdot 5m}{2} = 21,6kN \quad (31)$$

4.2.1 Etapa 3 – Dimensionamento

Foi realizado cálculo das armaduras longitudinais e transversais, sendo que esta última será dimensionada tanto com a utilização do concreto convencional quanto com adição de fibras. Sendo assim, segue os dados subsequentes adotados no dimensionamento.

4.2.1.1 Armadura longitudinal

Para o cálculo da armadura longitudinal foi utilizado os dados dispostos na Quadro 01.

Quadro 01: Dados para o cálculo da armadura longitudinal.

CA – 50	$f_{yk} = 50$
Distância do centróide das armaduras ativas a borda inferior da viga (cm)	$d' = 4$
Altura útil da seção (cm)	$d = 31$
Largura da viga (cm)	$b_w = 20$
Resistência característica do concreto (Mpa)	$f_{ck} = 40$
Resistência ao escoamento do aço (kN/cm ²)	$f_{yd} = 43,48$
Momento de cálculo solicitante (kNcm)	$M_{sd} = 2595,6$

Fonte: Autoria própria (2022).

Para o dimensionamento das armaduras de flexão será utilizada as prescrições da NBR 6118 (2014). Assim, perante estas grandezas, as quais tem-se os valores numéricos obtidos conforme o Quadro 01, pôde-se calcular a quantidade de armadura voltada para promover o equilíbrio referente a rotação na seção.

De acordo com Pereira (2021), em que se utilizou as equações 21 e 26 para determinar a posição da linha e a área de aço respectivamente, logo realizando o cálculo de forma similar, tem-se os seguintes parâmetros.

Área de aço:

$$A_s = 1,98cm^2.$$

Para quantificar as barras que atendem esta área, utilizou-se barras de 10mm, as quais possui área de aproximadamente $0,78cm^2$, sendo assim:

Quantidade de barras segundo a Equação 33:

$$n_{barras} = \frac{1,98cm^2}{0,78cm^2} = 2,54 \quad (33)$$

A quantidade de barras é um número positivo inteiro e, portanto, deve-se adotar o número inteiro imediatamente superior ao calculado, logo, adota-se:

3 barras de 10mm.

4.2.1.2 Armadura transversal (concreto armado convencional).

O dimensionamento referente a armadura transversal será com base no modelo de cálculo I, em que considera a inclinação das diagonais comprimidas medindo 45° , sendo assim, tem-se:

Força cortante solicitante:

$$V_{sd} = 21,6kN.$$

Eficiência do concreto:

$$\alpha_{V2} = 1 - \frac{40}{250} = 0,84 \quad (34)$$

Resistência ao esmagamento das diagonais comprimidas segundo a Equação 04:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot 0,84 \cdot 2,85 \cdot 20 \cdot 31 = 400,75kN \quad (35)$$

Verificação das diagonais comprimidas:

$$V_{Rd2} = 400,75kN > V_{sd} = 21,6kN \quad (36)$$

Assim conforme a Equação 36 as diagonais não sofrem esmagamento.

O dimensionamento segue com o cálculo da armadura mínima, a qual será adotada se a resistência proveniente da mesma superar a solicitação, assim, segundo a Equação 14, tem-se:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{0,2 \cdot 3,5MPa \cdot 20cm \cdot \sin(90)}{500MPa} = 2,8cm^2/m \quad (37)$$

Esta área de aço corresponde a área mínima, em que a viga deve comportar segundo a NBR 6118 (2014).

Para se obter a resistência corresponde a esta armadura, utiliza-se a Equação 07, sendo que consideremos a disposição dos estribos perpendicular a armadura longitudinal:

$$V_{sw} = 0,028 \text{ cm} \cdot 0,9 \cdot 31 \text{ cm} \cdot 43,48 \text{ kN/cm}^2 \cdot (\sin 90^\circ + \cos 90^\circ) = 33,97 \text{ kN} \quad (38)$$

Dessa forma, tem-se:

$$V_{sw} = 33,97 \text{ kN} > V_{sd} = 21,6 \text{ kN} \quad (39)$$

Diante da Equação 39 confirma a armadura mínima na viga.

