

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JESSICA ALEIXO DO PRADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE O EFEITO DA ARMADURA DE  
CISALHAMENTO EM VIGAS SUBMETIDAS A CARGAS DE IMPACTO**

CAMPO MOURÃO

2019

JESSICA ALEIXO DO PRADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE O EFEITO DA ARMADURA DE  
CISALHAMENTO EM VIGAS SUBMETIDAS A CARGAS DE IMPACTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Jeferson Rafael Bueno, Dr. Eng.

CAMPO MOURÃO

2019



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **Trabalho de Conclusão de Curso**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE O EFEITO DA ARMADURA DE CISALHAMENTO EM VIGAS  
SUBMETIDAS A CARGAS DE IMPACTO**

**por**

**Jessica Aleixo do Prado**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 11h00min do dia 25 de junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Me. Ângelo Giovanni Bonfim  
Corelhano  
(UTFPR)**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fabiana Rosa Goia de  
Oliveira  
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno  
(UTFPR)  
*Orientador***

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre atender minhas orações e acalmar meu coração em todos os momentos de desespero e ansiedade, e por ter me guiado e me iluminado em toda minha trajetória de vida, especialmente na graduação.

Agradeço também a minha família que sempre me apoiou e esteve ao meu lado desde o momento em que fui aprovada para estudar engenharia civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, principalmente aos meus pais Letícia e Adilson por não medirem esforços para que eu tivesse as melhores condições de vivência e moradia em todo o período em que fiquei longe de casa, e mesmo com toda a distância, sempre estiveram presentes me apoiando, me dando suporte e me acalmando em todos os momentos em que necessitei de amparo.

Agradeço a todos os amigos que estiveram comigo nessa caminhada, especialmente aos meus companheiros de curso Rafael e Marlon que me auxiliaram com a compra de materiais e execução do ensaio, e foram essenciais para que a fase experimental deste trabalho acontecesse.

Agradeço a todos os professores da UTFPR por terem agregado vasto conhecimento a minha carreira profissional, especialmente ao professor orientador Jeferson Rafael por todo o auxílio e toda atenção e dedicação prestada para que este trabalho fosse concluído.

Também agradeço ao técnico do laboratório de materiais da universidade, Fábio, que foi muito atencioso e me auxiliou em todas as etapas do processo experimental da melhor forma possível.

Por último, deixo minha gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que por vários momentos foi minha segunda casa em Campo Mourão, sou imensamente feliz por ter a oportunidade de concluir minha primeira graduação nessa universidade tão maravilhosa e acolhedora.

## RESUMO

As vigas de concreto armado presentes em estruturas de pontes, viadutos e passarelas normalmente estão sujeitas a sofrerem desgaste, não só por ações de ventos e chuvas, mas também através de impactos diretos na estrutura, podendo chegar à ruína. Devido a notícias recentes envolvendo quedas de viadutos e passarelas, e ao fato de que a análise da armadura de cisalhamento em vigas de concreto armado submetidas a carregamentos excepcionais é pouco explorada no cenário acadêmico brasileiro, considerou-se importante a realização deste trabalho. Para a análise da armadura de cisalhamento em vigas de concreto armado submetidas a cargas de impacto, foi realizado um estudo experimental em duas vigas de concreto armado, uma com a armadura de cisalhamento a  $90^\circ$  da armadura longitudinal, e a outra com a armadura de cisalhamento a  $45^\circ$  da armadura longitudinal. As vigas foram submetidas ao mesmo número de impactos, e assim, pôde-se analisar o comportamento de ambas. Deste experimento, conclui-se que a disposição das armaduras transversais influencia no modo como surgem as fissuras nas vigas e, em relação à resistência, verificou-se que as armaduras de cisalhamento dispostas a  $45^\circ$  possibilitam um melhor comportamento conjunto dos mecanismos de resistência da viga.

**Palavras-chave:** Impacto; Armadura de cisalhamento; Análise experimental.

## ABSTRACT

The reinforced concrete beams in bridges, viaducts and footbridges are often subject to wear and tear, not only by wind and rain, but also by direct impacts on the structure, which can lead to ruin. Due to recent reports of falls of viaducts and footbridges, and the fact that the shear reinforcement analysis in reinforced concrete beams submitted to exceptional loads is lightly explored in the Brazilian academic scenario, it was considered important to develop this study. For the analysis of the shear reinforcement in reinforced concrete beams submitted to impact loads, an experimental study was carried out on two reinforced concrete beams: one with 90 ° shear reinforcement of the longitudinal reinforcement; and the other with the shear reinforcement at 45 ° of the longitudinal reinforcement. The beams were subjected to equal number of impacts, and thus, the behavior of both beams could be analyzed. From this experiment, it was concluded that the arrangement of the shear reinforcement influences the way in which the cracks appear in the beams and, in relation to the resistance, it was verified that the shear reinforcements arranged at 45 ° allow a better joint behavior of the resistance mechanisms of the beam.

**Keywords:** Impact; Shear reinforcement; Experimental analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do trabalho.....	6
Figura 2: Representação esquemática de um pêndulo de impacto e das variáveis utilizadas no cálculo da energia absorvida na fratura. ....	8
Figura 3: Carregamento de impacto em viga biapoiada. ....	9
Figura 4: Esquema geral do aparato desenvolvido para a aplicação da carga.....	12
Figura 5: Aparato para aplicação da carga de impacto. ....	13
Figura 6: Viga preparada para ensaio dinâmico. ....	13
Figura 7: Viga preparada para ensaio estático. ....	14
Figura 8: Ruptura em ensaio estático da viga.....	14
Figura 9: Ruptura da viga com martelo solto a 50 cm. ....	15
Figura 10: Ruptura da viga com martelo solto a 100 cm. ....	15
Figura 11: Ruptura da viga com martelo solto a 150 cm. ....	15
Figura 12: Ruptura da viga com martelo solto a 200 cm. ....	16
Figura 13: Ruptura da viga com martelo solto a 250 cm. ....	16
Figura 14: Detalhe da viga de concreto armado.....	17
Figura 15: Teste da carga de impacto. ....	18
Figura 16: Modos de falha a uma altura de 100mm no teste de impacto único. ....	18
Figura 17: Modos de falha a uma altura de 400mm no teste de impacto único. ....	18
Figura 18: Relações entre a deflexão máxima da viga e o número de golpes no teste de carga de impacto repetido. ....	19
Figura 19: Detalhamento das armaduras da viga de concreto armado.....	20
Figura 20: Máquina de teste de impacto com peso reduzido. ....	20
Figura 21: Viga de concreto armado não reforçada após o ensaio de impacto. ....	21
Figura 22: Modo de falha da viga de concreto armado não reforçada. ....	21
Figura 23: Evolução da fissuração.....	23
Figura 24: Componentes de tensão segundo os estados de tensão relativos aos eixos principais e aos eixos x-y. ....	24
Figura 25: Analogia da treliça.....	25
Figura 26: Analogia clássica de treliça com as forças internas de uma viga na região próxima ao apoio. ....	26
Figura 27: Treliça generalizada para vigas seção T com alma espessa e alma delgada. ....	26
Figura 28: Ruptura por esmagamento da biela.....	27
Figura 29: Ruptura da armadura transversal. ....	28
Figura 30: Ruptura do banzo comprimido.....	28
Figura 31: Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal.....	29
Figura 32: Detalhamento da armadura de cisalhamento disposta a 90° da armadura longitudinal. ....	36
Figura 33: Armadura de cisalhamento disposta a 90° da armadura longitudinal. ....	37
Figura 34: Detalhamento da armadura de cisalhamento disposta a 45° da armadura longitudinal. ....	37
Figura 35: Armadura de cisalhamento disposta a 45° da armadura longitudinal. ....	37
Figura 36: Vigas e corpos de prova após a concretagem. ....	38
Figura 37: Vigas após o desmolde.....	39
Figura 38: Corpos de prova após o desmolde. ....	39
Figura 39: Imagens do impactador. a) Vista lateral b) Vista frontal. ....	41
Figura 40: Sistema utilizado no ensaio de impacto em viga de concreto de armado.....	42
Figura 41: Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 3 impactos – lado A. ....	44
Figura 42: Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 3 impactos – lado A, com as fissuras em evidência. ....	45
Figura 43: Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado A. ....	45
Figura 44: Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado A, com fissuras em evidência. ....	46
Figura 45: Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado B. ....	46
Figura 46: Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado B, com fissuras em evidência. ....	47
Figura 47: Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 2 impactos – lado A, com a fissura em evidência. ....	48
Figura 48: Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 2 impactos – lado B, com a fissura em evidência. ....	48

Figura 49: Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado A. ....	49
Figura 50: Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado B. ....	49
Figura 51: Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado A, com as microfissuras em evidência. ....	50
Figura 52: Microfissuras na viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado B, a direita, com as microfissuras em evidência ....	50
Figura 53: Microfissuras na viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado B, a esquerda, com as microfissuras em evidência. ....	51



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Material utilizado para confecção do concreto.....	35
Tabela 2: Resultados do ensaio à compressão dos corpos de prova de concreto. ....	40
Tabela 3: Resultados do ensaio da determinação do módulo estático de elasticidade do concreto à compressão.....	41
Tabela 4: Análise comparativa entre as vigas 1 e 2 após o ensaio experimental de impacto. ....	52

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFC	Compósito de Fibra de Carbono
NBR	Norma Brasileira
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	4
1.1.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>1.2 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 ESTRUTURA</b> .....	<b>5</b>
<b>2 EFEITOS DO IMPACTO EM BARRAS</b> .....	<b>7</b>
<b>3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS A CARGAS DE IMPACTO</b> .....	<b>11</b>
3.1 ESTUDO DE SANTOS (2008).....	11
3.2 ESTUDO DE FUJIKAKE, SOEUM E MATSUI (2018).....	16
3.3 ESTUDO DE KIM ET AL. (2018).....	19
<b>4 MECANISMOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO</b> .....	<b>22</b>
4.1 TENSÕES PRINCIPAIS .....	23
4.2 ANALOGIA DA TRELIÇA DE MORSCH .....	24
4.2.1 Treliça Generalizada .....	26
4.3 MODOS DE RUÍNA .....	27
4.3.1 Ruínas por flexão .....	27
4.3.2 Ruptura por esmagamento da biela .....	27
4.3.3 Ruptura da armadura transversal.....	28
4.3.4 Ruptura do banzo comprimido devido ao cisalhamento.....	28
4.3.5 Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal .....	29
4.4 CÁLCULO DA ARMADURA TRANSVERSAL SEGUNDO A ABNT NBR 6118:2014 .....	29
4.4.1 Verificação do estado limite último.....	30
4.4.2 Modelo de Cálculo I .....	31
4.4.3 Modelo de Cálculo II .....	32
<b>5 MÉTODO E MATERIAIS</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1 MATERIAIS</b> .....	<b>34</b>
5.1.1.1 Concreto .....	34
5.1.1.2 Aço.....	35
<b>5.2 ARRANJO DAS ARMADURAS</b> .....	<b>36</b>

<b>5.3</b>	<b>CONCRETAGEM.....</b>	<b>38</b>
<b>5.4</b>	<b>ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>40</b>
5.4.1.1	Ensaio à compressão.....	40
5.4.1.2	Ensaio da determinação do módulo estático de elasticidade do concreto à compressão.....	40
<b>5.5</b>	<b>ENSAIO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
<b>5.6</b>	<b>PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISES DO RESULTADO.....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	<b>RESULTADOS: ARMADURA DE CISALHAMENTO A 90° .....</b>	<b>44</b>
<b>6.2</b>	<b>RESULTADOS: ARMADURA DE CISALHAMENTO A 45° .....</b>	<b>47</b>
<b>6.3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE A ARMADURA DE CISALHAMENTO PARA TESTES DE IMPACTO .....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Acidentes como quedas de pontes e viadutos podem causar muitos transtornos, principalmente à população local da região do desabamento, como também pode causar graves danos à vida de pessoas que estão no local no momento em que o acidente ocorre. Além dos danos já citados, a queda de pontes e viadutos acarreta também danos financeiros, sendo que a responsabilidade financeira dos reparos que devem ser realizados quando um acidente desse tipo acontece fica a cargo do governo local.

