

UFPA

PPGEC

Rodrigo Castro dos Santos

ANÁLISE DO EFEITO ARCO

AO CISALHAMENTO EM

VIGAS DE CRFA

Universidade Federal
do Pará



QUALIFICAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor
Bernardo Nunes de Moraes Neto

Belém-Pará-Brasil
2018

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia



Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Rodrigo Castro dos Santos

ANÁLISE DO EFEITO ARCO AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CRFA

QUALIFICAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Bernardo Nunes de Moraes Neto

Belém-Pará, Outubro de 2018

CESSÃO DE DIREITOS

FRASE

*“No meio da confusão, encontre a simplicidade.
A partir da discórdia, encontre a harmonia. No
meio da dificuldade reside a oportunidade...”*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir a minha existência neste mundo e iluminar os meus passos diariamente.

Ao Prof. Dr. Bernardo Nunes Moraes Neto pela orientação, amizade, ética profissional, incentivo e disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos, que com observações, críticas construtivas e ideias inovadoras, enriqueceram sobremaneira este trabalho.

Aos meus pais, Rosiberto Santos e Suzana Castro, por todo amor, carinho, compreensão e incentivo, propiciando-me sempre as melhores condições para poder desenvolver meus estudos.

Ao meu irmão Rodolfo Castro dos Santos (*in memoriam*), pelo amor, amizade carinho e incentivo dedicados a minha pessoa, durante sua estada neste plano material.

A Adriana Santos pelo amor, carinho e estímulos incessantes, não deixando-me esmorecer nos momentos de cansaço ou dúvidas. Por me fazer acreditar, mesmo quando ninguém acreditava.

À UFPA por permitir concluir esta etapa de minha jornada acadêmica

Aos colegas do PPGECC pelos momentos vivenciados e conhecimentos compartilhados na academia

À todos que de forma direta ou indireta (amigos, parentes e colegas) que ajudaram-me a conquistar este objetivo

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade avaliar o efeito arco no que concerne à atuação em vigas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), objetivando-se uma análise da resistência ao fenômeno de cisalhamento. Grande parte dos dimensionamentos de projetos em alvenaria estrutural adotados não considera a ação de efeito arco na concepção, ocasionando em projetos superdimensionados. Estudos do efeito arco ainda são escassos em nosso país, tornando-se dessa forma necessário o conhecimento e pesquisa neste segmento, concatenando-se essa avaliação com o efeito de cisalhamento, avaliando-se em quais condições pode-se obter as melhores resistências para peças adicionadas de fibras de aço. As vigas de CRFA foram projetadas considerando-se as variáveis de consumo de fibras ($C_f = 0,8\%$, $=1,0\%$, $1,2\%$ e $1,4\%$) e classe de resistência do concreto ($f_c = 30, 40, 50$ e 60 MPa), totalizando-se 16 amostras para análise. Após a obtenção dos resultados experimentais, realizou-se a criação de um banco de dados, no intuito de avaliar se os resultados obtidos experimentalmente estão em consonância com os valores obtidos na literatura técnica científica, sendo realizada posteriormente uma análise estatística. Por fim pretende-se estimar em quais condições a adição de fibras de aço ao concreto influencia no efeito arco e de que modo este efeito apresenta os melhores resultados para combater o fenômeno de cisalhamento.

ABSTRACT

The aim of the present work is to evaluate the arc effect with respect to the performance of concrete beams reinforced with steel fibers (CRFA), aiming at an analysis of the resistance to the shear phenomenon. Most of the project design in structural masonry adopted does not consider the effect of arch effect in the design, causing in oversized projects. Studies of the arc effect are still scarce in our country, making it necessary the knowledge and research in this segment, being concatenated this evaluation with the effect of shearing, evaluating in which conditions can be obtained the best resistances for pieces added with steel fibers. The CRFA beams were designed considering the variables of fiber consumption ($C_f = 0.8\%$, $= 1.0\%$, 1.2% and 1.4%) and resistance class of the concrete ($f_c = 30, 40, 50$ and 60 MPa), totalizing 16 samples for analysis. After obtaining the experimental results, the creation of a database was carried out, in order to evaluate if the results obtained experimentally are in consonance with the values obtained in the scientific technical literature, and later a statistical analysis of the same ones. Finally, we intend to estimate under what conditions the addition of steel fibers to the concrete influences the arc effect and in what way this effect presents the best results to combat the shear phenomenon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - – Trump Tower de Chicago	8
Figura 4.2– Fundação de uma turbina eólica	8
Figura 4.3 - Ponte de St. Anthony Falls	9
Figura 4.4 – Vigas de concreto liso e reforçado	10
Figura 4.5 - Viga de concreto protendido.....	11
Figura 4.6 - Elementos construtivos em concreto armado.....	12
Figura 4.7 - Elementos construtivos em concreto armado.....	12
Figura 4.8 - Fibras e Aço, de Vidro, Sintéticas e Naturais	13
Figura 4.9 – Diagrama Tensão X Deformação específica elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto	15
Figura 4.10 - Outros tipos de fibras	18
Figura 4.11 - Aspectos sobre o concreto com fibras de aço	22
Figura 12 – Classificação das Fibras quanto à seção transversal	23
Figura 4.13 - – Classificação das fibras quanto ao mecanismo de ancoragem	23
Figura 4.14 – Avaliação do $FIER_{rel}$ para diferentes seções	24
Figura 4.15 - Análise da capacidade de absorção de energia do CRFA	25
Figura 4.16 - Forças internas no Cisalhamento	26
Figura 4.17 - Falha de cisalhamento.....	26
Figura 4.18 - – Efeito Arco nas paredes de Alvenaria	28
Figura 4.19 - – Sistema parede-viga como arco atirantado	29
Figura 4.20 - Formação do arco em paredes sobre apoios discretos	30
Figura 4.21 – Tensões verticais e de cisalhamento na viga	32
Figura 4.22 – Esforços em uma viga de um sistema parede-viga	32
Figura 4.23 – Tensões horizontais no sistema parede-viga	33
Figura 4.24 – Sistemas Parede-Viga com carregamento equivalente	36
Figura 4.25 – Região de formação do arco	37
Figura 26 – Detalhes do ensaio nas amostras.....	39
Figura 4.27 – Tensão do aço composta pela ação da viga e efeito arco	39
Figura 4.28 - TA/ TB no centro do vão de cisalhamento.....	40
Figura 29 – Variação do momento interno do comprimento do braço	40
Figura 4.30 – Comparação das diversas equações com a respectiva relação a/d	42

Figura 4.31 – Mecanismo de arco.....	43
Figura 4.32 - Detalhe do teste na viga Figura 33 - Sistema de carregamento.....	44
Figura 4.34 – Modos de ruína.....	44
Figura 35 – Relação entre rotação do ângulo e a taxa de deformação por flexão.....	45
Figura 4.36 – Idealização refinada da treliça com uma corda de compressão inclinada: a) Modelo de treliça padrão; b) Treliça tipo Fan; c) Modelo de treliça combinada com Strut-Tie; d) Modelo refinado de treliça	47
Figura 4.37 – Interpretação mecânica dos componentes resistentes ao cisalhamento: a) Viga de concreto reforçado; b) Ação da viga para zdT/dx ; c) Efeito arco para Cdz/dx	48
Figura 4.38 – Comparação entre os valores da resistência última ao cisalhamento estimados com os mensurados	49
Figura 5.1 – Detalhes das armaduras	53
Figura 5.2 – Concepção do ensaio	54
Figura 5.3 – Monitoramento do deslocamento vertical da seção da viga	55
Figura 5.4 – Monitoramento da deformação	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e da matriz de cimento	14
Tabela 4.2 – Classificação das fibras de aço segundo a NBR 15530	18
Tabela 4.3 - – Classificação das fibras segundo as regulamentações internacionais .	19
Tabela 4.4 - - Detalhes das amostras da viga e os resultados obtidos.....	39
Tabela 4.5 - Comparação estatística da equação 4.6.8 às equações do ACI CODE e de Zsutty.....	41
Tabela 4.6 - Perfis das vigas de ensaio.....	43
Tabela 4.7 – Resultados do ensaio.....	44
Tabela 4.8 - Componentes de resistência de diversos modelos de treliça	46
Tabela 5.1 – Propriedades das vigas	52