4.2.1.3 Armadura transversal (CRFA)

Neste dimensionamento considera os parâmetros oriundos da concepção adotada, bem como os mesmos da análise estrutural, vale ressaltar que os efeitos de protensão considerado nas equações serão desprezados ($\sigma_{cp} = 0$), uma vez que a viga analisada é projetada em concreto armado e está sujeita a um caso de flexão simples.

A resistência residual à tração do concreto com adição de fibras considerada no dimensionamento corresponde a classe **a** em que se tem o intervalo relativo a esta classe ($0,5 \leq \frac{f_{R3}}{f_{R1}} < 0,7$). Dessa forma conforme Pereira (2021), neste trabalho adotou-se a simplificação a qual foi considerado a resistência residual a tração do CRF (f_{R1}) equivalente ao valor da resistência média a tração do concreto simples ($f_{ct,m}$). Dessa forma, obtém-se o valor de f_{R3} utilizando o menor valor do intervalo (ver item 3.2.3): $\frac{f_{R3}}{f_{R1}} = 0,5$. Portanto, tem-se os seguintes valores:

Utilizando a classe do concreto C40, obtém-se o valor da resistência média à tração do concreto segundo a Equação 40:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot (40)^{\frac{2}{3}} = 3,5 \text{ MPa} \quad (40)$$

Calcula-se o f_{R3} por meio da Equação 41:

$$f_{R3} = 0,5 \cdot 3,5 = 1,75 \text{ MPa} \quad (41)$$

A resistência residual última característica à tração do CRF (f_{Ftuk}) é tomada como a intensidade do diagrama de tensões na parte tracionada da seção transversal e é definida pela Equação 42.

$$f_{Ftuk} = \frac{f_{R3}}{3} = \frac{1,75MPa}{3} = 0,5833MPa \quad (42)$$

Este valor característico será utilizado na Equação 15, tendo em vista que o coeficiente de segurança imposto pela NBR 16935 (2021) estaria sendo considerado na Equação 15, cujo valor é de 1,5. Mediante estes fatores pôde-se prosseguir com o emprego das equações referente a resistência do CRFA.

As equações 43 a 47 apresentadas a seguir foram descritas no item 3.3.2 em que se refere ao dimensionamento a força cortante (CRFA), logo, estas serão utilizadas neste dimensionamento de acordo com o que prescreve a NBR 16935 (2021), portanto, confere os seguintes parâmetros:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{310}} = 1,8 \quad (43)$$

$$\rho_1 = \frac{3 \cdot 0,78cm^2}{20cm \cdot 35cm} = 3,34 \cdot 10^{-3} \quad (44)$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot 1,756^{\frac{3}{2}} \cdot 40^{0,5} = 0,515 \quad (45)$$

$$V_{Rd,Fmin} = 0,515 \cdot 20cm \cdot 35cm = 360,5kN \quad (46)$$

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{1,5} \cdot 1,8 \cdot \left[100 \cdot 3,34 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + 7,5 \cdot \frac{0,5833}{2,46} \right) \cdot 40 \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \cdot 20 \cdot 35 = 470 \quad (47)$$

$$V_{Rd,F} = 470kN > V_{sd} = 21,6kN \quad (48)$$

Assim, conforme a Equação 48 a resistência da viga com adição de fibras é superior a solicitação e, desse modo, resulta em armadura mínima, a qual já foi calculada anteriormente.