No ano de 2018 ocorreram quedas que geraram impacto na vida da população residente no local da queda. Segundo o G1 (2018), em janeiro, houve a queda de uma passarela na cidade do Rio de Janeiro. A passarela foi atingida pela caçamba de um caminhão, que estava levantada, e com o impacto, cedeu. Segundo a secretaria municipal de urbanismo da cidade, apesar de provisória, a estrutura não era frágil. Como consequência do acidente, o motorista do caminhão faleceu, e um pedestre que passava pela passarela no momento da queda ficou levemente ferido.

Já em novembro, relacionado ao cisalhamento das estruturas, segundo Cerqueira (2018), um problema no apoio do viaduto da Marginal Pinheiros fez com os pilares do viaduto cedessem, ocasionando colapso do mesmo por cisalhamento. Como consequência deste desabamento, a população teve transtornos necessitando fazer caminhos alternativos para suas atividades rotineiras.

Levando em consideração notícias como essas, e visando se obter mais conhecimento sobre o assunto de impacto relacionado a força de cisalhamento, e, por não se encontrar tanta informação acerca do tema, considerou-se importante a elaboração desse trabalho.

Dessa forma, este trabalho de conclusão de curso busca responder o seguinte questionamento: é possível analisar experimentalmente o efeito da armadura de cisalhamento em vigas submetidas a cargas de impacto? E assim, a resposta dessa pergunta poderá dar uma pequena contribuição na área de projetos de vigas de estruturas de concreto armado submetidas a carregamentos excepcionais.

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho consiste em analisar experimentalmente o efeito da armadura de cisalhamento em vigas submetidas a cargas de impacto, onde o mesmo se divide em três objetivos específicos, em que o foco será o estudo sobre cargas de impacto, o estudo sobre a armadura de

cisalhamento em vigas de concreto armado, e a análise experimental que visa investigar como as vigas de concreto armado com a armadura de cisalhamento em duas diferentes disposições reagem quando submetidas a cargas de impacto.

Portanto, a metodologia consistirá na análise experimental de vigas de concreto armado submetidas a cargas de impacto, onde serão moldados corpos de prova com a armadura de cisalhamento em duas disposições diferentes. Será analisado como cada disposição de armadura reage ao impacto, identificando qual dos dois tipos é o mais resistente considerando a resistência ao cisalhamento, sendo eles: estribos dispostos a 90° da armadura longitudinal e estribos dispostos a 45° da armadura longitudinal.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar experimentalmente o efeito da armadura de cisalhamento em vigas submetidas a cargas de impacto.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Identificar os fenômenos de mecânica em barras submetidas a cargas de impacto;
- Analisar experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado submetidas a cargas de impacto;
- Identificar experimentalmente o tipo de falha em vigas de concreto armado em função de dois tipos de disposição de armadura transversal.

## **1.2 Justificativa**

Analisar a armadura de cisalhamento em relação a cargas de impacto em vigas de concreto armado é importante, pois, a temática é pouco explorada no cenário acadêmico brasileiro, principalmente a nível de graduação. Sabe-se que o estudo do cisalhamento em relação a cargas estáticas já está bem difundido na comunidade de

engenharia, e no meio acadêmico, considerando que esse assunto é abordado em sala de aula.

Porém, cargas excepcionais como em casos de impactos não são assuntos vistos no curso de graduação, e fazem parte de uma situação obrigatória de carregamento específico em algumas estruturas, como, por exemplo, estruturas de defesa (barreiras de proteção e fortes) e estruturas civis, como pontes e portos.

Pode-se observar cargas de impacto agindo em vigas de viadutos, quando ocorre a colisão de caminhões. Outro caso onde podemos observar o fenômeno é em pontes: devido ao recalque dos pilares que compõe a mesma, há um desnível da pista de rolamento da ponte, fazendo com que quando o veículo passe de um tabuleiro para outro, esse recalque acabe causando uma força de impacto, com o peso do veículo em grandes velocidades, que podem ser significativos no projeto da viga, especialmente em relação à força de cisalhamento.

### **1.3 Estrutura**

Conforme a estrutura do trabalho indicada na Figura 1, observa-se que a partir de 1 objetivo geral, foram traçados 3 objetivos específicos, e cada objetivo específico gerará um capítulo de revisão bibliográfica. A partir disso, tem-se a base para escrever os métodos e materiais que serão utilizados, chegando-se as considerações finais.

A seguir, tem-se a uma breve descrição de cada um dos capítulos:

Capítulo 1 – Foram apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do tema proposto e as justificativas que apontam a importância da pesquisa.

Capítulo 2 – Efeitos do impacto em barras: Estudo geral sobre os fenômenos da mecânica em barras submetidas a cargas de impacto.

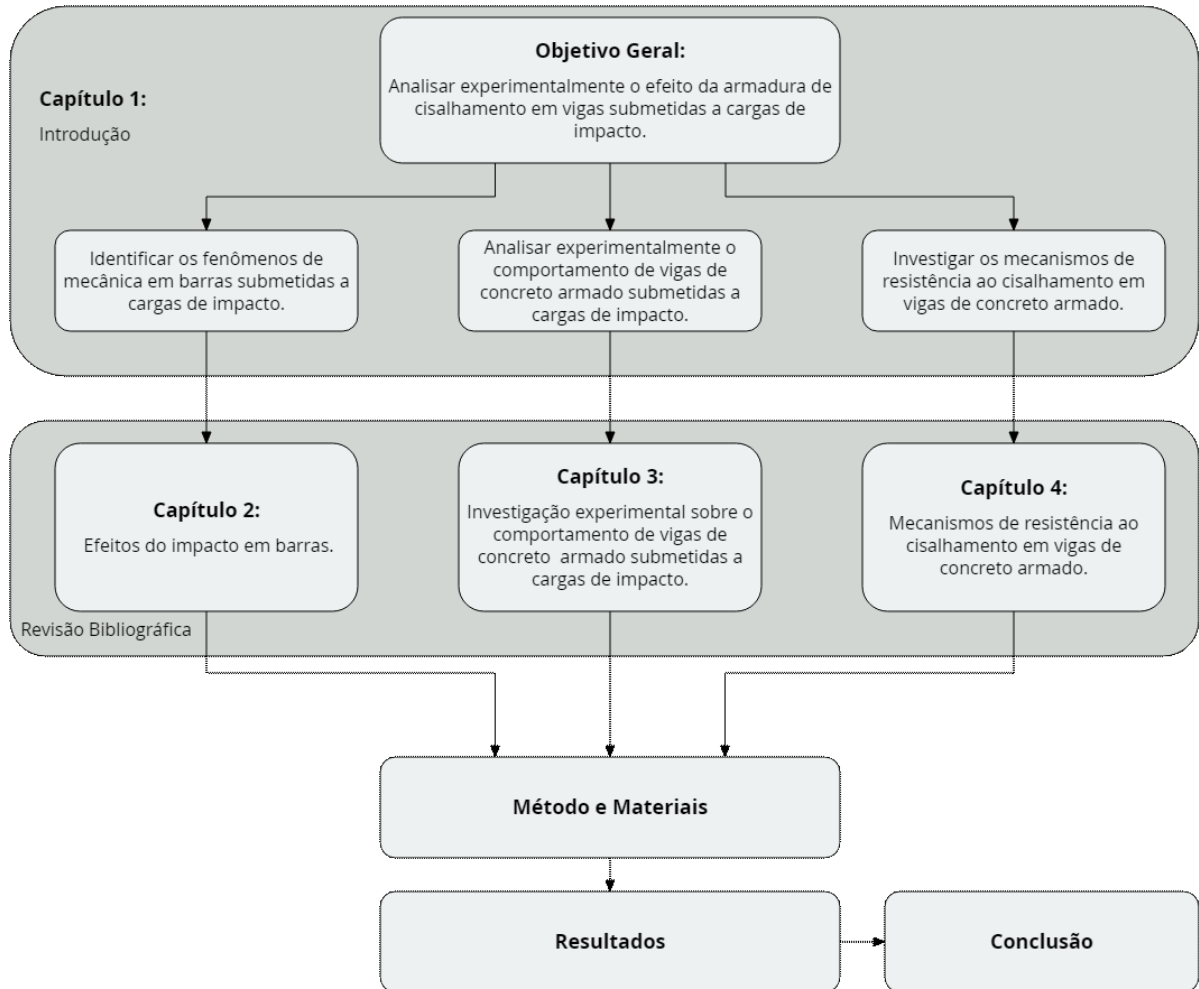
Capítulo 3 – Investigação experimental sobre o comportamento de vigas de concreto armado submetidas a cargas de impacto: Revisões bibliográficas de artigos técnicos publicados sobre ensaios de impacto em vigas de concreto armado.

Capítulo 4 – Mecanismos de resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado: Estudo geral sobre a força cortante atuando em vigas de concreto armado, como as vigas se comportam em relação a resistência ao cisalhamento, e os passos para dimensionar a armadura transversal dessas vigas.

Capítulo 5 – Método e Materiais: Apresentam-se os procedimentos, materiais e meios empregados para a análise experimental.

Capítulo 6 – Resultados e Discussão: Apresentam-se os resultados provenientes da análise experimental com os devidos comentários e verificações.

**Figura 1:** Estrutura do trabalho.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Capítulo 7 – Conclusão: Apresentam-se as conclusões finais sobre o trabalho que foi realizado.

Referências



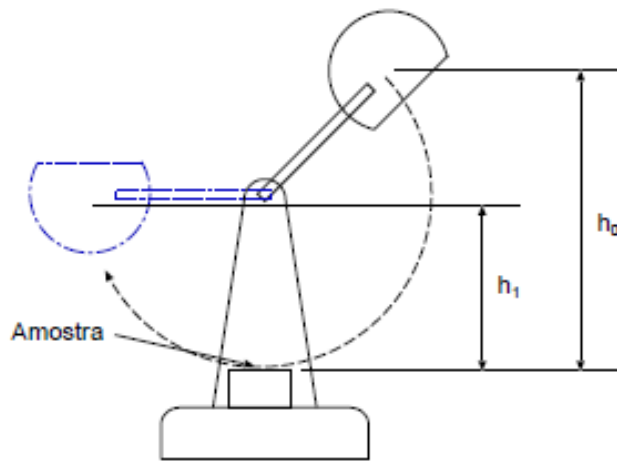
## 2 EFEITOS DO IMPACTO EM BARRAS

Muitas estruturas projetadas pelo ser humano estão suscetíveis a impacto. Segundo Gere (2003), cargas de impacto são cargas aplicadas a um corpo e removidas repentinamente, podendo ser produzidas quando um objeto em queda livre atinge uma estrutura, ou quando dois corpos colidem. O impacto é considerado um fenômeno complexo, já que estão envolvidos o módulo da força, duração de aplicação desta força, e velocidade do impacto, além do comportamento mecânico do material (ALVES, 2009).

Para Alves (2009), os testes de impacto realizados em estruturas têm como objetivo avaliar o comportamento de seus componentes em relação à absorção de energia cinética devido ao impacto. Componentes estruturais como painéis, barras, entre outros perfis têm a função de se deformarem o suficiente, de forma plástica, enquanto absorvem energia sem perder a estabilidade estrutural.

Schön (2009) afirma que a resposta de um material ao esforço mecânico é determinada levando em consideração como esse material recebe a carga aplicada nele. Segundo o mesmo autor, pode-se dividir os ensaios mecânicos em duas classes principais: os ensaios estáticos, nos quais a carga é crescente e aplicada de forma que se obtém baixas taxas de deformação, e os ensaios dinâmicos, onde a carga varia rapidamente com o tempo, podendo ser crescente ou de amplitude variável. Na Figura 2, mostra-se um pêndulo normalmente utilizado em ensaios de impacto, assim como as variáveis utilizadas no cálculo da energia absorvida na ruptura do corpo de prova, quando o material analisado no ensaio é do tipo frágil.

**Figura 2:** Representação esquemática de um pêndulo de impacto e das variáveis utilizadas no cálculo da energia absorvida na fratura.