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMARIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2	JUSTIFICATIVA.....	2
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1	O HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO E DO CONCRETO REFORÇADO COMO MATERIAIS ESTRUTURAI.....	4
4.2	CIMENTO E CONCRETO	4
4.3	CONCRETO REFORÇADO	5
4.4	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA O CONCRETO REFORÇADO.....	6
4.5	ESTRUTURAS DE CONCRETO REFORÇADAS	7
4.6	MECANICA DO CONCRETO REFORÇADO	9
4.6.1	MEMBROS DO CONCRETO REFORÇADO	11
4.6.2	FIBRAS	13
4.6.3	FIBRAS DE AÇO.....	16
4.6.3	COMPÓSITO ESTRUTURAL: CONCRETO COM FIBRAS	19
4.6.4	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	21
4.7	EFEITO DE CISALHAMENTO.....	25
4.8	EFEITO ARCO.....	28
4.9	MODELOS SIMPLIFICADOS USANDO RIGIDEZ RELATIVA	34
4.9	EFEITO ARCO EM VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS	37
4.9.1	KIM <i>et all</i> (1999)	37
4.6.2	HAMAHARA <i>et all</i> (2001)	43
4.6.3	JEON <i>et all</i> (2013)	46
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
5.1	– CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS.....	51
5.2	– SISTEMA DE ENSAIO	54
5.3	– INSTRUMENTAÇÃO.....	55
5.3.1	– DESLOCAMENTOS VERTICAIS	55

5.3.2 – DEFORMAÇÕES.....	56
5.4 – MATERIAIS	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
7 CONCLUSÕES.....	58
8 CRONOGRAMA DA DISSERTAÇÃO.....	59
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, a humanidade vem criando e desenvolvendo produtos no intuito de reparar ou corrigir falhas ocorridas, melhorar o desempenho ou otimizar a produção dos mesmos, obtendo-se assim ganhos dos mais variados (econômicos, sociais, saúde, etc). Desta forma, torna-se imperioso o conhecimento dos constituintes destes produtos, as características destes bem como o funcionamento dos mesmos nas condições em que serão utilizados e aplicados, a interação entre eles e com o meio que os circunda.

Alguns compósitos são utilizados na construção civil há muito tempo, há registros que indicam que sua utilização já ocorria no Egito Antigo, como reportam as Sagradas Escrituras (FIGUEIREDO, 2011).

Para KAWDE *et al*, (2017), o concreto é o material mais utilizado para a resistência à compressão na construção de edifícios. De forma inversa, a capacidade de carga de tração é muito baixa, resultando em quebra fácil de seus componentes. Para aumentar o desempenho do concreto sob carga de tração ou carga dinâmica, diferentes tipos de fibras são adicionados ao concreto.

Segundo PASA (2007) as primeiras dosagens do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) datam da década de setenta e continham matrizes cimentícias compostas de agregados graúdos e fibras metálicas lisas. Inicialmente as fibras de aço utilizadas apresentavam resistências entre 500 e 900 MPa e geometrias cilíndricas. Sabia-se à época que seções com maior área de contato entre fibra e matriz aumentariam o desempenho do compósito, mas devido limitações tecnológicas, era inexequível desenvolver fibras com outras seções transversais. Posteriormente, com a adoção de novas tecnologias, foi possível desenvolver-se fibras de aço com novas seções transversais.

Desta forma o presente trabalho tem por finalidade realizar um estudo sobre o efeito arco (considerações, surgimento, propagação), a relação deste com a ação de cisalhamento, realizar ensaios experimentais nas vigas de CRFA, ensaios estes baseados nas variáveis consumo de (C_f) e resistência do concreto (f_c), objetivando-se avaliar em quais condições obtêm-se os melhores resultados para combater o fenômeno de cisalhamento.

2 JUSTIFICATIVA

A grande maioria das construções em alvenaria é suportada por vigas de concreto armado, onde essas servem para transmitir os carregamentos oriundos das paredes para pontos de apoio – fundações ou pilares. Nesses arranjos estruturais, desenvolve-se uma relação entre as paredes de alvenaria e as vigas de concreto armado, onde essa relação é conhecida como efeito arco.

Dessa forma, usualmente, os carregamentos verticais são considerados com uma distribuição uniforme ao longo da viga e os carregamentos horizontais nem sequer são considerados no dimensionamento das estruturas. Dessa forma pode-se inferir que existe um superdimensionamento no que tange ao projeto das estruturas, acarretando em uma estrutura mais pesada e cara

O efeito arco é um tema pouco explorado no contexto nacional, onde dificuldades para a obtenção de trabalhos técnicos científicos que versem sobre o tema são consideráveis. Quando relaciona-se este fator com o fenômeno de cisalhamento as dificuldades aumentam consideravelmente. Desta forma objetivou-se no presente trabalho concatenar os fenômenos de efeito de arco e cisalhamento, observando a existência de relação entre as mesmas, de que forma se comportam, e qual a resistência ao efeito de cisalhamento para vigas reforçadas com CRFA, onde os parâmetros de estudo consistirão no consumo de fibras e resistência do concreto.

3 OBJETIVOS

Estudar o efeito de arco em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, o comportamento deste no que tange à relação com o fenômeno de cisalhamento, dimensionar vigas de CRFA utilizando como parâmetros de análise as variáveis consumo de fibras e resistência do concreto, assim obtendo-se resultados para serem comparados com os obtidos na literatura técnica especializada.

Intende-se verificar a distribuição de tensões ao longo das vigas, as concentrações nos apoios e o comportamento das mesmas quando submetidas aos carregamentos de ensaio.

Outro fator a ser analisado diz respeito a relação vão de cisalhamento e profundidade (a/d) da viga, haja vista de ser um fator de suma importância para a análise de resistência da viga ao cisalhamento, conforme a literatura técnica especializada.

Analisar a resistência das vigas de CRFA ao efeito de cisalhamento, concatenando os fatores consumo de fibras ($C_f = 0,8\%$, $=1,0\%$, $1,2\%$ e $1,4\%$) e a classe de resistência do concreto ($f_c = 30, 40, 50$ e 60 MPa)

Posteriormente pretende-se relacionar a relação a/d com a resistência ao cisalhamento, verificando se existe alguma relação entre as mesmas ou algum modelo comportamental entre as variáveis de estudo.

Elaboração de um banco de dados, objetivando-se avaliar os valores obtidos com os encontrados na literatura técnica especializada, realizando-se um ensaio estatístico tendo como critério de avaliação a segurança (critério de COLLINS).