Percebe-se que ambos os casos culminaram em armadura mínima, contudo é notório que o efeito das fibras mediante o cisalhamento detém um valor muito superior ao da resistência do concreto armado, assim podendo ser uma solução viável em situações cuja solicitações preponderantes seja do tipo força cortante.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE PARAMÉTRICA

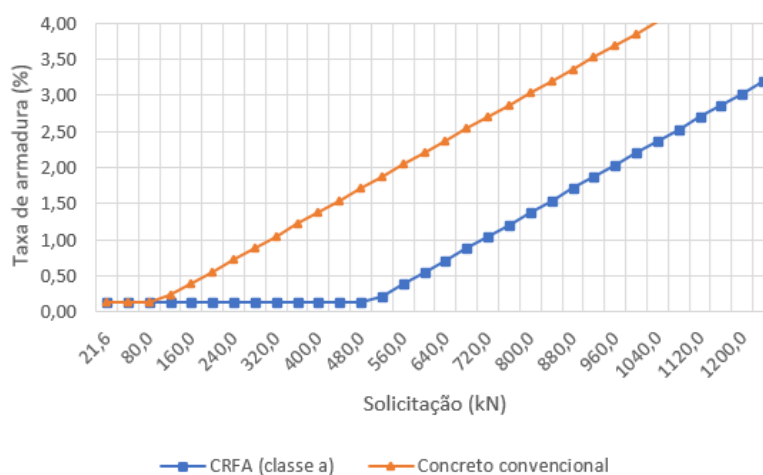
Tendo em vista os dois casos de composição do concreto frente a força cortante, é viável, do ponto de vista estrutural analisar o comportamento de uma viga sob as duas referidas composições (concreto convencional ou concreto reforçado com fibras de aço), a qual estará sujeita a mudanças de parâmetros, tais como: área de aço transversal, classe do concreto, altura da seção e área da armadura longitudinal. Vale ressaltar, que a viga analisada é decorrente da concepção e dimensionamento realizados no item 4, tal viga é considerada referência para as análises paramétricas realizadas nos itens posteriores.

5.1.2 Efeito da taxa de armadura

Conforme a NBR 6118 (2014), todos elementos lineares submetidos a força cortante devem conter armadura transversal mínima constituída por estribos com taxa geométrica calculada a partir da Equação 13. Esta taxa é empregada em situações nas quais a solicitação de cálculo é inferior a resistência da armadura proveniente desta taxa, ou seja, a taxa de armadura mínima fornece a resistência capaz de inibir tais esforços.

A taxa geométrica de armadura mínima é descartada nas situações em que a solicitação de cálculo supera tal resistência, e deve-se realizar a diferença entre a solicitação e a parcela resistente do concreto, para se obter o valor de solicitação destinado a armadura transversal e, portanto, calcula-se uma nova taxa de armadura superior a mínima.

Figura 08: Taxa de armadura em função da solicitação.



Fonte: Autoria Própria (2022).

A Figura 08 mostra a taxa de armadura em função da solicitação, em que representam a armadura na viga com a concepção adotada no item 4. Assim, para uma solicitação de 21,6 kN resulta em armadura mínima para ambos os tipos de concreto. Uma vez que a solicitação aumenta a tendência é que a taxa de armadura apresente maiores valores, sendo que de acordo com a Figura 08 a parcela resistente pelos mecanismos complementares do concreto convencional é ultrapassada pela solicitação com magnitudes menores em comparação ao concreto reforçado com fibras de aço, assim, necessitando de armaduras maiores que a magnitude mínima. Para o concreto convencional isso ocorre quando a solicitação se aproxima de 100 kN, enquanto o CRFA em aproximadamente 470kN.