**Fonte:** Retirado de Schön (2009).

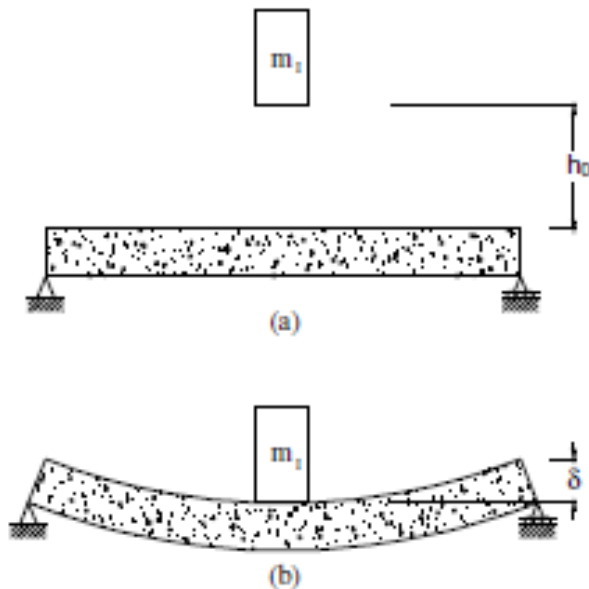
A energia absorvida na ruptura da amostra da Figura 2 tem seu cálculo demonstrado na equação (1), sendo que “m” é a massa do martelo, “g” é a aceleração da gravidade, e “h0” e “h1” são respectivamente as alturas inicial e final do martelo,

$$E_f = m \cdot g \cdot (h_0 - h_1) . \quad (1)$$

Santos (2008) afirma que a taxa do carregamento dinâmico do impacto é quase instantânea, e as forças de amortecimento não conseguem dissipar uma quantidade grande de energia. A resposta da estrutura ao impacto, para Santos, depende da energia de impacto, da rigidez da estrutura, da rigidez do contato e das propriedades mecânicas dos materiais.

Os efeitos do carregamento de impacto em estruturas podem ser avaliados a partir do princípio de trabalho e energia. Na Figura 3, tem-se uma viga biapoiada sujeita ao impacto de um bloco de massa  $m_1$  (SANTOS, 2008).

**Figura 3:** Carregamento de impacto em viga biapoiada.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

Nota-se que o bloco parte do repouso, onde a energia cinética e a energia de deformação são nulas. Após o bloco ser liberado em queda livre, sua energia potencial gravitacional é transformada em energia cinética. Quando a viga atinge sua deflexão máxima, a energia cinética é transformada em energia de deformação da viga, decorrente do trabalho realizado pelo peso do bloco (SANTOS, 2008).

Ainda segundo Santos (2008), quando a viga se deforma, surgem forças de inércia que influenciam a ação do impacto. Quanto maior a altura da queda, maior a velocidade do martelo, e maiores as forças de inércia que surgem contrárias ao movimento da viga, fazendo com que a resistência da viga aumente em relação ao carregamento de impacto.

Em casos de viga de concreto armado, devido à redução da rigidez da viga causada pela fissuração durante o carregamento de impacto, é difícil relacionar a velocidade do bloco durante o impacto e a magnitude da força de inércia. Também é necessário considerar que certa quantidade de energia se dissipa devido à fissuração do concreto e o escoamento da armadura (SANTOS, 2008).

Segundo Alves (2009), quando uma viga sofre uma variação de comprimento, como por exemplo ocorreu na Figura 3, diz-se que o componente sofreu uma deformação longitudinal, exemplificada na equação (2), onde “ $\varepsilon$ ” é a deformação longitudinal ou normal, expressa em porcentagem, “ $l$ ” é o comprimento final da viga, em metros, e  $l_0$  é o comprimento inicial da viga, em metros,

$$\varepsilon = \left( \frac{l-l_0}{l} \right) 100 . \quad (2)$$

Deve-se considerar que a força do impacto causa mudança na quantidade de movimento da estrutura, cujo cálculo é expresso na equação (3), onde “m” é definido em kg e “v” é definido em m/s (ALVES, 2009),

$$Q = m \cdot v . \quad (3)$$

Mucheroni (2011) afirma que os impactos podem ser de natureza elástica ou plástica, sendo que, no impacto elástico não há perda de energia, e os impulsos de deformação e de restauração são iguais, e no impacto plástico não existe impulso de restituição. Quando apenas parte da energia se perde em deformação, o impacto é denominado de “parcialmente elástico”, e é o que costuma ocorrer em situações reais.

### **3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS A CARGAS DE IMPACTO**

Neste capítulo, estão apresentados três estudos experimentais realizados em vigas de concreto armado submetidas a impacto, que foram considerados os mais adequados relacionados a esse trabalho. Apesar desses estudos se tratarem de vigas de concreto armado reforçadas com materiais que aumentam sua resistência, como por exemplo, fibra de carbono, este capítulo foi escrito apenas visando analisar o impacto nas vigas que não foram reforçadas, com o objetivo de mostrar como essas vigas de concreto armado reagiram às cargas de impacto as quais foram submetidas nestes três experimentos.

#### **3.1 Estudo de Santos (2008)**

O estudo de Santos (2008) possui o objetivo de estudar experimentalmente como vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono (CFC) reagem quando submetidas a cargas de impacto. Para isso, Santos utilizou três grupos de vigas diferentes, A, B e C, sendo que no grupo A as vigas não foram reforçadas com CFC. Nos grupos B e C, as vigas foram reforçadas com uma e duas camadas de CFC respectivamente. Para este trabalho, é importante analisar apenas o experimento de Santos nas vigas do grupo A, não reforçadas.

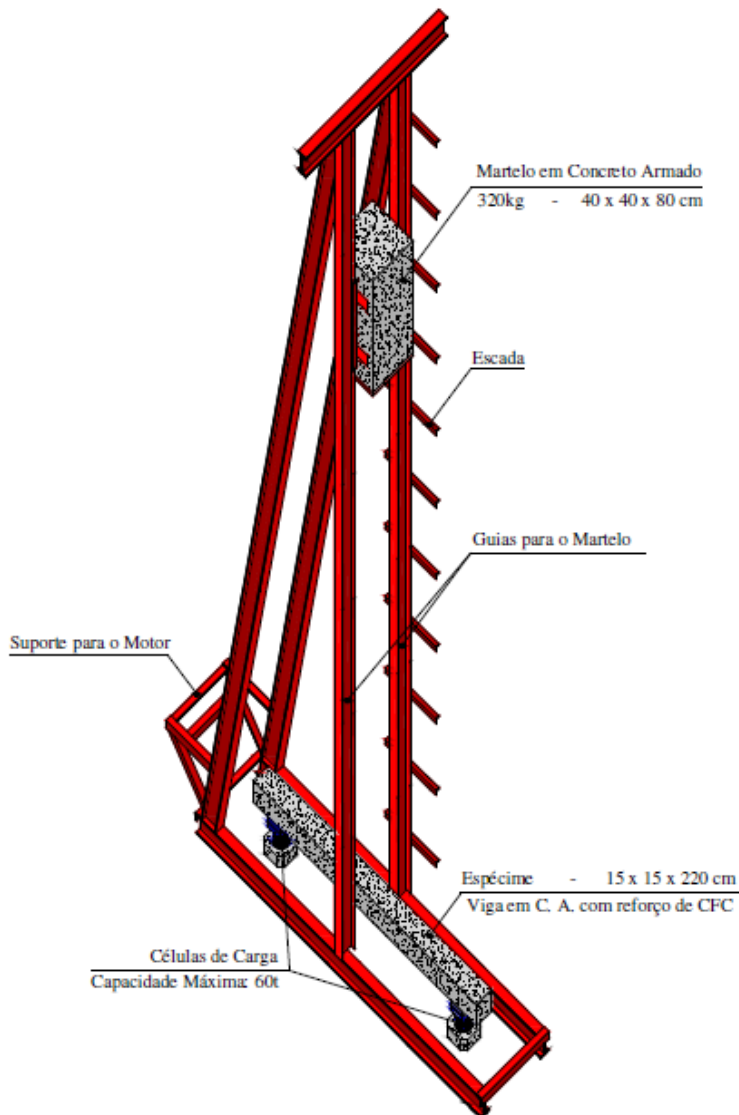
Os grupos foram constituídos por 6 vigas, para que cada uma delas fosse ensaiada de forma diferente. Os ensaios consistiram em: uma viga ensaiada de maneira estática, e as demais vigas ensaiadas dinamicamente, sendo as alturas de queda do martelo: 50, 100, 150, 200 e 250 cm.

Para a confecção das vigas do grupo A, Santos (2008) utilizou concreto CII-Z-32, da marca Votoran, areia quartzosa como agregado miúdo e brita 1 como agregado graúdo, e o traço utilizado por ele foi dosado para que o concreto atingisse 30 MPa de resistência à compressão em 45 dias de cura. As vigas foram confeccionadas com seção transversal quadrada de 15 x 15 cm, e comprimento total de 220 cm. Os estribos foram feitos com barra de aço CA-60 de 5 mm de diâmetro, com 7,2 cm de espaçamento. A armadura longitudinal de compressão das vigas foi composta por duas barras de aço CA-60 de 5 mm de diâmetro como função principal de porta-

estribo. Já as armaduras de tração das vigas do grupo A se constituíam por três barras de aço CA-50 de 10mm de diâmetro. Santos (2008) dimensionou as armaduras longitudinais das vigas visando com que o rompimento das mesmas ocorresse pelo escoamento da armadura longitudinal de tração (domínio 3).

O aparato utilizado para o ensaio de impacto, esquematizado na Figura 4 e mostrado na Figura 5 consiste em uma torre metálica, por onde desliza um martelo de 320 kg feito de concreto armado, suspenso por um motor elétrico. O martelo utilizado possui seção transversal quadrada de 40 cm x 40 cm, e altura de 80 cm, e foi reforçado com uma chapa metálica de 8 mm de espessura em sua face inferior, a fim de evitar a deterioração do concreto com os impactos ao longo do ensaio.

**Figura 4:** Esquema geral do aparato desenvolvido para a aplicação da carga.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

**Figura 5:** Aparato para aplicação da carga de impacto.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

As vigas foram ensaiadas com duas cargas concentradas a 10,9 cm do meio do vão. As figuras Figura 6 e Figura 7 mostram as vigas preparadas para os ensaios.

**Figura 6:** Viga preparada para ensaio dinâmico.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

**Figura 7:** Viga preparada para ensaio estático.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

Em relação aos resultados apresentados pelo experimento de Santos (2008), notou-se que, no ensaio estático, houve rompimento da viga pelo escoamento da armadura longitudinal de tração, seguido pelo esmagamento do concreto no banzo comprimido. A ruptura no ensaio estático da viga é mostrada na Figura 8.

**Figura 8:** Ruptura em ensaio estático da viga.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

Nos ensaios dinâmicos do estudo realizado por Santos (2008), notou-se que quando o martelo foi solto a 50, 100 e 150 cm, observou-se um pequeno retorno do martelo após o primeiro impacto contra as vigas, seguido de vários impactos de pequena intensidade. As demais vigas, ensaiadas com o martelo solto a 200 e 250 cm, romperam completamente atingindo o chão da área de ensaio no primeiro impacto. As vigas apresentaram modo de ruptura caracterizado pelo escoamento da armadura longitudinal de tração e esmagamento do concreto no banzo comprimido, como mostrado a seguir na Figura 9, quando o martelo foi solto a 50 cm, Figura 10,



quando o martelo foi solto a 100 cm, Figura 11, quando o martelo foi solto a 150 cm, Figura 12, quando o martelo foi solto a 200 cm, e Figura 13, em que o martelo foi solto a 250 cm.

**Figura 9:** Ruptura da viga com martelo solto a 50 cm.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

**Figura 10:** Ruptura da viga com martelo solto a 100 cm.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

**Figura 11:** Ruptura da viga com martelo solto a 150 cm.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

**Figura 12:** Ruptura da viga com martelo solto a 200 cm.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

**Figura 13:** Ruptura da viga com martelo solto a 250 cm.



**Fonte:** Retirado de Santos (2008).

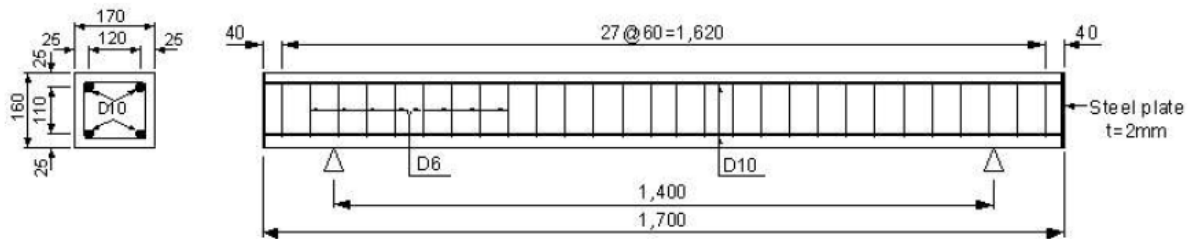
Do experimento de Santos (2008) pôde-se concluir que, quanto maior a altura de queda do martelo, maior é a deflexão da viga, e menor é o intervalo de tempo para que ocorra a ruptura do concreto.