Estimar a resistência última do CRFA ao cisalhamento, em quais condições obtêm-se os melhores resultados no que tange à segurança das peças.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO E DO CONCRETO REFORÇADO COMO MATERIAIS ESTRUTURAIS

4.2 CIMENTO E CONCRETO

A argamassa de cal foi usada pela primeira vez em estruturas na civilização minóica em Creta por volta de 2000 a.C. e ainda é usado em algumas áreas. Este tipo de argamassa tinha a desvantagem de se dissolver gradualmente quando imerso em água e, portanto, não poderia ser usado para juntas expostas ou submersas. Por volta do século III a.C., os romanos descobriram uma cinza vulcânica arenosa fina que, quando misturada com a argamassa de cal, dava uma argamassa muito mais forte, que podia ser usada debaixo d'água (MACGREGOR, 2009).

Em 1824, Joseph Aspdin misturou calcário moído e argila de diferentes pedreiras e as aqueceu em um forno para fazer cimento. Aspdin nomeou seu produto de cimento Portland porque o concreto feito com ele se assemelhava a pedra Portland, um calcário de alta qualidade da Ilha de Portland, no sul da Inglaterra. Este cimento foi usado por Brunel em 1828 para a argamassa no revestimento de alvenaria de um túnel sob o rio Tamisa e em 1835 para pilares de concreto para uma ponte.

Ocasionalmente, na produção de cimento, a mistura seria superaquecida, formando um clínquer duro que era considerado estragado e descartado. Em 1845, I. C. Johnson descobriu que o melhor cimento resultava da moagem deste clínquer. Este é o material agora conhecido como cimento Portland. O cimento Portland foi produzido na Pensilvânia em 1871 por D. O. Saylor e quase ao mesmo tempo em Indiana por T. Millen de South Bend.

MOHOLD (2012) afirma que o concreto é o material de construção o mais extensivamente usado no mundo. A razão para o seu uso extensivo é que ele fornece boa trabalhabilidade e pode ser moldado para qualquer forma. O concreto de cimento comum possui uma resistência à tração muito baixa, ductilidade limitada e pouca resistência à fissuração, ocasionando em micro fissuras internas, levando à quebra. Nesta idade moderna, as construções da engenharia civil têm suas próprias exigências

estruturais e da durabilidade, cada estrutura tem a sua própria finalidade e, portanto, para cumprir este objetivo, a modificação no concreto de cimento tradicional tornou-se obrigatória.

4.3 CONCRETO REFORÇADO

W. B. Wilkinson de Newcastle-upon-Tyne obteve uma patente em 1854 para um sistema de piso de concreto armado que usava cúpulas de gesso oco como formas. As nervuras entre as formas foram preenchidas com concreto e foram reforçadas com cordas de mina de aço descartadas no centro das nervuras. Na França, Lambot construiu um barco a remo de concreto reforçado com arame em 1848 e patenteou-o em 1855. Sua patente incluía desenhos de vigas de concreto armado e uma coluna reforçada com quatro barras de ferro redondas. Em 1861, outro francês, Coignet, publicou um livro ilustrando os usos do concreto armado.

Talvez o maior incentivo ao desenvolvimento inicial do conhecimento científico de concreto reforçado veio do trabalho de Joseph Monier, proprietário de um viveiro francês. Monier começou a experimentar em cerca de 1850 com banheiras de concreto reforçadas com ferro para o plantio de árvores. Ele patenteou sua idéia em 1867. Esta patente foi rapidamente seguida por patentes para tubos e tanques reforçados (1868), placas planas (1869), pontes (1873) e escadas (1875). Em 1880 e 1881, a Monier recebeu patentes alemãs para muitas das mesmas aplicações. Estes foram licenciados para a empresa de construção Wayss e Freitag, que contratou professores Mörsch e Bach da Universidade de Stuttgart para testar a força do concreto armado e encomendou o Sr. Koenen, chefe inspetor de prédios para a Prússia, para desenvolver um método para calcular a força de concreto reforçado. O livro de Koenen, publicado em 1886, apresentou uma análise que supunha que o eixo neutro estava na metade da altura do membro.

De 1890 a 1920, os engenheiros passaram gradualmente a ter conhecimento da mecânica do concreto armado, à medida que livros, artigos técnicos e códigos apresentavam as teorias. Em um artigo de 1894 para a Sociedade Francesa de Engenheiros Civis, Coignet (filho do antigo Coignet) e Tedesko estenderam as teorias de Koenen para desenvolver o método de projeto de tensão de trabalho para flexão,

que foi usado universalmente de 1900 a 1950. Durante as últimas sete décadas, uma extensa pesquisa foi realizada sobre vários aspectos do comportamento do concreto armado, resultando nos atuais procedimentos de projeto.

O termo concreto estrutural é usado para se referir a toda a gama de estruturas de concreto: de concreto liso sem qualquer reforço; através de concreto armado ordinário, reforçado com barras de reforço normais; através de concreto parcialmente protendido, contendo geralmente barras de reforço e tendões de pré-esforço; para concreto totalmente protendido, com protensão suficiente para evitar fissuras no serviço diário.

4.4 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA O CONCRETO REFORÇADO

O primeiro conjunto de regulamentos de construção para concreto armado foi elaborado sob a liderança do professor Mörsch, da Universidade de Stuttgart, e foi publicado na Prússia em 1904. Regulamentos de projeto foram emitidos na Grã-Bretanha, França, Áustria e Suíça entre 1907 e 1909.

A American Railway Engineering Association nomeou um Comitê de Alvenaria e Concreto em 1890. Em 1903, este comitê apresentou especificações para o concreto de cimento portland. Entre 1908 e 1910, uma série de relatórios de comitê levou ao Regulamento de Construção Padrão para o Uso de Concreto Reforçado, publicado em 1910 [1-4] pela Associação Nacional de Usuários de Cimento, que subsequente se tornou o Instituto de Concreto Americano.

A especificação de projeto definitiva para edifícios de concreto armado na América do Norte é o “Building Code Requirements for Structural Concrete” (ACI 318-11) e Tratado (ACI 318R-11) [1-12]. O código e o tratado estão vinculados em um volume.

Este código, geralmente chamado de Código ACI, foi incorporado por referência no Código Internacional de Construção e serve como base para códigos comparáveis no Canadá, Nova Zelândia, Austrália, na maior parte da América Latina e alguns países no Oriente Médio. O Código ACI tem status legal somente se adotado em um código de construção local.

4.5 ESTRUTURAS DE CONCRETO REFORÇADAS

Concreto e concreto reforçado são usados como materiais de construção civil em todos os países. Em muitos, incluindo os Estados Unidos e o Canadá, o concreto armado é um material estrutural dominante na construção de engenharia. A natureza universal da construção em concreto armado deriva da ampla disponibilidade de barras de reforço e dos constituintes do concreto (cascalho ou brita, areia, água e cimento), das habilidades relativamente simples exigidas na construção do concreto e da economia de estruturas reforçadas. Concreto comparado com outras formas de construção. Concreto liso e concreto armado são usados em edifícios de todos os tipos (Fig. 4.1), estruturas subterrâneas, tanques de água, fundações de turbinas eólicas (Fig. 4.2) e torres, estruturas de exploração e produção de petróleo offshore, represas, pontes (Fig. 4.3) e até navios (MACGREGOR, 2009).