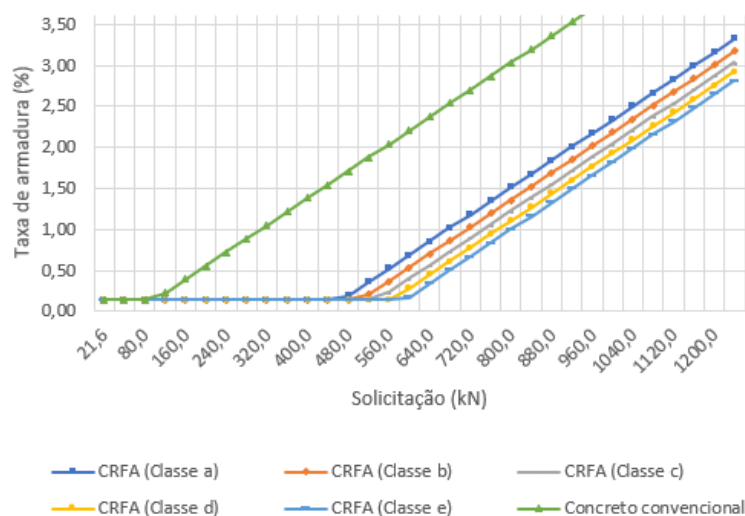
Mediante esta análise nota-se que CRFA apresenta maior resistência perante as solicitações, haja vista que é necessário esforços de maiores magnitudes para que a taxa de armadura possua maiores valores. No entanto, o concreto convencional necessitou de aumentar a taxa de armadura frente a menores esforços, isto implica que a parcela resistente complementar do concreto convencional é muito inferior a parcela referente ao CRFA perante a força cortante.

Além disso, confere na Figura 08 que ambos os casos apresentam comportamento de uma função constante enquanto resulta em taxa de armadura mínima e seguem um regime linear quando as solicitações ultrapassam a parcela resistente do concreto, (ver Equação 03 e 15), logo, conclui-se que as retas são paralelas e, desta forma, evidencia que o CRFA possui mecanismos resistente mediante a força cortante muito superior ao concreto convencional.

5.1.3 Influência das classes do CRFA

Nesta análise foi verificado a taxa de armadura em função da solicitação para diferentes classes de fibras, bem como para o concreto convencional. Esta etapa é similar a anterior em que o parâmetro no qual é alterado é referente a classe das fibras de aço.

Figura 09: Taxa de armadura em função da solicitação para diferentes classes de fibras.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Dessa forma, a Figura 09 apresenta graficamente a taxa de armadura em função da solicitação para as cinco classes de fibras e o concreto armado convencional (IBRACON/ABECE, 2016). Para classe **a** a curva tem o mesmo comportamento do item anterior, assim como para o concreto convencional (ver Figura 08).

As demais curvas se referem as classes do CRFA, as quais são: **b**, **c**, **d** e **e**. estas são relacionadas com a resistência residual pós-fissuração da fibra, sendo que quanto maior esta resistência, mais o concreto aprimora seus mecanismos resistentes ao cisalhamento. Isto pode ser verificado na Figura 09, onde mostra que a parcela resistente do CRFA é maior para classes de fibras que detêm maiores resistência residuais, como visto no item 3.2.3 em que se percebe os intervalos correspondentes, dessa forma, esses valores crescem na seguinte sequência; **a**, **b**, **c**, **d** e **e**.

Mediante esta análise nota-se que a fibra que oferece maior resistência residual, possui a capacidade de aperfeiçoar a resistência do concreto. Logo, a fibra de classe **e** detém a maior resistência dentro das condições adotadas, por isso, no gráfico da Figura 09 é necessário grandes solicitações para resultar em taxa de armadura diferente da mínima.