### **3.2 Estudo de Fujikake, Soeum e Matsui (2018)**

Fujikake, Soeum e Matsui (2018) estudaram a viabilidade sobre reforçar vigas de concreto armado com polímero reforçado com fibra de carbono, e como essas vigas resistem quando submetidas a cargas de impacto. Os autores confeccionaram vigas reforçadas, e não reforçadas, a fim de compará-las. Para este trabalho, iremos analisar apenas o efeito da carga de impacto sobre as vigas não reforçadas.

Para o experimento realizado por Fujikake, Soeum e Matsui (2018), foram preparadas como amostras, quatro vigas de concreto armado não reforçadas, com dimensões transversais de 16 x 17 cm, e comprimento de 170 cm, e foram moldadas usando concreto pré-misturado, como mostra a Figura 14.

**Figura 14:** Detalhe da viga de concreto armado.



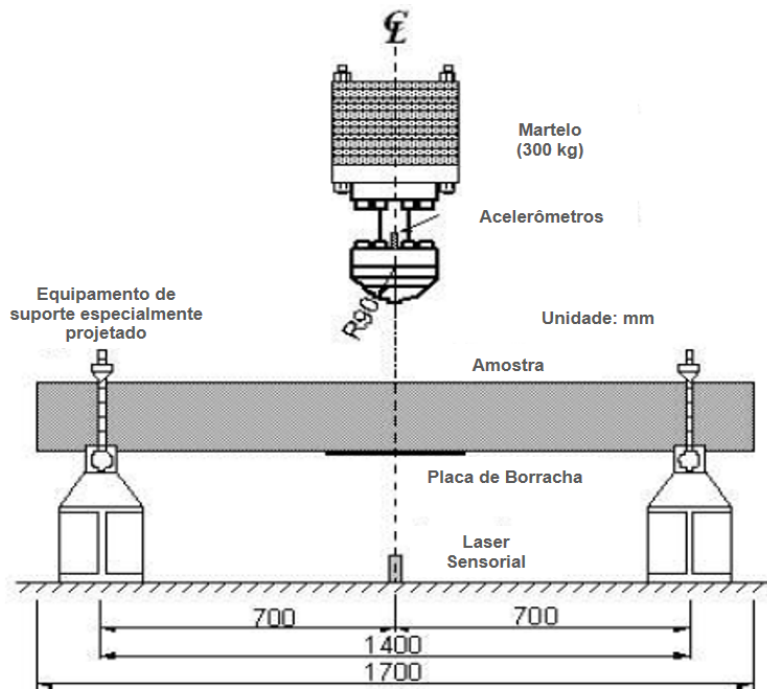
**Fonte:** Retirado de Fujikake, Soeum e Matsui (2018).

Ainda na preparação da amostra de Fujikake, Soeum e Matsui (2018), as vigas foram confeccionadas com barras longitudinais de tração e flexão de 10mm de diâmetro, e os estribos foram confeccionados com barras de 6mm de diâmetro, com 6 cm de espaço entre cada um. No ensaio à compressão, o concreto atingiu uma resistência de 41,9 MPa.

Para a realização do experimento, foi utilizada uma máquina de carregamento de impacto com golpe de martelo, como mostra a Figura 15. O martelo possui massa de 300 kg e foi solto livremente na superfície superior da viga. Neste experimento, foram realizados dois testes de impacto, um com apenas um impacto, e o outro com impacto repetido. No teste de impacto único, o martelo de queda caiu livremente de alturas de 100, 200 ou 400 mm apenas uma vez. Já no teste de impacto repetido, o martelo foi repetidamente lançado na viga, sendo que a altura inicial de queda foi de 50 mm, depois a altura foi aumentada.

A uma altura de queda de 100 mm, não se observou o esmagamento por compressão do concreto. Apenas rachaduras de flexão foram formadas, como mostra a Figura 16. As vigas apresentaram fissuras com largura máxima de 3 mm, e o espaçamento entre as fissuras foi de aproximadamente 100 mm. As vigas apresentaram deflexão máxima de 12,7 mm.

**Figura 15:** Teste da carga de impacto.



**Fonte:** Adaptado de Fujikake, Soeum e Matsui (2018).

**Figura 16:** Modos de falha a uma altura de 100mm no teste de impacto único.



**Fonte:** Retirado de Fujikake, Soeum e Matsui (2018).

Quando o experimento de Fujikake, Soeum e Matsui (2018) foi realizado a uma altura de queda de 200 mm, a deflexão máxima foi de 22,5 mm. Já no experimento com o martelo sendo solto a uma altura de queda de 400 mm, notou-se na viga uma deflexão máxima de 47,5 mm, e também notou-se aparecimento de fissuras com larguras de 15 mm, como mostra a Figura 17.

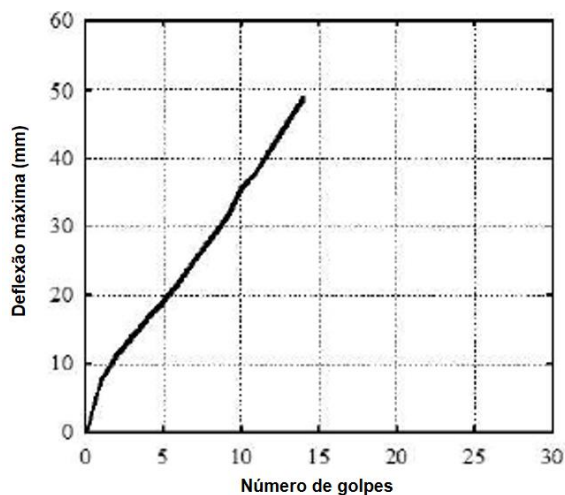
**Figura 17:** Modos de falha a uma altura de 400mm no teste de impacto único.



**Fonte:** Retirado de Fujikake, Soeum e Matsui (2018).

No ensaio de impacto repetido, a viga apresentou deflexão máxima de 7,6 mm na primeira queda, que ocorreu a uma altura de 50 mm. Após a primeira queda, a deflexão máxima foi aumentando linearmente com uma taxa de 3,2 mm por golpe. Também se notou o aparecimento de fissuras de flexão na viga, com espaçamento de aproximadamente 100 mm entre elas, e a largura das fissuras aumentou, conforme ocorreu o aumento no número de golpes. No 7º golpe, houve esmagamento do concreto por compressão, e a deflexão máxima foi de 25 mm. Ao continuar o ensaio, a deflexão máxima da viga no 14º golpe foi de 48,7mm. A Figura 18 mostra as relações entre a deflexão máxima atingida pela viga e o número de golpes obtido no teste repetido de carga de impacto.

**Figura 18:** Relações entre a deflexão máxima da viga e o número de golpes no teste de carga de impacto repetido.



**Fonte:** Adaptado de Fujikake, Soeum e Matsui (2018).

Do experimento de Fujikake, Soeum e Matsui (2018), conclui-se que nas vigas que não foram reforçadas, analisando o modo de falha de cada viga, não observou-se diferença entre o resultado do teste de carga de impacto repetido e o teste de impacto de carga único. Também se notou que a viga atingiu seu estado limite último na sétima queda do teste de carga de impacto repetido.

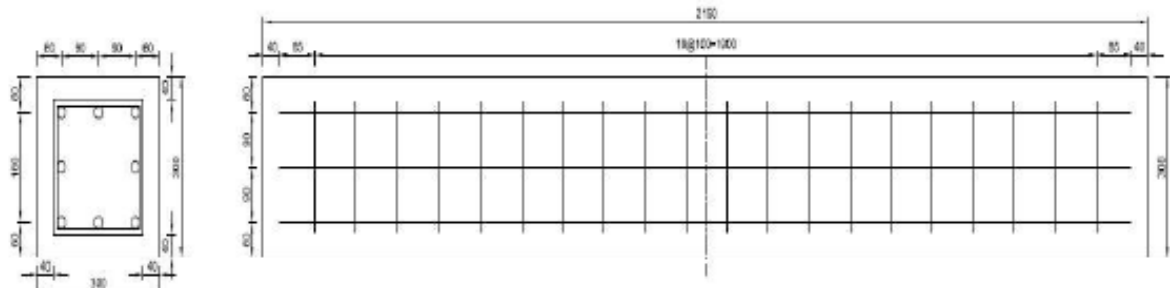
### 3.3 Estudo de Kim et al. (2018)

O estudo de Kim et al. (2018) visa analisar vigas de concreto armado reforçadas com fibras de alto desempenho sujeitas a carga de impacto. Kim et al. realizaram

experimentos com vigas reforçadas, e vigas de concreto armado sem reforço, com o objetivo de comparar como ambas reagiram a carga de impacto a qual foram submetidas. Neste trabalho, será analisado apenas o que Kim et al. (2018) investigaram no ensaio de impacto realizado nas vigas de concreto armado sem reforço, a fim de analisar o que ocorreu com as mesmas.

Para a fabricação das vigas de concreto armado não-reforçadas, Kim et al. (2018) utilizaram cimento Portland tipo I, sílica ativa, agregado miúdo e superplastificante à base de policarboxilato. As dimensões das vigas possuem seção transversal quadrada de 30 cm x 30 cm, e comprimento total de 215 cm. As armaduras utilizadas na viga estão detalhadas na Figura 19.

**Figura 19:** Detalhamento das armaduras da viga de concreto armado.



**Fonte:** Retirado de Kim et al. (2018).

O teste de impacto foi realizado por uma máquina com queda de peso, mostrada na Figura 20. O peso utilizado para o ensaio possuía 3.350 kg, e caiu de uma altura de 100 cm, causando energia de impacto de 32,86 kJ.

**Figura 20:** Máquina de teste de impacto com peso reduzido.



**Fonte:** Retirado de Kim et al. (2018).

Nas figuras a seguir, Figura 21 e Figura 22, demonstra-se o resultado da ruptura nas vigas de concreto armado não reforçadas após a realização do ensaio.

**Figura 21:** Viga de concreto armado não reforçada após o ensaio de impacto.



**Fonte:** Retirado de Kim et al. (2018).

**Figura 22:** Modo de falha da viga de concreto armado não reforçada.



**Fonte:** Retirado de Kim et al. (2018).

Na análise dos resultados, Kim et al. (2018) notaram que a carga de impacto máxima suportada pela viga não reforçada de concreto armado foi de 52 toneladas. Também notou-se que, após a queda da carga máxima de impacto, a redução da mesma tornou-se mais lenta, indicando que a energia de impacto não pôde ser dissipada, levando a viga à ruptura.

#### **4 MECANISMOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Para dimensionar uma viga de concreto armado, primeiro calcula-se as armaduras longitudinais para os momentos fletores máximos, e em seguida, a armadura transversal para resistência às forças cortantes (BASTOS, 2017).

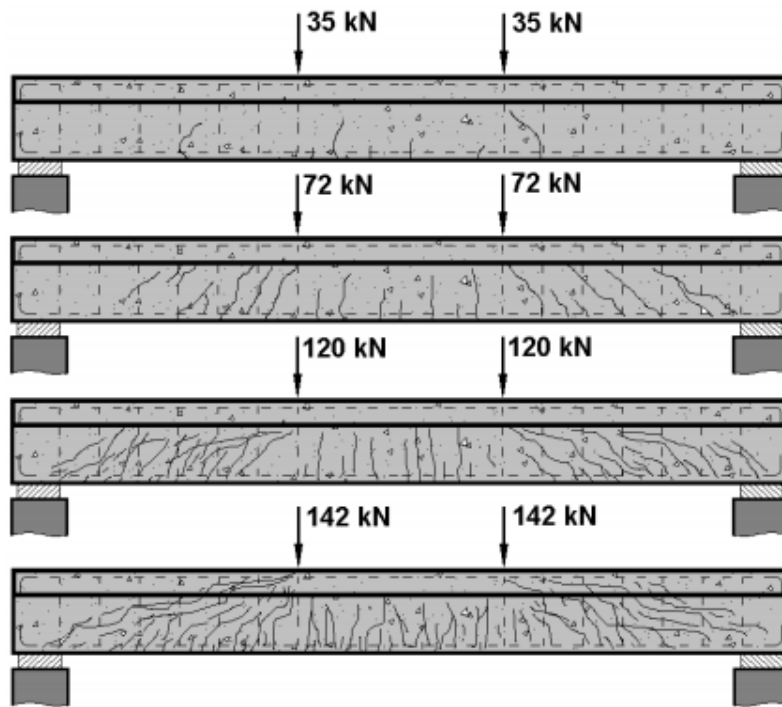
Carvalho e Pinheiro (2009) afirmam que vigas submetidas a carregamentos verticais trabalham em flexão simples, tornando o momento fletor variável, e a força cortante diferente de zero. Quando submetidas a carregamentos verticais, as vigas apresentam esforços solicitantes internos que causam as tensões tangenciais e tensões normais devidas à flexão, com tensões principais de tração e compressão que possuem uma direção que pode ser determinada através do círculo de Mohr (BEER et al., 2013).