Figura 4.1 - – Trump Tower de Chicago (MACGREGOR, 2009)



Figura 4.2– Fundação de uma turbina eólica (MACGREGOR, 2009)



Figura 4.3 - Ponte de St. Anthony Falls (MACGREGOR, 2009)

4.6 MECANICA DO CONCRETO REFORÇADO

O concreto é forte em compressão, mas fraco em tensão. Como resultado, as fissuras se desenvolvem sempre que cargas, contração reordenada (restrained shrinkage) ou mudanças de temperatura geram tensões de tração em excesso da resistência à tração do concreto. Na viga de concreto simples mostrada na Fig. 4.4 B, os momentos em torno do ponto O devido às cargas aplicadas são resistidos por uma tensão interna - compressão acoplada envolvendo tensão no concreto. Uma viga não reforçada falha muito de repente e completamente quando a primeira fenda se forma. Em uma viga de concreto armado (Fig. 4.4c), barras de reforço são embutidas no concreto de tal forma que as forças de tensão necessárias para o momento de equilíbrio após as fissuras de concreto podem ser desenvolvidas nas barras.

Alternativamente, o reforço poderia ser colocado em um ducto longitudinal próximo a parte inferior da viga, como mostrado na Fig. 4.5, e esticado ou protendido, reagindo no concreto na viga. Isso colocaria o reforço em tensão e o concreto em compressão. Essa compressão atrasaria a fissura da viga. Tal membro é dito ser uma

viga de concreto protendido. O reforço em tal viga é referido como tendões de protensão e deve ser fabricado a partir de aço de alta resistência.

A construção de um elemento de concreto armado envolve a construção de uma forma ou molde na forma do membro a ser construído. A forma deve ser forte o suficiente para suportar o peso e a pressão hidrostática do concreto úmido, além de quaisquer forças aplicadas a ele por trabalhadores, equipamentos de fundição de concreto, vento e assim por diante. O reforço é colocado na forma e mantido no lugar durante a operação de concretagem. Depois que o concreto atingiu força suficiente, as formas podem ser removidas.

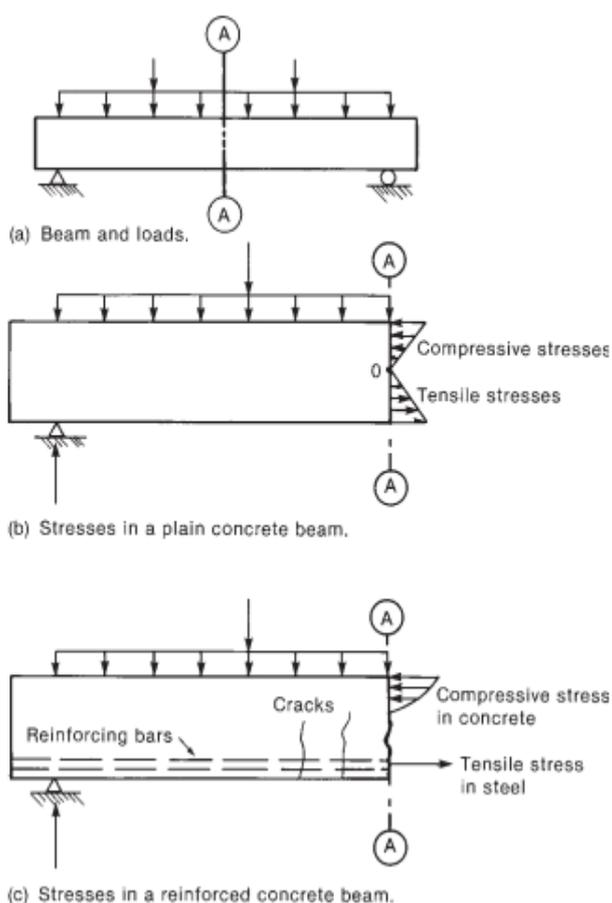


Figura 4.4 – Vigas de concreto liso e reforçado (MACGREGOR, 2009)

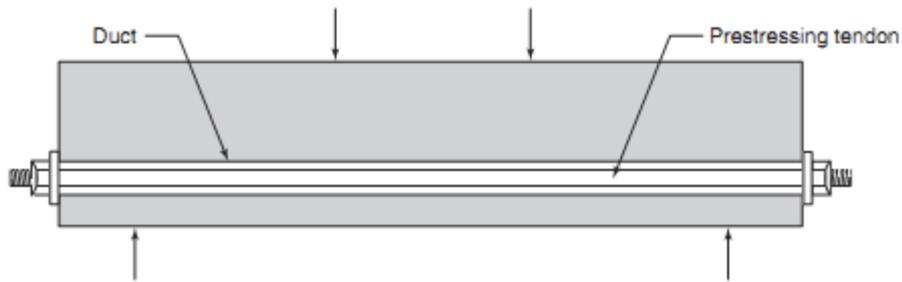


Figura 4.5 - Viga de concreto protendido

4.6.1 MEMBROS DO CONCRETO REFORÇADO

Estruturas de concreto armado consistem em uma série de "membros" que interagem para suportar as cargas colocadas na estrutura. O segundo andar do prédio da Fig. 4.6 é construído em concreto de construção de lajes de vigas. Aqui, uma série de nervuras ou vigas paralelas suportam a carga da laje superior. As reações que suportam as vigas aplicam cargas às vigas, que por sua vez são suportadas por colunas. Em tal piso, a laje superior tem duas funções: (1) transfere cargas lateralmente para as vigas e (2) serve como a flange superior das vigas, que atua nas vigas em forma de T que transmitem a carga para a viga. O primeiro andar do prédio da Fig. 4.6 tem um projeto de laje e viga no qual a laje se estende entre as vigas, que por sua vez aplicam cargas às colunas. As cargas da coluna são aplicadas às sapatas de apoio, que distribuem a carga sobre uma área de solo suficiente para evitar a sobrecarga do solo. Algumas condições do solo exigem o uso de pilares ou outras fundações profundas. No perímetro do edifício, as cargas do piso são suportadas diretamente nas paredes, como mostrado na Fig. 4-6, ou nas colunas externas, como mostrado na Fig. 4.7. Supõe-se que as lajes de primeiro e segundo andar da Fig. 4-6 transportem as cargas na direção norte-sul (ver seta de direção) para as vigas, que transportam as cargas em uma direção leste-oeste para outras vigas, vigas mestras, pilares ou paredes. Isso é chamado de ação de laje unidirecional e é análogo a um piso de madeira em uma casa, em que o piso decks transmite cargas para vigas de piso perpendiculares, que transportam as cargas para suportar vigas, e assim por diante.