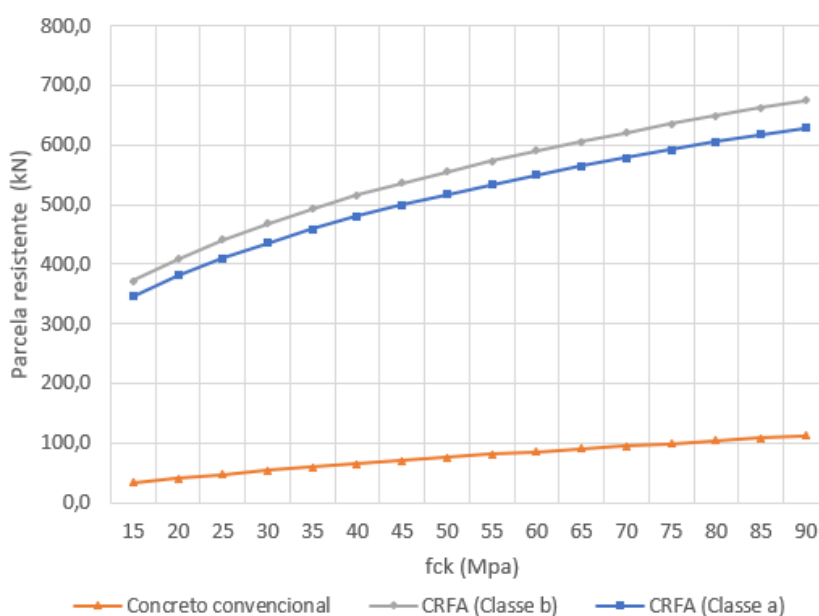
Além disso, percebe-se que todas as curvas possuem o mesmo comportamento, um trecho constante (taxa de armadura mínima) e um trecho linear em que a solicitação é superior a parcela resistente do concreto. O que diferem é apenas esta parcela resistente do concreto, uma vez que ela altera em função do tipo de fibra, não obstante do concreto armado convencional que detém uma parcela resistente muito inferior relativa as parcelas das fibras.

5.1.4 Influência da classe do concreto

Um fator primordial referente aos mecanismos resistentes do concreto é a classe dele, em que mede sua resistência característica à compressão e, esta, por sua vez, cumpre papel fundamental mediante aos esforços que provocam cisalhamento. Tendo em vista que o concreto contribui no combate a estes esforços é de suma importância verificar o comportamento desta resistência à medida que a classe do concreto varia.

Nesta análise considerou-se a mesma seção do item 4, em que foi realizada a comparação entre o comportamento da parcela resistente do concreto convencional (V_c) e o CRFA ($V_{Rd,F}$), a medida que varia o f_{ck} . Foram considerados as classes do grupo I e grupo II, sendo utilizado o modelo de cálculo I e respeitando as equações dispostas pelas NBR 6118 (2014) e NBR 16935 (2021), além disso, para o CRFA adotou-se a classe **a** e **b**.

Figura 10: Parcela resistente do concreto em função do f_{ck} .



Fonte: Autoria Própria (2022).

Conforme a Figura 10 nota-se que a parcela resistente oriunda dos mecanismos resistentes do concreto reforçado com fibras de aço é muito superior a parcela do concreto convencional, além disso percebe-se que essa diferença tende a aumentar na medida que o f_{ck} do concreto tende a valores maiores.

Em relação as classes adotadas referente a fibra de aço, nota-se que a classe **b** possui mais resistência que a classe **a**, cuja curva encontra-se acima da curva da classe **a** e, portanto, teria maior eficiência nesse quesito.

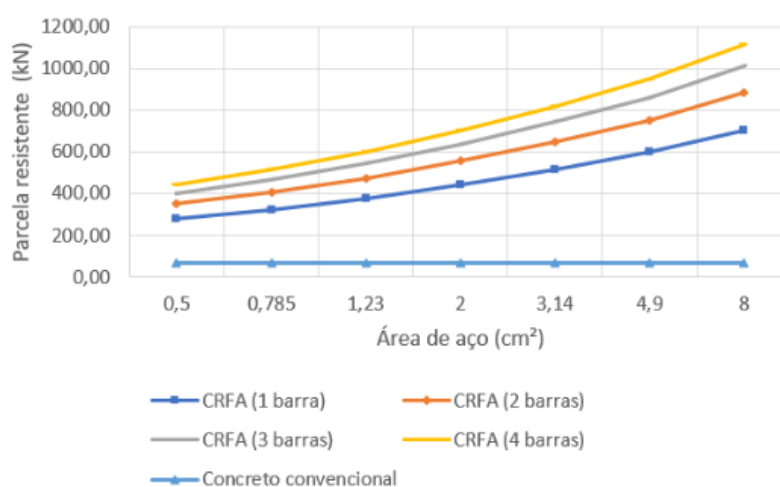
5.1.1 Influência da área de aço da armadura longitudinal

Nesta análise será verificado o efeito da armadura de flexão na resistência do concreto perante a força cortante. No concreto convencional a NBR 6118 (2014) estabelece que a contribuição do concreto frente a força cortante (V_c) depende apenas da resistência à tração do concreto e das dimensões da seção (ver Equação 07), sendo que uma eventual alteração na armadura de flexão não implica em variação nesta resistência.