O modelo de treliça criado por Ritter e Morsch é o mais utilizado no Brasil e em vários países para analisar as vigas de concreto armado sob força cortante, devido à sua simplicidade e bons resultados. Na ABNT NBR 6118:2014 existem os Modelos de Cálculo I e II, sendo que no Modelo de Cálculo I usa-se a treliça clássica de Ritter-Mörsch, e no Modelo de Cálculo II a “treliça generalizada” (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Segundo Pinheiro, Muzard e Santos (2007), uma viga biapoiada submetida a determinados carregamentos, é armada com barras longitudinais que resistem a esforços de tração, podendo também ter armadura de compressão, e com estribos, que resistem aos esforços de cisalhamento. Enquanto a tensão de tração da armadura for inferior à resistência do concreto à tração na flexão, a viga permanece no Estádio I, ou seja, não apresenta fissuras. Nessa fase, origina-se um sistema de tensões principais de tração e de compressão. Na Figura 23 tem-se um exemplo da evolução de fissuração de uma viga com seção T em vários estágios de carregamento.



**Figura 23:** Evolução da fissuração.



**Fonte:** Retirado de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007).

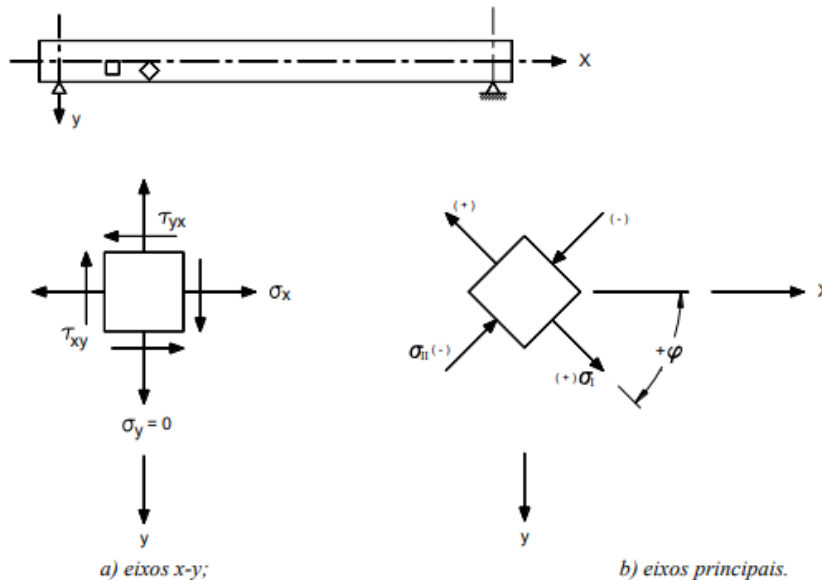
Conforme o carregamento aumenta, no trecho de momento máximo, e ultrapassa-se a resistência do concreto à tração, surgem as primeiras fissuras de flexão, fazendo com que a viga passe a trabalhar no Estádio II. Quando se inicia a fissuração na região central, os trechos junto aos apoios ainda se encontram no Estádio I (sem fissuras). Enquanto o carregamento aumenta mais, fissuras passam a surgir em outros trechos, as quais são inclinadas, por causa da direção das tensões principais de tração.

#### 4.1 Tensões Principais

Existem tensões principais de tração e compressão ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , respectivamente), inclinadas em relação ao eixo da seção transversal de uma viga fletida sob ação de um momento fletor variável, onde também atuam forças cortantes. Pode-se decompor as tensões principais em  $\sigma_x$  (tensão normal segundo x),  $\sigma_y$  (tensão normal segundo y) e  $\tau_{xy}$  (tensão tangencial). Em um elemento solicitado por essas tensões, como mostra a Figura 24, pode-se encontrar um plano com inclinação  $\alpha$ , onde as tensões tangenciais são nulas e as tensões normais possuem valores máximo e mínimo,

sendo esses valores as tensões principais. Essas tensões podem ser determinadas por meio do Círculo de Mohr, ou analiticamente (BEER et al., 2013).

**Figura 24:** Componentes de tensão segundo os estados de tensão relativos aos eixos principais e aos eixos x-y.



**Fonte:** Retirado de Bastos (2017).

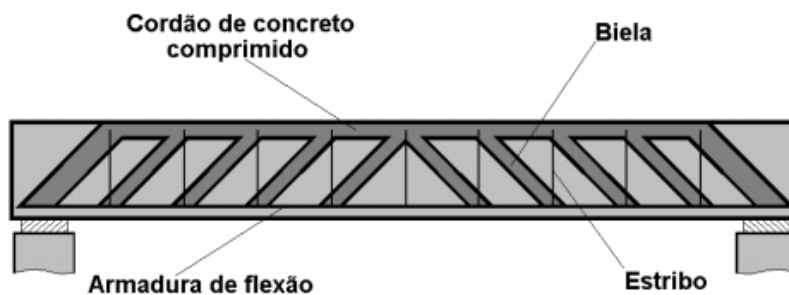
Bastos (2017) afirma que o dimensionamento das vigas de concreto armado se baseia nas tensões  $\sigma_x$  e  $\tau_{xy}$ , pois  $\sigma_y = 0$ . É importante conhecer a trajetória das tensões principais para que o posicionamento das armaduras de tração seja correto, e também para conhecer a direção das bielas de compressão. As tensões principais de tração inclinadas devem possuir armaduras transversais, compostas na forma de estribos verticais fechados. É importante ressaltar que, nas regiões onde a força cortante possui maior intensidade, a inclinação mais favorável para os estribos é de aproximadamente  $45^\circ$  (paralelos às tensões de tração, e perpendiculares às fissuras), porém, por praticidade de execução, geralmente se posiciona os estribos na direção vertical.

## 4.2 Analogia da Treliça de Morsch

Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2007), Ritter e Morsch idealizaram o modelo clássico de treliça no início do século XX, utilizando como base a analogia entre uma viga fissurada e uma treliça. Para Morsch, uma viga biapoiada de seção

retangular, após a fissuração, apresenta comportamento semelhante ao de uma treliça, formada pelos seguintes elementos: o banço superior (representando o cordão de concreto comprimido), o banço inferior (representando a armadura longitudinal de tração), as diagonais comprimidas (representando as bielas de concreto entre as fissuras), e os montantes tracionados (representando a armadura transversal). Na Figura 25, está indicada a armadura transversal, com inclinação de 90°, formada por estribos.

**Figura 25:** Analogia da treliça.

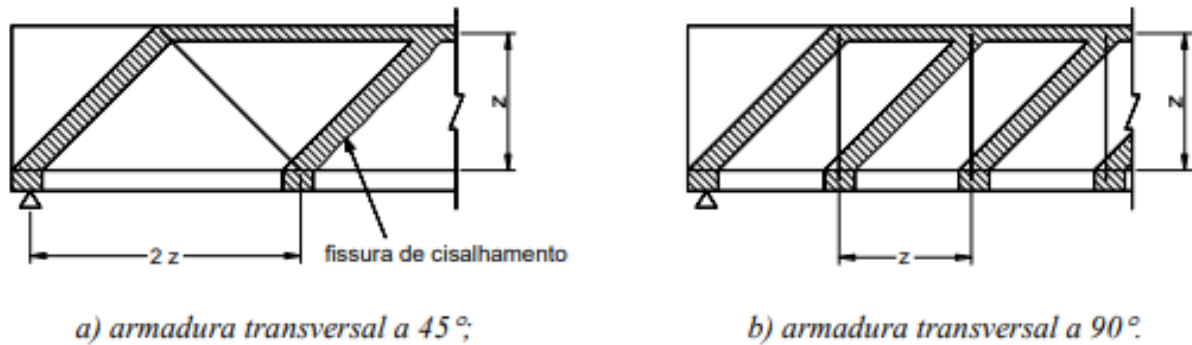


**Fonte:** Retirado de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007).

A teoria proposta por Ritter e Morsch serve para determinar a armadura de cisalhamento necessária para equilibrar uma viga de concreto armado, onde o mecanismo resistente da viga no estágio II possa ser associado ao de uma treliça, em que as armaduras e o concreto equilibrem o esforço cortante em conjunto (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Bastos (2017) afirma que os estribos devem estar próximos entre si, de modo que interceptem possíveis fissuras inclinadas causadas pela força cortante, já que uma ruptura precoce pode ocorrer se a distância entre os estribos for maior que  $2z$  quando inclinados a  $45^\circ$ , e maior que  $z$  quando estiverem a  $90^\circ$ , sendo  $z$  o braço de alavanca da viga, conforme mostra a Figura 26.

**Figura 26:** Analogia clássica de treliça com as forças internas de uma viga na região próxima ao apoio.



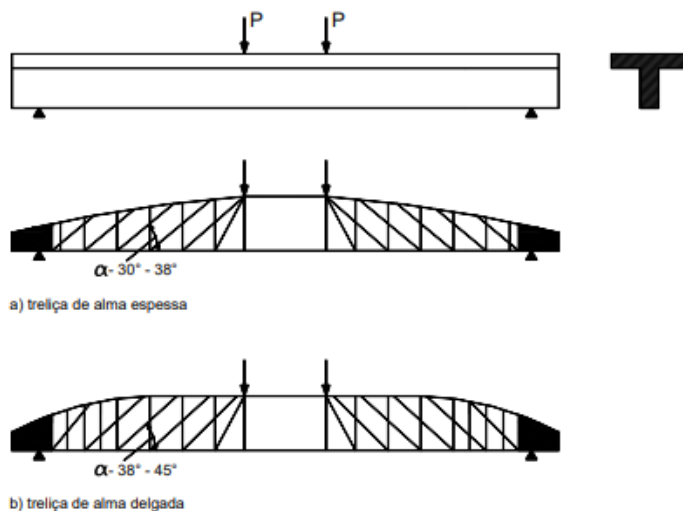
**Fonte:** Retirado de Bastos (2017).

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), a posição em que a armadura transversal segue a direção das tensões principais é a melhor, porém, ela é muito difícil de ser executada, por essa razão, é mais comum adotar os estribos a 90° da armadura longitudinal. Esse arranjo envolve a armadura longitudinal para sua fixação, servindo de montante para a treliça análoga.

#### 4.2.1 Treliça Generalizada

Bastos (2017) afirma que pesquisas experimentais do século passado mostraram que a inclinação das fissuras geralmente é inferior a 45°, devido a quantidade de armadura transversal e da relação entre as larguras da alma e da mesa (exemplificadas na Figura 27).

**Figura 27:** Treliça generalizada para vigas seção T com alma espessa e alma delgada.



**Fonte:** Retirado de Bastos (2017).

Devido a este fato, a treliça clássica de Ritter-Morsch foi considerada conservadora, resultando em uma armadura transversal exagerada. A “treliça generalizada” surgiu levando em conta a menor inclinação das fissuras, e ela possui ângulos menores que  $45^\circ$  para a inclinação das diagonais comprimidas.