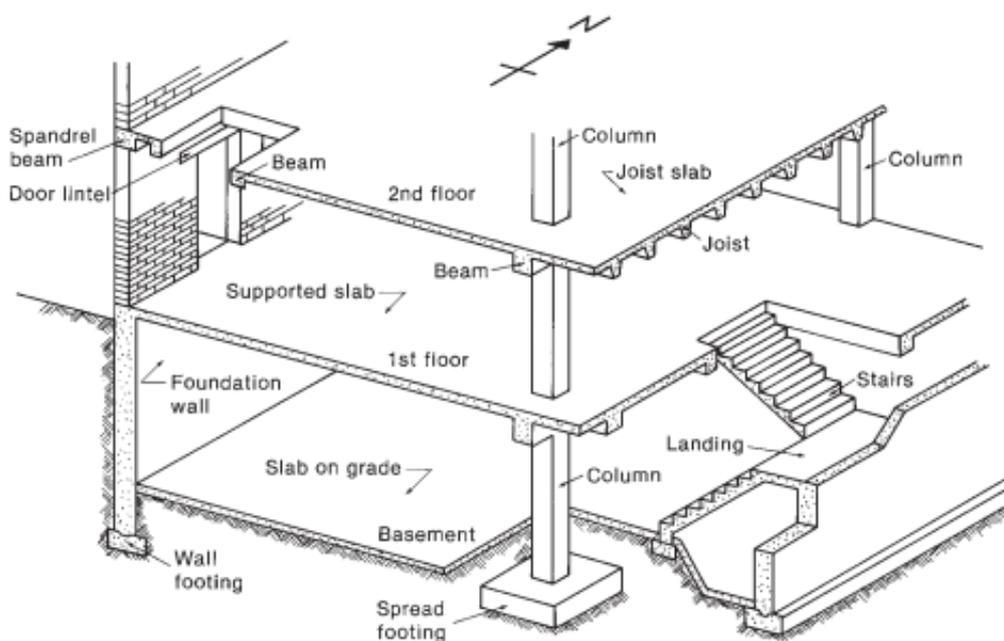


Figura 4.6 - Elementos construtivos em concreto armado

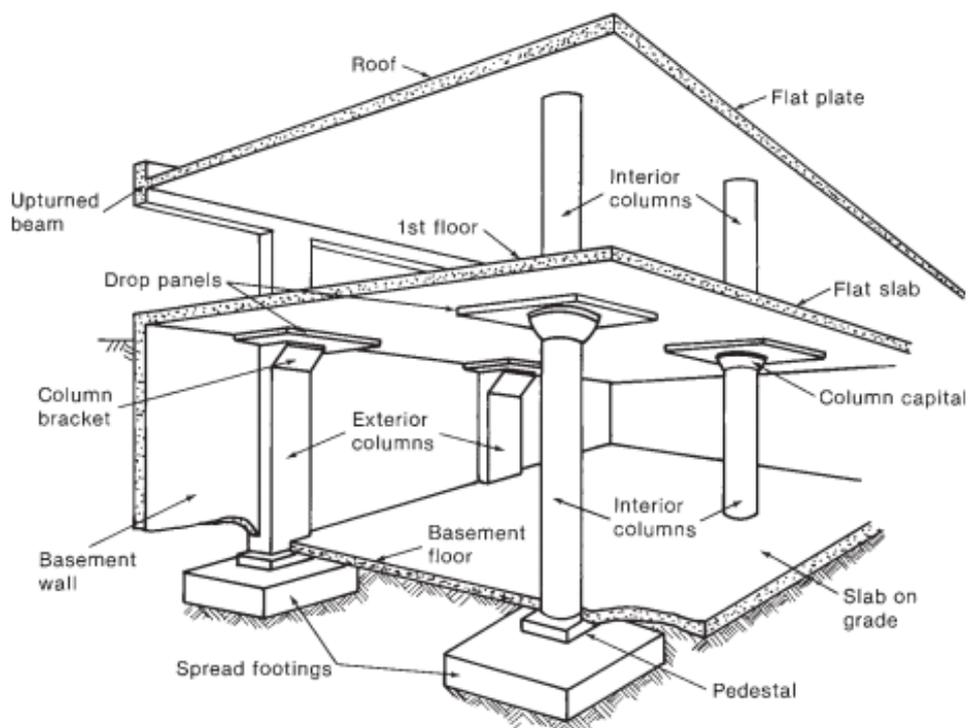


Figura 4.7 - Elementos construtivos em concreto armado

4.6.2 FIBRAS

De forma geral, as fibras podem ser classificadas como naturais, artificiais ou sintéticas. As artificiais se subdividem em inorgânicas e orgânicas. Dentro das inorgânicas encontram-se as de carbono (CF), vidro (GF), cerâmica (CEF) e metal (MTF) (JUNIOR E ROCHA, 2011, p. 20). Elas diferem entre si pela composição física e química, propriedades mecânicas e resistência quando expostas aos meios agressivos (VENDRUSCOLO, 2003). Não é de hoje que as fibras são utilizadas na construção civil. A Sagrada Escritura relata o uso da mesma no Antigo Egito, onde palha era empregada na fabricação de tijolos (BRAZ & NASCIMENTO, 2015).



Figura 4.8 - Fibras e Aço, de Vidro, Sintéticas e Naturais (PASA, 2007)

Segundo GÓIS (2010, p. 21) uma grande limitação do concreto convencional é a baixa resistência à tração, que é de apenas 7 a 10% de sua resistência à compressão, o concreto reforçado com fibras (CRF) é uma das alternativas mais utilizadas para melhorar o desempenho à tração. MEHTA e MONTEIRO (2014, p. 490).

A adição de fibras a uma matriz cimentícia resulta em um material compósito. No caso da matriz concreto, fibras curtas de aço, de polipropileno, de sisal, de aramida, entre outros tipos, já foram utilizados em obras e investigados nos mais diversos estudos. Na literatura é comum encontrar a expressão *SFRC* (*Steel Fiber Reinforced Concrete*), como denominação de Concreto Reforçado com Fibras de Aço (*CRFA*) (PASA, 2007).

Na tabela 4.1 pode-se verificar algumas características de diversos tipos de fibras e da matriz de cimento:

Fibra	Massa específica (g/cm ³)	Diâmetro, μm	Resistência à tração, Mpa	Módulo de elasticidade, Mpa	Deformação específica na ruptura (%)
Aço	7,8	100 - 1000	500 - 2600	210000	0,5 - 3,5
Vidro					
E	2,54	8 - 15	2000 - 4000	72000	3,0 - 4,8
AR	2,7	12 - 20	1500 - 3700	80000	2,5 - 3,6
Sintéticas					
Acrílico	1,18	5 - 17	200 - 1000	17000 - 19000	28 - 50
Aramida	1,44	10 - 12	2000 - 3100	62000 - 120000	2 - 3,5
Carbono	1,9	8 - 10	1800 - 2600	230000 - 380000	0,5 - 1,5
Nylon	1,14	23	1000	5200	20
Poliéster	1,38	10 - 80	280 - 1200	10000 - 18000	10 - 50
Poliétileno	0,96	25 - 1000	80 - 600	5000	12 - 100
Polipropileno	0,9	20 - 200	450 - 700	3500 - 5200	6 - 15
Naturais					
Celulose	1,5	25 - 125	350 - 2000	10000 - 40000	3,5
Sisal	-	-	280 - 600	13000 - 25000	10 - 25
Coco	1,12 - 1,15	100 - 400	120 - 200	19000 - 25000	-
Bambu	1,5	50 - 400	350 - 500	33000 - 40000	-
Juta	1,02 - 1,04	100 - 200	250 - 350	25000 - 32000	1,5 - 1,9
Capim Elefante	-	425	180	4900	3,6
Matriz de Cimento (para comparação)	2,5	-	10000 - 45000	3,7x10 ³	0,02

Tabela 4.1 Valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e da matriz de cimento (PASA, 2007).

FIGUEIREDO (2005) afirma que o módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto, sendo que as mesmas podem ser de baixo ou alto módulo. Na figura 4.9 observa-se o esquema de uma matriz hipotética reforçada com três tipos de fibras: uma de baixo módulo de elasticidade e duas de alto módulo, sendo uma de baixa e outra de alta resistência mecânica. Todas as fases foram consideradas como de comportamento elástico perfeito. No momento que a matriz se rompe (Ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto D), esta apresenta uma tensão muito baixa neste nível de deformação (σ_{FIBRA} de baixo módulo de elasticidade) resultando em uma baixa capacidade de reforço pós-fissuração da fibra. Por outro lado, a fibra de alto módulo de elasticidade e alta

resistência já apresentará um elevado nível de tensão (σ_{FIBRA} de alto módulo de elasticidade e alta resistência) no momento de ruptura da matriz o que lhe permitirá atuar como reforço já a partir do ponto B. Contudo, mesmo que uma fibra tenha elevado módulo de elasticidade, mas tenha uma baixa resistência à tração ou ao cisalhamento, sua capacidade de reforço pós-fissuração também será reduzida ou inexistente. Este é o caso observado na linha 0-C, onde qualquer que seja a situação haverá ruptura das fibras, ou seja, quando a matriz se romper, as fibras já terão sido rompidas e não fornecerão nenhum tipo de reforço. Essa preocupação é importante, pois a base do desempenho dos concretos reforçados com fibras está no papel exercido pelas fibras de ponte de transferência de tensão pelas fissuras (PASA, 2007).