No entanto, no cisalhamento, a armadura longitudinal contribui para o efeito pino da armadura, aumentando a capacidade resistente a força cortante. Essa consideração não é considerada para o concreto convencional.

Entretanto, no CRFA esta armadura atribui resistência aos mecanismos resistentes do concreto, a Equação 18 é destinada a obtenção da taxa de armadura longitudinal, a qual é uma razão da área de aço e a área da seção, e quanto maior este valor adimensional, mais elevada será a parcela resistente do CRFA frente a força cortante.

Figura 11: Parcela resistente do concreto em função da armadura de flexão.



Fonte: Autoria Própria (2022).

A Figura 11 representa o comportamento da resistência do concreto na medida que a área da armadura longitudinal varia. Foram feitas cinco curvas a respeito da resistência do concreto das quais quatro representam o CRFA e uma o concreto convencional.

As curvas que variam, isto é, que é incrementado resistência em função da área representam o CRFA, em que estas, diferem apenas pela quantidade de barras na seção, onde foi considerado a seção com uma, duas, três e quatro barras, sendo que cada uma delas

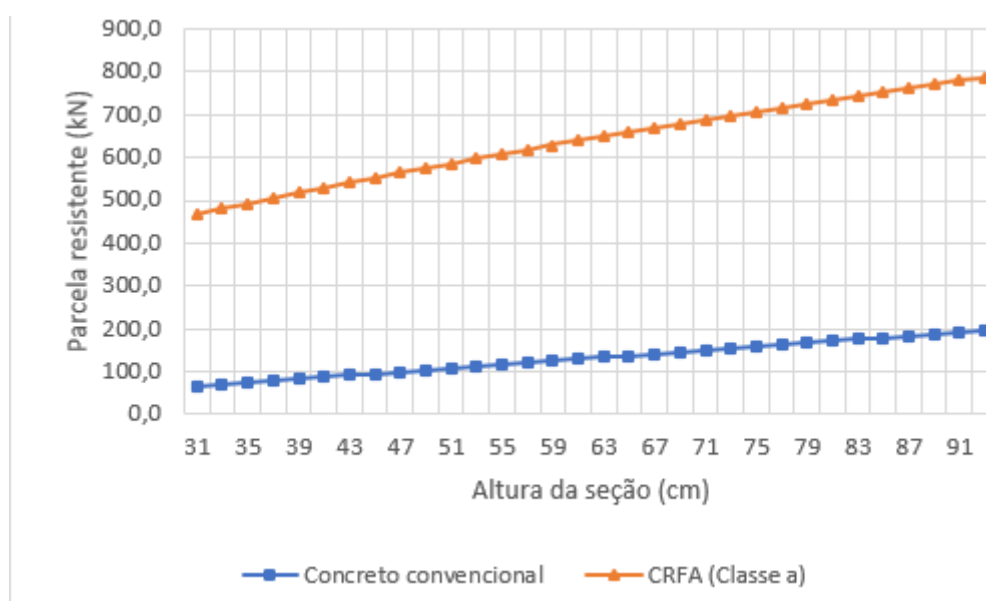
representa uma curva e, assim, variou-se o diâmetro destas barras, e consequentemente sua área. Vale ressaltar que para esta análise foi considerado a classe “a” para o CRFA.

A curva que representa a resistência do concreto convencional possui comportamento de uma função constante, haja vista que a área da armadura longitudinal não contribui nesta resistência.