### 4.3 Modos de Ruína

Dentre os modos de ruína apresentados por Pinheiro, Muzardo e Santos (2007), temos as seguintes ruínas relacionadas ao cisalhamento:

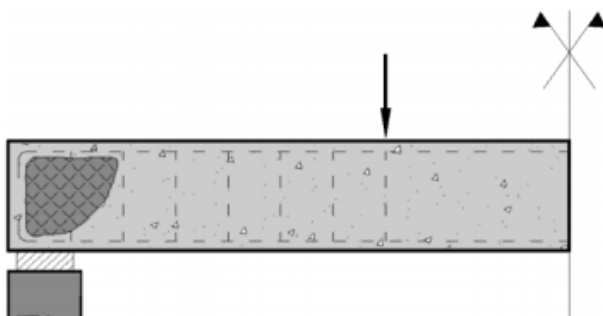
#### 4.3.1 Ruínas por flexão

Quando há ancoragem insuficiente no apoio, onde a armadura longitudinal é altamente solicitada, pode ocorrer colapso da diagonal comprimida com o banzo tracionado. Essa ruptura por falta de ancoragem ocorre bruscamente, fazendo com que a armadura longitudinal deslize, ocasionando ruptura por cisalhamento da alma. Essa ruptura não ocorre devido a força cortante, mas sim devido a falha de ancoragem.

#### 4.3.2 Ruptura por esmagamento da biela

Em seções muito pequenas, as tensões principais de compressão podem atingir valores altos, ultrapassando a resistência do concreto à compressão com tração perpendicular, ocasionando ruptura por esmagamento do concreto, apresentada na Figura 28.

**Figura 28:** Ruptura por esmagamento da biela.



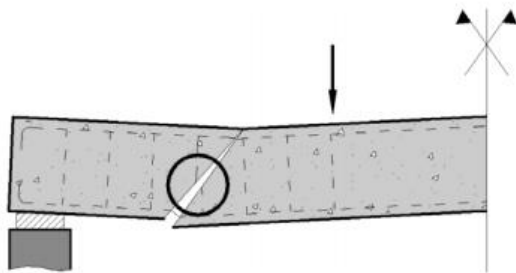
**Fonte:** Retirado de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007).

Essa ruptura depende da resistência do concreto à compressão, e determina o limite superior da capacidade resistente da viga à força cortante.

#### 4.3.3 Ruptura da armadura transversal

Decorre da ruptura da armadura transversal, devido a uma ruína por cisalhamento.

**Figura 29:** Ruptura da armadura transversal.



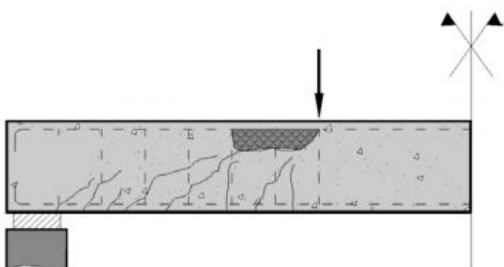
**Fonte:** Retirado de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007).

Este é o tipo mais comum de ruptura por cisalhamento, sendo que essa ruptura ocorre pelo fato da armadura transversal não ser suficiente para resistir às tensões de tração ocasionadas pela força cortante, fazendo com que a viga possa se dividir em duas partes, como mostra a Figura 29.

#### 4.3.4 Ruptura do banzo comprimido devido ao cisalhamento

A armadura de cisalhamento quando insuficiente, pode entrar em escoamento, provocando fissuras inclinadas que acabam invadindo a região comprimida pela flexão.

**Figura 30:** Ruptura do banzo comprimido.



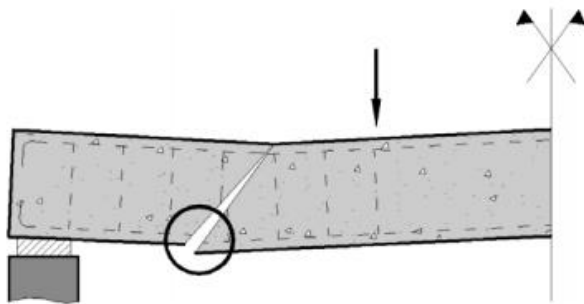
**Fonte:** Retirado de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007).

Esse fenômeno diminui a altura da região comprimida e sobrecarrega o concreto, fazendo com que ele sofra esmagamento, como mostra a Figura 30.

#### 4.3.5 Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal

Aberturas de fissuras de cisalhamento podem ocorrer devido à deformação exagerada da armadura transversal.

**Figura 31:** Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal.



**Fonte:** Retirado de Pinheiro, Muzardo e Santos (2007).

Esse fenômeno pode ocasionar deslocamento relativo das seções, acarretando em flexão localizada da armadura longitudinal, ocasionando ruína que também decorre do cisalhamento na viga, como mostrado na Figura 31.

#### 4.4 Cálculo da Armadura Transversal segundo a ABNT NBR 6118:2014

A norma determina condições para elementos lineares (vigas), admitindo dois modelos de cálculo, análogos com o modelo em treliça.

A ABNT NBR 6118:2014 menciona que todos os elementos lineares, com  $b_w$  menor ou igual a  $5d$ , submetidos a força cortante devem possuir estribos, com a seguinte taxa geométrica representada pela equação (4):

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s \cdot \sin \alpha} \leq 0,2 \frac{f_{ct,m}}{f_{yw,k}}, \quad (4)$$

em que,

$A_{sw}$  = área da seção transversal dos estribos;

$s$  = espaçamento entre os estribos em relação ao eixo longitudinal da viga;

$\alpha$  = inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal da viga;

$b_w$  = largura média da alma da viga;

$f_{yk}$  = resistência ao escoamento do aço da armadura transversal;

$f_{ct,m}$  = é determinado na equação (5);

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}, \quad (5)$$

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão.

O ângulo de inclinação  $\alpha$  das armaduras transversais em relação ao eixo longitudinal da viga deve estar contido no intervalo  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

#### 4.4.1 Verificação do estado limite último

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, devem ser verificadas as seguintes condições propostas nas equações (6) e (7) simultaneamente para que a resistência do elemento estrutural seja satisfatória em uma determinada seção transversal:

$$V_{sd} \leq V_{rd2}, \quad (6)$$

$$V_{sd} \leq V_{rd3} = V_c + V_{sw}, \quad (7)$$

em que:

$V_{sd}$  = força cortante solicitante de cálculo, na seção;

$V_{Rd2}$  = força resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas do concreto;

$V_{Rd3}$  = força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

$V_c$  = parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça;

$V_{sw}$  = parcela resistida pela armadura transversal.



#### 4.4.2 Modelo de Cálculo I

A ABNT NBR 6118:2014 afirma que o Modelo de Cálculo I admite diagonais de tração inclinadas a  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal da viga, e admite que o valor de  $V_c$  seja constante, independentemente de  $V_{sd}$ .

Na equação (8) tem-se a verificação da compressão diagonal do concreto,

$$VRd2 = 0,27 \cdot \alpha v2 \cdot fcd \cdot bw \cdot d, \quad (8)$$

e na equação (9), tem-se o cálculo de  $\alpha v2$ .

$$\alpha v2 = 1 - \frac{fck}{250}. \quad (9)$$

Para o cálculo da armadura transversal, temos a equação (10),

$$Vrd3 = Vc + Vsw. \quad (10)$$

O cálculo de  $V_{sw}$  está na equação (11),

$$Vsw = \left( \frac{Asw}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot fywd \cdot (\sen \alpha + \cos \alpha). \quad (11)$$

Já para  $V_c$ , existirá 4 possibilidades diferentes de cálculo. Para elementos estruturais tracionados, quando a linha neutra se situa fora da seção,  $V_c$  será igual a zero. Na flexão simples e na flexo-tração, com a linha neutra cortando a seção, será considerado  $V_c = V_{co}$ , onde o cálculo de  $V_{co}$  está demonstrado na equação (12). Já na flexo-compressão, o cálculo de  $V_c$  ocorrerá conforme mostra a equação (13),

$$Vco = 0,6 \cdot fctd \cdot bw \cdot d, \quad (12)$$

$$Vc = Vco \left( \frac{1 + Mo}{Msd, \text{máx}} \right) \leq 2 \cdot Vco. \quad (13)$$

O cálculo de  $f_{ctd}$  está demonstrado na equação (14),

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}. \quad (14)$$

O cálculo de  $f_{ctk,inf}$  está demonstrado na equação (15),

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{tc,m}. \quad (15)$$

O cálculo de  $f_{ct,m}$  já foi exemplificado na equação x. Também tem-se  $\gamma_c$  que é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Dentre os demais elementos das equações, tem-se:

$b_w$  = menor largura da seção, compreendida ao longo da altura útil,  $d$ .

$d$  = altura útil da seção, igual à distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração;

$s$  = espaçamento entre elementos da armadura transversal  $A_{sw}$ , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural;

$f_{ywd}$  = tensão na armadura transversal passiva;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo-se tomar  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

$M_0$  = valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção, tracionada por  $M_{sd,máx}$ .

$M_{sd,máx}$  = momento fletor de cálculo máximo no trecho em análise.

#### 4.4.3 Modelo de Cálculo II

A ABNT NBR 6118:2014 afirma que o Modelo de Cálculo II admite diagonais de compressão inclinadas com ângulo teta variando livremente entre  $30^\circ$  a  $45^\circ$ , em relação ao eixo longitudinal da viga. Este modelo também admite que a parcela complementar  $V_c$  sofra redução com o aumento de  $V_{sd}$ .

Na equação (16) tem-se a verificação da compressão diagonal do concreto,

$$VRd2 = 0,54 \cdot \alpha^2 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta). \quad (16)$$

A parcela  $\alpha v_2$  já está demonstrada na equação (9).

Para o cálculo da armadura transversal, tem-se a equação (11) já demonstrada anteriormente, sendo que o cálculo da parcela  $V_{sw}$  para o Modelo de Cálculo II está demonstrado na equação (17),

$$V_{sw} = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \cdot \text{sen } \alpha . \quad (17)$$

Já para  $V_c$ , teremos 5 possibilidades diferentes de cálculo. Para elementos estruturais tracionados, quando a linha neutra se situa fora da seção,  $V_c$  será igual a zero. Na flexão simples e na flexo-tração, com a linha neutra cortando a seção, teremos  $V_c = V_{c1}$ , sendo que  $V_{c1}$  será igual a  $V_{co}$  quando  $V_{sd}$  for menor ou igual a  $V_{co}$ , e  $V_{c1}$  será igual a zero se  $V_{sd}$  for igual a  $V_{Rd2}$ . Já na flexo-compressão, teremos o cálculo de  $V_c$  conforme mostra a equação (18),

$$V_c = V_{c1} \cdot \left( \frac{1 + M_o}{M_{sd, \text{máx}}} \right) < 2 \cdot V_{c1}. \quad (18)$$

Sendo assim, foram demonstradas todas as equações necessárias para o cálculo da armadura de cisalhamento nos modelos I e II, quando as mesmas são utilizadas apenas por estribos.

No capítulo 4, foi apresentado como vigas de concreto armado se comportam em relação ao esforço cortante, e como as tensões internas atuam na viga quando um carregamento vertical é aplicado na viga, fazendo com que a viga sofra flexão simples. Também foi apresentado o princípio da Trelança de Morsch, e os possíveis modos de ruína de uma viga de concreto armado submetida ao esforço cortante. Para finalizar o capítulo, foi apresentado o cálculo da armadura de cisalhamento para os Modelos de Cálculo I e II conforme a ABNT NBR 6118:2014.

## 5 MÉTODO E MATERIAIS

Este capítulo apresenta os procedimentos e materiais que foram utilizados na investigação experimental sobre o efeito da armadura de cisalhamento na resistência de vigas submetidas a cargas de impacto.

### 5.1 Materiais

#### 5.1.1.1 Concreto

Para a confecção do concreto, foi utilizado um traço com o objetivo de atingir a resistência de 25 MPa aos 21 dias de tempo de cura. O traço utilizado foi proposto por Barboza e Bastos (2008), porém algumas adaptações foram necessárias, já que Barboza e Bastos utilizaram plastificante “Vedacit Fazgrauth”, e neste experimento foi utilizado superplastificante “CQ Flow 2665” que havia disponível no laboratório de materiais da UTFPR-CM.

Essa mudança interferiu apenas na quantidade da água e do superplastificante utilizados, os demais materiais foram dosados nas mesmas proporções propostas por Barboza e Bastos (2008). A quantidade de material foi calculada para concretar 3 vigas com dimensões de 10 cm de largura, 20 cm de altura e 100 cm de comprimento, e 6 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm, e altura de 20 cm. Foram concretadas 3 vigas, no entanto, uma foi utilizada para a realização de um teste preliminar, com um arranjo simples constituído por barras longitudinais de tração e compressão, e apenas dois estribos como armadura transversal.