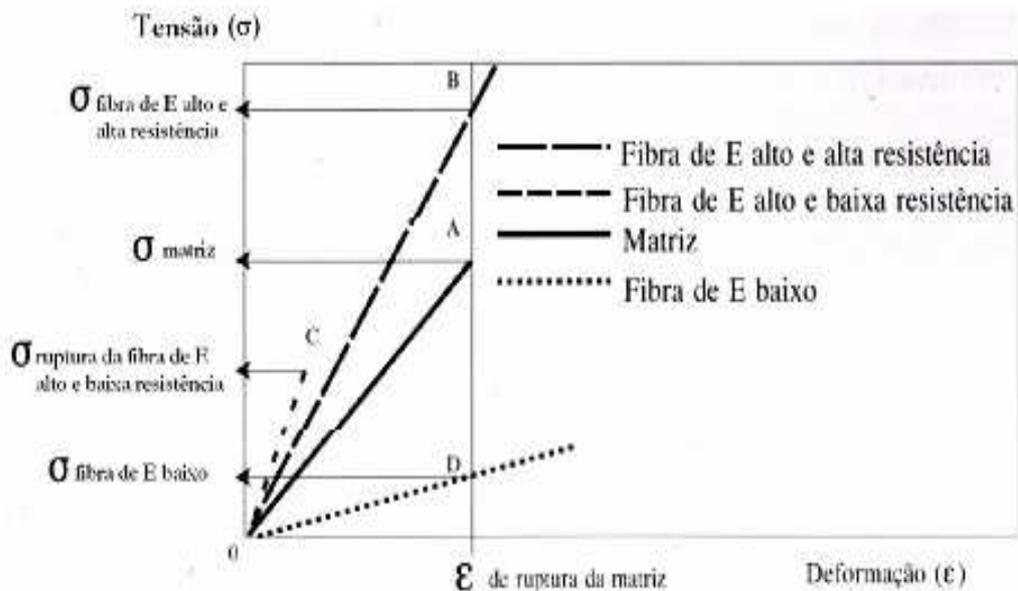


Figura 4.9 – Diagrama Tensão X Deformação específica elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (PASA, 2007)

4.6.3 FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço segundo FIGUEIREDO (2000) podem ser classificadas como de alto módulo, logo podem ser consideradas como destinadas ao reforço primário do concreto, ou seja, não se destinam somente à redução da fissuração e ao aumento na resistência ao impacto do material, mas também são capazes de proporcionar um ganho de desempenho quanto ao reforço mecânico. As fibras de aço atuam principalmente na pós-fissuração do concreto, onde servem como pontes de transferência de tensão pelas fissuras, possibilitando uma redução na velocidade de propagação nas mesmas (PASA, 2007).

No tocante às fibras de aço, segundo o ACI 544.1R-96 (1996), os primeiros ensaios experimentais e patentes envolvendo o uso de elementos discretos de aço na melhoria das propriedades do concreto datam de 1910. Entretanto, segundo LOPES (2005), LOBÃO (2005), OLIVEIRA (2010) e outros, os materiais compósitos a base de cimento apresentaram um desenvolvimento tecnológico notório nos anos 50 e 60. Neste período promoveram-se as principais investigações quanto à utilização das fibras de aço como reforço estrutural para o concreto (MORAES NETO, 2013).

De acordo com BARROS (1995), as propriedades do concreto mais beneficiadas pelos mecanismos de reforço das fibras são a capacidade de absorção de energia, a ductilidade, o controle da fissuração e a resistência às ações dinâmicas, de fadiga e de impacto. Quanto à aplicação do concreto reforçado com fibras de aço, BARROS (1995) e RODRIGUES JÚNIOR (2009) exemplificam a utilização destes concretos nos pisos industriais, nos pavimentos de estradas e aeroportos, nos revestimento de túneis, nos blocos de ancoragem de cabos de protensão ou em outras regiões com concentração de tensões, nos tubos de águas pluviais e esgotos, nas cascas, nos elementos de contenção, nos elementos sujeitos à sismos e/ou à impactos, nos dormentes, nos pré-fabricados em geral, nos reforços de elementos estruturais, etc. De acordo com SANTOS (2009), em 1970 foi construído o primeiro prédio com concreto reforçado com fibras de aço, o CN Tower em Toronto-Canada (MORAES NETO, 2013).

A eficácia das fibras em melhorar as propriedades mecânicas da matriz de concreto pode ser atribuída principalmente aos mecanismos responsáveis pela

transferência de tensões entre a fibra e o concreto e pelo efeito de “costura” das fissuras pelas fibras.

Segundo o ACI 544.1R-96, as fibras de aço destinadas ao reforço do concreto são suficientemente curtas para serem dispersas aleatoriamente à massa fresca de concreto. A NBR 15530 (2007) classifica as fibras de aço de acordo com a geometria (Tipo A, C e R) e quanto ao aço que lhes deu origem (Classe I, II e III), ver a Tabela 4.1. As fibras do Tipo A, C e R são designadas, respectivamente, por fibras Hooked, Crimped e lisas. Além das classificações anteriores, a NBR 15530 também estabelece limites para os valores do fator de forma e da resistência à tração das fibras. No que diz respeito à tensão de escoamento mínima das fibras, o ASTM A 820 (1996) sugere a tensão de 345 MPa, enquanto que o JSCE (1983) especifica o valor de 552 MPa. Além dos tipos de fibras apresentados na Tabela 4.2.2, o Technical Report no 63 publicado pela The Concrete Society também cita os tipos de fibras ilustrados na Figura 4.10.

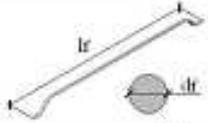
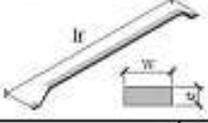
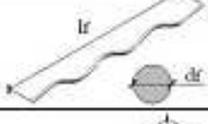
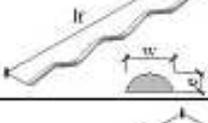
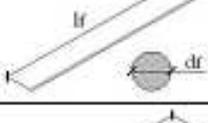
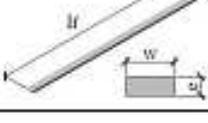
Tipo	Classe	Geometria	Fator de forma mínimo	Limite de resistência à tração (MPa)
A	I		40	1000
	II		30	500
C	I		40	800
	II		30	500
	III		30	800
R	I		40	1000
	II		30	500

Tabela 4.2 – Classificação das fibras de aço segundo a NBR 15530 (2007)



Figura 4.10 - Outros tipos de fibras apresentados pelo Technical Report nº 63 (The Concrete Society)

No que diz respeito à classificação das fibras segundo as regulamentações internacionais, comenta-se as recomendações do BS EN 14889-1 (2006), da ASTM A 820 (1996), as quais classificam as fibras segundo o processo de fabricação, e da JSCE (1983), que classificam as fibras de acordo com a seção transversal das mesmas, ver a Tabela 4.3:

BS EN 14889-1 (2006)	ASTM A 820 (1996)	JSCE (1983)
Grupo I- Fios trefilados	Tipo I- Fios trefilados	Tipo 1- Seção quadrada
Grupo II- Chapas cortadas	Tipo II- Chapas cortadas	Tipo 2- Seção circular
Grupo III- Extr. de metais fundidos	Tipo III- Extr. de metais fundidos	Tipo 3- Seção crescente
Grupo IV- Raspas de fios trefilados	Tipo IV- Outras fibras	.
Grupo V- Obt. do proc. de fresagem	.	.