5.1.5 Influência da altura útil da seção

Um dos parâmetros que influencia na resistência do concreto mediante a força cortante é a área da seção, esta, por sua vez, é função da altura da mesma, logo torna-se relevante a verificação da resistência do concreto na medida que altura útil da seção varia.

Figura 12: Parcela resistente do concreto em função da altura útil.



Fonte: Autoria Própria (2022).

A Figura 12 apresenta graficamente o comportamento da parcela resistente do CRFA, assim como o concreto convencional ambos em função da altura útil da seção. O concreto convencional segue regime linear (ver Equação 07), enquanto o CRFA não segue a mesma proporcionalidade, contudo, percebe-se que a variação da altura culmina em maiores efeitos na resistência do CRFA, tendo em vista que as duas curvas se distanciam na medida que a altura varia, isto é, o CRFA adquire mais resistência em um eventual aumento de altura útil.

6 CONCLUSÕES

Mediante a análise considera-se a composição do concreto com adição de fibras com capacidade de atribuir resistência ao mesmo perante a força cortante. De maneira geral, os resultados apresentaram convergência a respeito da resistência de CRFA apresentar valores superiores ao concreto convencional.

Dessa forma, com o ganho de resistência, a adição de fibras no concreto possui a capacidade de promover a redução da quantidade de armadura. Isto fica evidente na análise da taxa de armadura frente as solicitações, em que o CRFA assegura armadura mínima para elevados valores de solicitação enquanto o concreto convencional necessita de maiores valores para a mesma solicitação.

Outro fator que implica na resistência do CRFA é a classe da fibra utilizada, sendo que quanto maior sua resistência residual à tração, mais oferece oposição ao cisalhamento. O mesmo ocorre com incrementos de resistência característica do concreto (f_{ck}), ou seja, a resistência do CRFA adquire maiores valores que o concreto convencional na alteração desse parâmetro.

De acordo com a NBR 16935 (2021), um parâmetro no qual influencia a resistência ao cisalhamento do CRFA é a área da armadura longitudinal, esta, por sua vez, incrementa resistência na medida em que é atribuído maiores valores de área para tal armadura. Para o concreto armado convencional, embora este tipo de armadura contribua na parcela complementar ao mecanismo de treliça V_c , a NBR 6118 (2014) não considera esse fator e, portanto, de acordo com as equações estabelecidas pelas normas vigentes a armadura longitudinal contribui frente a força cortante no caso do concreto com adição de fibras.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados convergirem e terem indicado que o concreto reforçado com fibras de aço pode ser eficiente na resistência ao cisalhamento e consequentemente ocasionar em redução da quantidade da armadura, é conveniente realizar outros trabalhos com intuito de ampliar o conhecimento acerca do desempenho estrutural deste material.

Entre os trabalhos sugeridos citam-se: conduzir um estudo da contribuição das fibras para esforços internos de cisalhamento oriundo de momento torsor; investigar outras formas de seções transversais; investigar outros tipos de fibras e conduzir experimental/numérico que possa confirmar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2021.

BASTOS, Prof. Dr. Paulo Sérgio. **Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado à Força Cortante**. 2021. 2123 - Estruturas de Concreto II. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Cortante.pdf>. Acesso em: 31 maio 2022.

BRAZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibras de aço. **Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v. 3, n. 1, 43–56, 2015.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 248f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. São Paulo, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO; Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural. **Prática recomendada IBRACON/ABECE: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras**. 1. ed. 2016.

PEREIRA, N. S. **Estudo comparativo do dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado convencional e reforçadas com fibras de aço**. 2021. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Pau dos Ferros, 2021.

SANTOS JÚNIOR, Marinaldo dos. **Avaliação da substituição da armadura transversal mínima por fibras de aço em vigas de concreto armado**. 2021. 215 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

TAHENNI, T.; CHEMROUK, M.; LECOMPTE, T. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 14–28, 2016.

TORRES, C. A. B. **Análise experimental e numérica do comportamento de vigas de concreto armado com adição de fibras de aço**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2018.