O cimento utilizado foi o CPV – ARI da marca Cauê. O agregado miúdo utilizado foi areia, cuja granulometria foi classificada como “fina”, com módulo de finura igual a 1,67, segundo ensaio realizado conforme a ABNT NBR 7217:1987. A determinação da massa específica absoluta da areia foi obtida através do ensaio utilizando o frasco de Chapman, segundo a ABNT NBR 9776:1987, e apresentou o valor de 2,62g/cm<sup>3</sup>.

O agregado graúdo utilizado foi a “Brita 1”, de origem basáltica, sendo que sua dimensão máxima característica possui 19 mm, e, de acordo com o ensaio realizado em laboratório segundo a norma ABNT NBR 7217:1987 apresentou módulo de finura igual a 6,84, e sua massa específica resultante foi de 1,64g/cm<sup>3</sup>.

A água de amassamento utilizada para confecção do concreto foi fornecida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Também foi utilizado superplastificante da linha CQ Flow, modelo 2665, da marca Camargo Química. O superplastificante foi utilizado com o objetivo de aumentar a coesão e melhorar a fluidez do concreto, e reduzir as retrações e fissuras de origem plástica. Para facilitar o desmolde das vigas e dos corpos de prova, foi utilizado o desmoldante “Desmol” da marca Vedacit.

Utilizando o traço 1:2,95:2,89:0,35 proposto por Barboza e Bastos (2008), a quantidade de materiais utilizados na confecção do concreto está apresentada na Tabela 1 a seguir:

**Tabela 1:** Material utilizado para confecção do concreto.

<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg)</b>
Cimento	25,950
Brita	76,590
Areia	75,230
Água	9,200
Superplastificante	0,150

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Analisando a tabela, nota-se que a proporção água/cimento ( $a/c$ ) foi de 0,35, e o aditivo superplastificante foi utilizado na proporção de 0,5% em relação a quantidade de cimento.

#### 5.1.1.2 Aço

Para a confecção das armaduras, foram utilizadas barras de aço CA50 com seção transversal de 10 mm para as armaduras longitudinais de tração e compressão, e barras de aço CA60 com seção transversal de 5mm para as armaduras transversais de cisalhamento.

Foi escolhido o aço CA50 com seção transversal de 10 mm para as armaduras longitudinais de tração e compressão, levando em consideração o arranjo escolhido para o estudo de Fujikake, Soeum e Matsui (2018) apresentado no capítulo 3 da revisão bibliográfica.

Já o aço CA60 com seção transversal de 5 mm foi escolhido para as armaduras transversais pelo motivo de ser o mais utilizado nas construções civis no Brasil. Levando em consideração o uso frequente do arranjo composto por armaduras

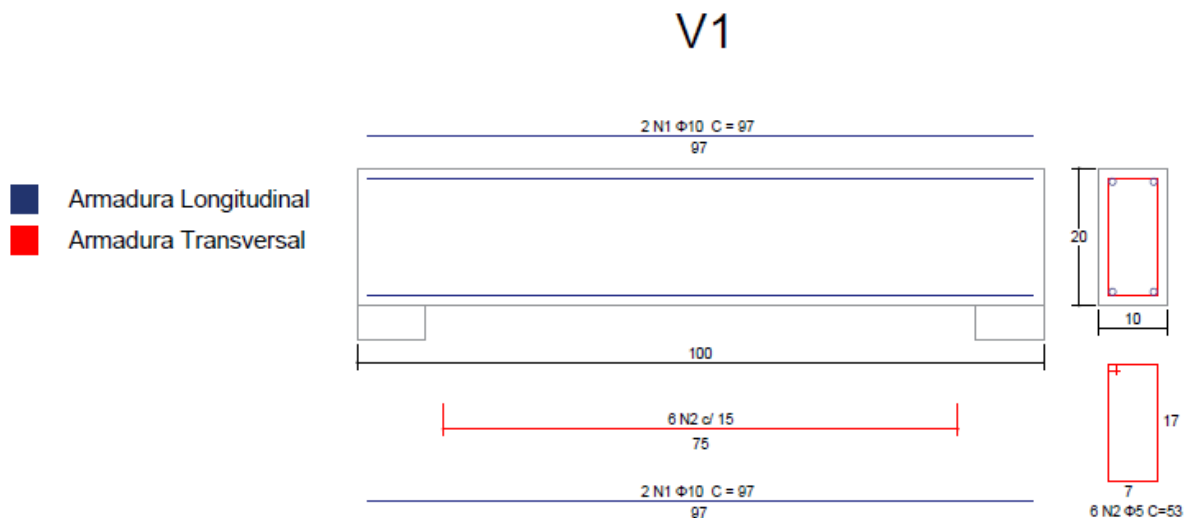
longitudinais de tração e compressão com 10 mm de seção transversal, e armaduras de cisalhamento com 5 mm de seção transversal, este trabalho visou analisar como este arranjo se comporta com a armadura transversal disposta em diferentes ângulos.

## 5.2 Arranjo das Armaduras

Abaixo, estão esquematizados os arranjos das armaduras de cisalhamento para o ensaio experimental proposto neste trabalho. As vigas foram executadas com seção transversal de 10 cm x 20 cm, e com 1 metro de comprimento. Os estribos foram dispostos na viga considerando um espaçamento de 15 cm entre um estribo e outro.

Na Figura 32 tem-se o detalhamento das armaduras que foram usadas na viga, com a armadura de cisalhamento disposta a 90° da armadura longitudinal. Na Figura 33 tem-se a armadura já executada conforme foi planejado no detalhamento. Essa disposição de armaduras é a mais comum na construção de vigas de concreto armado.

**Figura 32:** Detalhamento da armadura de cisalhamento disposta a 90° da armadura longitudinal.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

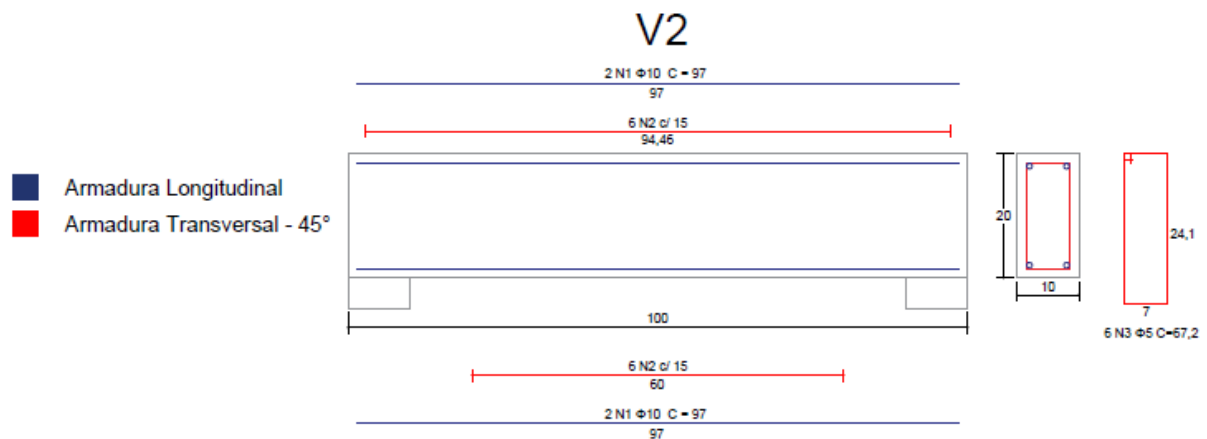
**Figura 33:** Armadura de cisalhamento disposta a 90° da armadura longitudinal.



Fonte: Autoria própria (2019).

No segundo caso de arranjo das armaduras, tem-se a armadura de cisalhamento disposta a 45° em relação ao eixo longitudinal da viga, como mostrado no detalhamento da Figura 34. Com isso, busca-se colocar a armadura de cisalhamento na direção da tensão principal de tração. Em seguida, na Figura 35, tem-se a armadura confeccionada.

**Figura 34:** Detalhamento da armadura de cisalhamento disposta a 45° da armadura longitudinal.



Fonte: Autoria própria (2019).

**Figura 35:** Armadura de cisalhamento disposta a 45° da armadura longitudinal.



Fonte: Autoria própria (2019).

### 5.3 Concretagem

O concreto foi confeccionado utilizando o modo de fabricação proposto por Barboza e Bastos (2008). A concretagem e moldagem das vigas e dos corpos de prova ocorreram na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Campo Mourão. Inicialmente, colocou-se a brita 1, a água e o aditivo por 30 segundos, e logo em seguida, adicionou-se o cimento. A areia foi adicionada aos poucos, e o concreto foi misturado por aproximadamente 5 minutos.

Para a confecção das vigas, foram utilizadas 3 fôrmas de madeira, uma para cada viga. Após a concretagem das vigas e dos corpos de prova, houve o adensamento do concreto em mesa vibratória. Na Figura 36 tem-se a imagem das vigas e dos corpos de prova logo após a concretagem.

**Figura 36:** Vigas e corpos de prova após a concretagem.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Após 24 horas, as vigas e os corpos de prova foram desmoldados e submersos em água para curar o concreto. Nas figuras a seguir, Figura 37 e Figura 38, observa-se as vigas e os corpos de prova logo após serem desmoldados.



**Figura 37:** Vigas após o desmolde.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 38:** Corpos de prova após o desmolde.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Após 19 dias de cura, foi realizado o ensaio à compressão e o ensaio para a determinação do módulo estático de elasticidade do concreto nos corpos de prova, sendo que dos 6 corpos de prova moldados, 3 foram usados para o ensaio à compressão e 3 foram usados para o ensaio da determinação do módulo estático de elasticidade.

## 5.4 Ensaio dos corpos de prova

### 5.4.1.1 Ensaio à compressão

O ensaio à compressão dos corpos de prova foi realizado no laboratório de estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Campo Mourão, segundo a ABNT NBR 5739:1994.

Os resultados obtidos no ensaio do concreto à compressão podem ser observados na Tabela 2 abaixo:

**Tabela 2:** Resultados do ensaio à compressão dos corpos de prova de concreto.

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (KN)	Resistência Efetiva (MPa)
CP1	100,65	7956,41	206,02	25,89
CP2	100,50	7932,72	206,16	25,99
CP3	100,03	7858,69	202,20	25,73

Fonte: Autoria própria (2019).

Realizando a média aritmética da resistência efetiva dos 3 corpos de prova, verificou-se que a resistência do concreto à compressão ( $f_{c\text{médio}}$ ) é de 25,87 MPa. O ensaio também resultou em um desvio padrão de 0,1317 MPa entre os 3 corpos de prova, e um coeficiente de variação de 0,5%.

### 5.4.1.2 Ensaio da determinação do módulo estático de elasticidade do concreto à compressão

O ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade também foi realizado no laboratório de estruturas da UTFPR – câmpus Campo Mourão. O ensaio foi realizado segundo a norma ABNT NBR 8522:2008. Os resultados obtidos podem ser observados na tabela 3 abaixo.

**Tabela 3:** Resultados do ensaio da determinação do módulo estático de elasticidade do concreto à compressão.

Corpo de Prova	Ruptura Prevista (KN)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Tensão em 30% da Ruptura Prevista (MPa)	Deformação em 30% da Ruptura Prevista (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CP4	204,79	25,82	26,74	7,74	0,024	31,6
CP5	204,79	25,85	27,01	7,76	0,025	30,9
CP6	204,79	25,82	25,08	7,74	0,024	31,6

Fonte: Autoria própria (2019).

Considerando a média obtida em relação aos 3 corpos de prova ensaiados, pode-se concluir que o valor do módulo de elasticidade do concreto foi de 31,33 GPa.

A deformação em 0,5 MPa dos 3 corpos de prova foi de 0,001%. Ainda com relação ao módulo de elasticidade, os corpos de prova apresentaram desvio padrão de 0,4015 GPa, e um coeficiente de variação de 1,281%.

## 5.5 Ensaio experimental

Para o ensaio de impacto nas vigas de concreto armado, foi utilizado um sistema constituído por um tripé com roldana, uma corda, e um corpo metálico preenchido com concreto, de base retangular com dimensões de 10 cm x 20 cm, e altura de 60 cm, e massa de 35 kg, mostrado na Figura 39. O tripé foi montado ao ar livre na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Campo Mourão.

**Figura 39:** Imagens do impactador. a) Vista lateral b) Vista frontal.



Fonte: Autoria própria (2019).