Tabela 4.3 - – Classificação das fibras segundo as regulamentações internacionais (MORAES NETO, 2013).

De acordo com o ACI 544.1R-96 (1996), as fibras de aço lisas, ou seja, sem mecanismo de ancoragem nas extremidades e com seção transversal circular (fibras RI da Tabela 3.1) são produzidas do corte de fios de aço, com diâmetro (DF), variando entre 0.25 e 1.00 mm. As fibras lisas com seção retangular (fibras RII da Tabela 4.2) são produzidas do corte de chapas de aço ou do “achatamento” dos fios de aço e apresentam dimensão que variam entre $0.15 \leq e \leq 0.64$ mm e $0.25 \leq w \leq 2.03$ mm. Ainda segundo o ACI 544.1R-96, o comprimento das fibras abrange valores entre 6.4 e 76 mm (MORAES NETO, 2013).

4.6.3 COMPÓSITO ESTRUTURAL: CONCRETO COM FIBRAS

No que se refere à aplicação do CRF na construção civil, NAAMAN (2003) comenta, que apesar do desenvolvimento tecnológico recente, a essência do conceito vem sendo praticada aproximadamente desde os primórdios da evolução humana. BRESCANSIN (2003) relata que há 5000 anos havia a produção de postes de argilas reforçados com fibras de asbesto e que há 3500 anos os egípcios fabricavam tijolos de barro reforçados com fibras de palha e/ou capim. Além disto, também há evidências

que antigos construtores utilizavam crina de cavalo nas argamassas com a intenção de melhorar as propriedades da mistura (MOUSSA, 2017).

De acordo com LEVY NETO e PARDINI (2006), a característica básica dos compósitos estruturais é combinar a nível macroscópico pelo menos duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. Nestes materiais, a matriz, normalmente apresentada na forma de aglutinante, permite que os reforços, os quais frequentemente são oferecidos na forma filamentar, transfiram os esforços mecânicos entre si, trabalhando assim, ambos os materiais de forma integrada. Segundo HULL e CLYNE (1996), a origem desta classe de material remonta a milhares de anos, uma vez que as madeiras, os ossos e os tecidos musculares são exemplos notáveis dos chamados compósitos naturais (MORAES NETO, 2013).

CALISTER e RETHWISCH (2015) definem compósito como a combinação, a nível macroscópico, de duas, ou mais, fases com propriedades físicas e químicas distintas (material multifásico = matriz + reforço), planeando um composto resultante com propriedades mecânicas aprimoradas, comparativamente aos materiais constituintes. Extrapolando o conceito para o âmbito do concreto reforçado com fibras - CRF (composto resultante), a adição de fibras (reforço, com elevada capacidade de absorção de energia/deformação) à massa de concreto (matriz, material frágil) almeja aprimorar, entre outras propriedades, a ductilidade e a tenacidade deste concreto (MOUSSA, 2017).

4.6.4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

De acordo com o ACI 544.1R-96 (1996), define-se concreto reforçado com fibras de aço, CRFA, o concreto feito com cimento hidráulico contendo agregados finos, ou agregados finos e graúdos, e fibras discretas e descontínuas de aço, as quais apresentam tamanho apropriado para serem introduzidas ao concreto. As fibras de aço utilizadas como reforço apresentam uma ampla variação de formatos, dimensões e tipos de aço (MORAES NETO, 2013)

O ModelCode10 (2011) define CRFA o material formado a partir da mistura de uma matriz cimentícia com fibras discretas e descontínuas de aço. No que diz respeito ao preparo do CRFA, recomenda-se, para um estudo mais profundo, as pesquisas de BARROS (1995), BARROS (2000), FIGUEIREDO (2000), BOULEKBACHE et al. (2010) e ZĪLE e ZĪLE (2013). Entretanto, para o momento, apresentam-se as recomendações do ACI 544.4R-88, que são concisas e práticas, apropriadas para a proposta desse estudo. O referido documento relata que o preparo do CRFA pode ser realizado com equipamentos e procedimentos convencionais, desde que o consumo de fibra, C_f , seja limitado entre 0,5 % e 1,5 % do volume de concreto. Para quantidades maiores, o ACI 544.4R-88 sugere que o método de adicionar fibras à massa de concreto, assim como o procedimento de preparo do mesmo, ambos devem ser aprimorados. O ACI-544.3R-08 explica que para garantir a dispersão adequada das fibras e evitar a sua aglomeração, formação dos “ouriços”, ver Figura 4.11a, é recomendável adicionar as fibras em uma mistura fluída. A formação das aglomerações, na maioria das vezes, é consequência da adição indevida das fibras à mistura de concreto, pois uma vez lançadas aglomeradas ao misturador, possivelmente, permanecerão aglomeradas durante a fase de mistura dos materiais. Adicionalmente, o ACI-544.3R relata que a aglomeração acontece quando as fibras são lançadas apressadamente ao misturador, impossibilitando a homogeneidade adequada das fibras ao concreto. Ressalta-se que o impacto na homogeneização pode ser minimizado se fibras coladas em pentes forem utilizadas, ver Figura 4.11b. Nessas condições, quando os pentes são misturados ao concreto, tem a sua cola dissolvida, o que permite uma melhor trabalhabilidade do concreto.



a) Formação de Ouriços (preparo inadequado)



b) Fibras em pentes

Figura 4.11 - Aspectos sobre o concreto com fibras de aço (MOUSA, 2017)

No que diz respeito às fibras de aço, de acordo com NAAMAN (2003) e AMMAR ABID (2011), as fibras de aço utilizadas no concreto podem ser classificadas de diferentes maneiras, como segue. Quanto à origem, têm-se as fibras orgânicas (celulose, sisal, bambu, etc), inorgânicas naturais (asbestos) e fabricadas (aço, vidro, etc). Quanto às propriedades físicas e químicas, as fibras podem ser agrupadas, por exemplo, a partir da densidade, da capacidade reativa com o concreto, entre outras propriedades. Quanto às propriedades mecânicas, salienta-se a classificação quanto à resistência à tração, ao módulo de elasticidade, à ductilidade, à aderência, à deformação na ruptura e outras. Quanto à dimensão, as fibras podem ser identificadas a partir da seção transversal/diâmetro e do comprimento. As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam, respectivamente, exemplos de diferentes fibras quanto à seção transversal e quanto ao mecanismo de ancoragem. A NBR 15530 (2007) estipula limites para o fator de forma e para a resistência à tração das fibras, ver Tabela 4.2. Nes sa tabela, l_f representa o comprimento das fibras e d_f e w definem, nesta ordem, as fibras com seção transversal circular e retangular/semicircular. Adicionalmente, informa-se que o fator de forma é dado pela razão comprimento/diâmetro das fibras, l_f/d_f .