A viga foi biapoiada em dois corpos cilíndricos de concreto, que foram fixados no solo com o auxílio de grampos metálicos. O sistema completo utilizado para o ensaio de impacto, incluindo tripé, corda, corpo metálico, viga e apoios está representado na Figura 40 abaixo.

**Figura 40:** Sistema utilizado no ensaio de impacto em viga de concreto de armado.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

O ensaio foi realizado manualmente. O corpo metálico foi puxado até a altura limite, fazendo com que o impacto ocorresse a 2,05 m. Foram aplicados 7 golpes na viga 1 e na viga 2, a fim de notar a forma de fissuração em cada uma delas, considerando a mesma quantidade de golpes. O número de golpes escolhido foi 7 devido ao fato de que, após 7 golpes aplicados na viga 1, ela demonstrou estado um estado elevado de deterioração.

## 5.6 Procedimentos para análises do resultado

Os resultados serão apresentados de forma qualitativa, já que as vigas com estribos em diferentes situações serão comparadas entre si, gerando resultados interpretativos na análise experimental.

A análise dos resultados será visual, ou seja, será feita a comparação visual do estado visual do estado de fissuração de cada ensaio de impacto. Foi realizado o

registro das fissuras nas vigas por meio das fotos que foram feitas antes e após o ensaio.

Com base nos objetivos propostos e na revisão de literatura realizada, delineou-se um método de pesquisa qualitativo e investigativo. Desta forma, buscou-se apresentar todos os procedimentos e materiais que foram utilizados na investigação do efeito da armadura de cisalhamento nos mecanismos de resistência aos efeitos de forças impulsivas do tipo impacto.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos através do ensaio de impacto nas 2 vigas de concreto armado. Vale ressaltar que a carga de impacto foi aplicada pontualmente no meio do vão, portanto, a força cortante é constante ao longo de toda a viga, sendo assim, as imagens foram aproximadas para mostrar melhor o que ocorreu no ponto em que o impacto foi aplicado sobre a viga. Para a apresentação dos resultados da fissuração das vigas, foi adotado um sistema de diferenciação das fissuras por cores, a fim de realizar uma comparação mais adequada entre as duas vigas no final do capítulo.

### 6.1 Resultados: Armadura de Cisalhamento a 90°

Após os primeiros impactos, ocorreu elevada deterioração do concreto no local em que o impactador atingiu a viga, fazendo com que o impacto ocorresse mais próximo as armaduras, e surgissem fissuras relacionadas à flexão. As fissuras serão apresentadas nas figuras a seguir, com a descrição de como ocorreram, e em qual lado da viga elas apareceram. Também serão mostradas imagens das fissuras evidenciadas. Na Figura 41, nota-se as primeiras fissuras que apareceram na viga, após 3 impactos. Na Figura 42 tem-se a imagem das fissuras evidenciadas.

**Figura 41:** Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 3 impactos – lado A.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 42:** Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 3 impactos – lado A, com as fissuras em evidência.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Com a continuação do ensaio, notou-se o aumento na largura das fissuras, porém, não ocorreu novas fissuras aparentes na viga. Nas figuras a seguir, Figura 43 e Figura 45, pode-se observar o que ocorreu com a viga, em seus 2 lados, após 7 golpes de impacto. Já na Figura 44 e Figura 46, tem-se as fissuras em evidência.

**Figura 43:** Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado A.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 44:** Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado A, com fissuras em evidência.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 45:** Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado B.



**Fonte:** Autoria própria (2019).



**Figura 46:** Viga com a armadura de cisalhamento a 90° após 7 impactos – lado B, com fissuras em evidência.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Após 7 golpes, devido ao elevado grau de deterioração da viga, o ensaio na mesma foi finalizado. Neste estado final, a viga já havia perdido grande parte do concreto da zona de compressão, enquanto, na zona tracionada, apresentou o destacamento do concreto em próximo a armadura de tração.

## **6.2 Resultados: Armadura de Cisalhamento a 45°**

Assim como ocorreu com as vigas com a armadura de cisalhamento a 90°, também foi observado a deterioração do concreto na região onde o impactador atingiu a viga, fazendo com que o impacto ocorresse mais próximo as armaduras, e devido a isso, surgiram fissuras de flexão na viga. Essa perda de concreto na região crítica de compressão da viga ocasionou uma diminuição da capacidade resistente à flexão, levando a alteração da linha neutra.

A primeira fissura apareceu após 2 golpes e, na Figura 47 e Figura 48 pode-se observar a fissuração que ocorreu nos dois lados da viga após esses 2 golpes aplicados, com as fissuras em evidência.

**Figura 47:** Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 2 impactos – lado A, com a fissura em evidência.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 48:** Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 2 impactos – lado B, com a fissura em evidência.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Os golpes continuaram sendo aplicados na viga até atingir o total de 7 golpes, a fim de comparar a fissuração das vigas com as armaduras nas diferentes disposições já apresentadas anteriormente, para analisar o que ocorreu em cada uma delas levando em consideração o mesmo número de golpes. Na Figura 49 e Figura

50 pode-se observar o resultado final do ensaio de impacto nos dois lados da viga após os 7 golpes.

**Figura 49:** Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado A.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 50:** Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado B.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Diferentemente da primeira viga, esta apresentou várias microfissuras ao longo de seu comprimento após 7 golpes, nos dois lados da viga, que podem ser observadas em evidência na Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

**Figura 51:** Viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado A, com as microfissuras em evidência.



Fonte: Autoria própria (2019).

**Figura 52:** Microfissuras na viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado B, a direita, com as microfissuras em evidência



Fonte: Autoria própria (2019).

**Figura 53:** Microfissuras na viga com a armadura de cisalhamento a 45° após 7 impactos – lado B, a esquerda, com as microfissuras em evidência.



**Fonte:** Autoria própria (2019).







Na viga 2, com a armadura transversal disposta a 45° da armadura longitudinal, foi possível notar o surgimento de várias microfissuras inclinadas ao longo de toda a viga, e também notou-se que a largura da fissura central aumentou com o decorrer do ensaio de impacto.

Após 7 golpes, o ensaio foi finalizado, com o objetivo de comparar por meio de registros fotográficos as duas vigas com armaduras em diferentes disposições. Conforme foi apresentado anteriormente, as vigas foram submetidas ao mesmo número de golpes de impacto, a fim de analisar as diferenças apresentadas em cada uma delas.

### **6.3 Considerações sobre a armadura de cisalhamento para testes de impacto**

Após a realização do ensaio de impacto nas duas vigas de concreto armado apresentadas anteriormente, sendo a viga 1 com a armadura de cisalhamento a 90° da armadura longitudinal, e a viga 2 com a armadura de cisalhamento a 45° da armadura longitudinal, foi elaborada a Tabela 4, a fim de realizar um comparativo mais eficiente entre o estado de fissuração das duas vigas.

**Tabela 4:** Análise comparativa entre as vigas 1 e 2 após o ensaio experimental de impacto.

	<b>Viga 1 (Asw a 90°)</b>	<b>Viga 2 (Asw a 45°)</b>
<b>Viga após os primeiros golpes</b>		
<b>Análise dos Resultados</b>	Após os primeiros golpes aplicados sobre as vigas, é possível notar a diferença na disposição das primeiras fissuras, como mencionado anteriormente.	
<b>Viga após 7 golpes – Lado A</b>		
<b>Viga após 7 golpes – Lado B</b>		
<b>Análise dos Resultados</b>	Após a finalização do ensaio, nota-se que na viga 1 as fissuras continuaram com o mesmo formato, tendo sofrido aumento apenas em sua largura. Já na viga 2, além do aumento da largura da fissura central, também ocorreu o aparecimento de várias microfissuras ao longo da viga.	

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Sendo assim, o capítulo 6 apresentou os resultados obtidos através do ensaio de vigas de concreto armado submetidas a cargas de impacto com as armaduras de cisalhamento dispostas de duas formas diferentes em relação à armadura longitudinal. Devido ao ensaio ter ocorrido em solo, os apoios, e por consequência as vigas sofreram elevado amortecimento, e isso pode ter influenciado nos resultados. O ideal seria o ensaio ocorrer em uma plataforma rígida, evitando possíveis formas de amortecimento nos apoios e nas vigas.

## 7 CONCLUSÃO

Após a realização da análise experimental deste trabalho, pode-se concluir que a disposição dos estribos no arranjo das armaduras em vigas de concreto armado influencia na fissuração das vigas. Mesmo que, a fissuração ocorra devido a flexão do concreto armado.

Conforme o ensaio foi prosseguindo, e o número de impactos na viga foi aumentando, ocorreu grande desgaste da região de concreto na parte superior da viga, que fez com que a linha neutra da mesma fosse deslocada. Devido a este fato, o impacto ocorreu mais próximo das armaduras longitudinais. Sendo assim, o carregamento de impacto gerou tensões que ultrapassaram a resistência do concreto à tração, e com isso, surgiram as primeiras fissuras de flexão. Após elevada deterioração da viga, a mesma passou a trabalhar no Estádio III.

Na viga 2, notou-se que inicialmente surgiu uma fissura a  $90^\circ$  da armadura longitudinal da viga, e observou-se também que conforme o número de impactos aumentava, começaram a surgir fissuras em outras regiões da viga, sendo essas fissuras inclinadas, devido a direção das tensões principais de tração. Já na viga 1, as fissuras inclinadas apareceram logo nos primeiros impactos, partindo do centro da viga.

Comparando as duas vigas, verificou-se que a viga 2 teve um desgaste bem menor quando comparada a viga 1, principalmente comparando-se as fissuras centrais entre as duas vigas. Na viga 1, notou-se o descolamento de um pedaço de concreto na parte inferior da mesma, já na viga 2, não observou-se grandes mudanças na parte inferior da viga após a aplicação dos 7 impactos sucessivos. Foi aplicado o mesmo número de golpes em ambas as vigas, a fim de se obter a melhor comparação da fissuração entre cada uma delas, quando as mesmas fossem submetidas ao mesmo número de impactos.

Sendo assim, foi possível afirmar que em termos de resistência e fissuração das vigas, o arranjo das armaduras com os estribos dispostos a  $45^\circ$  da armadura longitudinal em uma viga de concreto armado seria um arranjo mais adequado. Considerando as diferenças notadas entre as duas vigas na análise experimental, conclui-se que foi possível atingir os objetivos propostos inicialmente neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Gilvania Tertó. **Avaliação de absorção de energia de impacto uma abordagem baseada em testes com estruturas similares**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BARBOZA, Marcos R.; BASTOS, Paulo Sérgio. **Traços De Concreto Para Obras De Pequeno Porte**. Artigo - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2017.
- BEER, Ferdinand P. et al. **Estática e Mecânica dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.
- CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2**. São Paulo: Pini, 2009.
- CERQUEIRA, Rosana. Problema em apoio pode ter provocado queda de viaduto em SP, diz especialista. Globo News. Nov, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/15/especialista-diz-que-problema-em-apoio-provocou-queda-de-viaduto-em-sp.ghtml>>. Acesso em: Jun, 2019.
- FUJIKAKE, Kazunori; SOEUM, Sam; MATSUI, Takahiro. Feasibility Study on CERP Strengthened RC Beams Subjected to Impact Loadings. **Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on protective structures**, Pzonan, Poland, p. 688 - 697,



2018/August.

G1. Motorista diz que viu caçamba de caminhão levantada na Av. Brasil antes de atingir passarela: “Acelerei”. G1 Rio, TV Globo. Jan, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/motorista-diz-que-viu-cacamba-de-caminhao-levantada-na-av-brasil-antes-de-atingir-passarela-acelerei.ghtml>>. Acesso em: Jun, 2019.

GERE, James M. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Learning, Pioneira Thomson, 2003. v. 1

KIM, Seugnwon et al. Strengthening Effect of Externally Reinforced RC Structure with SIFRCC on Impact Load. Feasibility Study on CERP Strengthened RC Beams Subjected to Impact Loadings. **Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on protective structures**, Pzonan, Poland, p. 522 - 528, 2018/August.

MUCHERONI, Mário Francisco. **Dinâmica Vetorial - Teoria**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2011.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. Cisalhamento em vigas – capítulo 13. In: **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007, p. 173 - 186.

SANTOS, Roberto Machado Dos. **Comportamento de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Sujeitas a Carga de Impacto**. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SCHÖN, Cláudio Geraldo. **Mecânica dos Materiais**. 4. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.