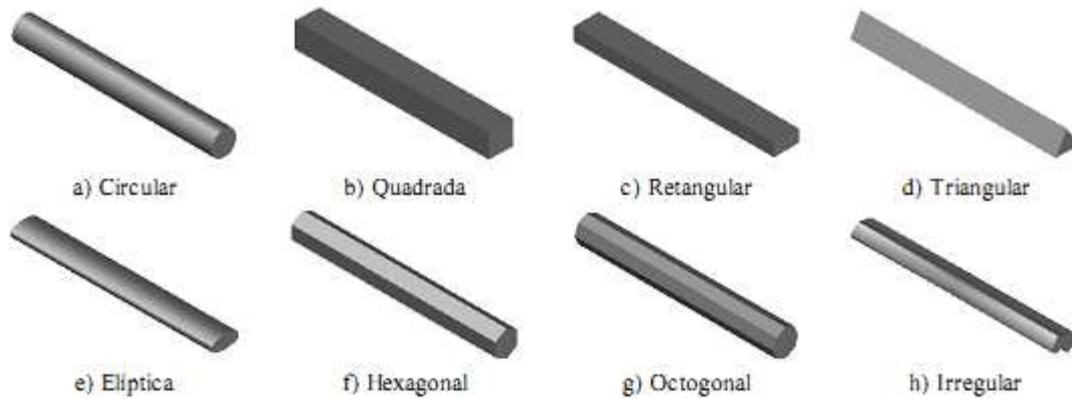


Figura 12 – Classificação das Fibras quanto à seção transversal (LOGFREN, 2005).

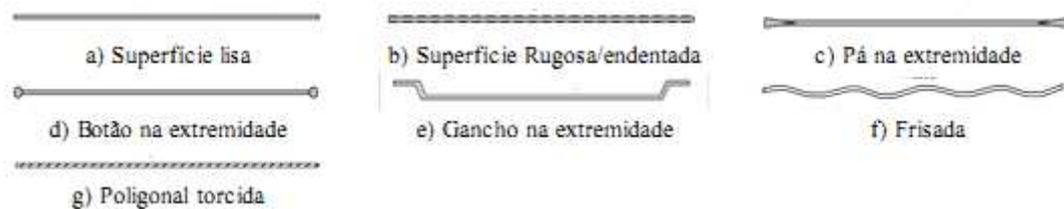


Figura 4.13 - - Classificação das fibras quanto ao mecanismo de ancoragem (GOMES, 2013)

Segundo NAAMAN (2003), apesar do desenvolvimento crescente do CRFA, poucas pesquisas foram realizadas almejando aprimorar a performance das fibras a partir da otimização da sua seção transversal. Neste sentido, o autor define o parâmetro FIER (FIER – Fiber Intrinsic Efficiency Ratio), que retrata a razão entre a área lateral e a área da seção transversal, como segue:

$$FIER = \frac{\mu_f \cdot L_f}{A_f} \quad \text{Eq. 4.1}$$

sendo μ_f o perímetro da seção transversal e A_f a área da seção transversal das fibras.

Nos estudos de Naaman é mostrado que o desempenho das fibras é proporcional ao parâmetro FIER, logo, quanto maior o valor desta grandeza, maior a performance do CRFA. Para exemplificar a ideia, na Figura 4.14 é mostrado o FIER relativo, $FIER_{rel}$, de diferentes seções transversais, tendo como referência a seção circular, $FIER_{rel} = 1,0$. Na Figura 4.14 b, tem-se uma seção transversal triangular, com área igual à seção circular e perímetro 28 % maior. Na Figura 4.14c, tem-se a proposta de NAAMAN (2003), com 45 % da área da seção circular e mesmo perímetro.

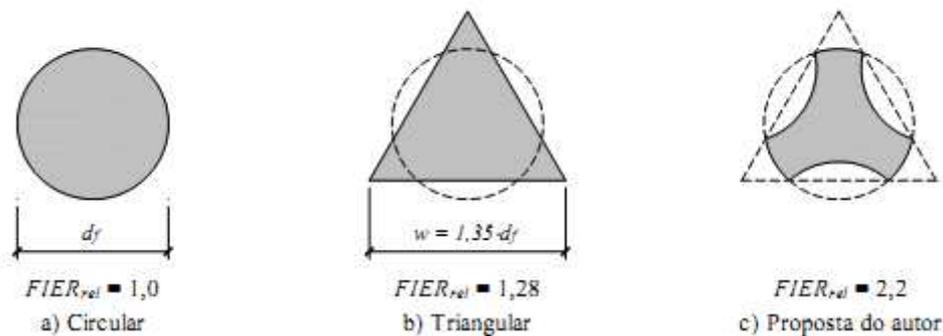
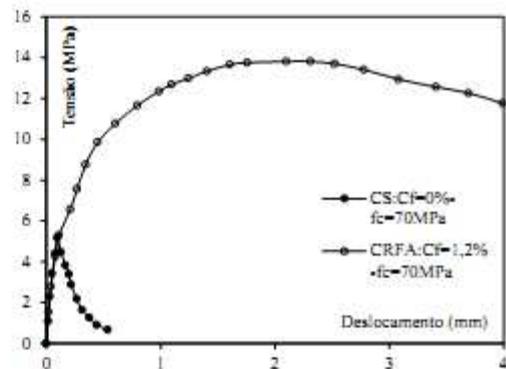


Figura 4.14 – Avaliação do $FIER_{rel}$ para diferentes seções (NAAMAN, 2003).

No que concerne à influência das fibras de aço no comportamento endurecido do CRFA, segundo o ACI 544.4R (1988), essas fibras, quando dosadas apropriadamente, garantem ao concreto maior ductilidade e tenacidade, a qual é consequência da capacidade de absorção de energia gerada pela transferência de tensões entre o concreto e as fibras durante o início e a estabilização do processo de fissuração. Para exemplificar essa discussão, apresenta-se a Figura 4.15b, a qual exibe o registro da relação tensão-deslocamento a partir do ensaio de flexão em três pontos em prismas entalhados (Figura 4.15a). A Figura 4.15b revela, de forma incontestável, a maior ductilidade e tenacidade do CRFA, comparativamente ao concreto simples (CS). Ressalta-se que a tenacidade é obtida em termos da energia de absorção, que, por sua vez, é determinada a partir da área sob a curva carga-deslocamento.



a) Ensaio de Flexão

b) Relação *tensão x deslocamento*Figura 4.15 - Análise da capacidade de absorção de energia do CRFA (BARROS *et al*, 2015)

4.7 EFEITO DE CISALHAMENTO

Uma viga resiste a cargas principalmente por meio de momentos internos, M e tesouras, V , como mostrado na Fig. 4.16. No projeto de um membro de concreto armado, a flexão é geralmente considerada primeiro, levando o tamanho da seção e o arranjo de reforço para fornecer a resistência necessária ao momento. Limites são colocados nas quantidades de reforço de flexão que pode ser usado para garantir que, se alguma falha ocorresse, ela se desenvolveria gradualmente.. Porque em uma tesoura a falha é freqüentemente repentina e quebradiça, como sugerido pelos danos sofridos pelo edifício na Fig. 4.17. O projeto para cisalhamento deve garantir que a resistência ao cisalhamento seja igual ou superior à resistência à flexão em todos os pontos da viga. A maneira pela qual as falhas de cisalhamento podem ocorrer varia muito com as dimensões, geometria, carregamento e propriedades dos membros. Por esse motivo, não há um caminho único para projetar o cisalhamento (MACGREGOR, 2009).

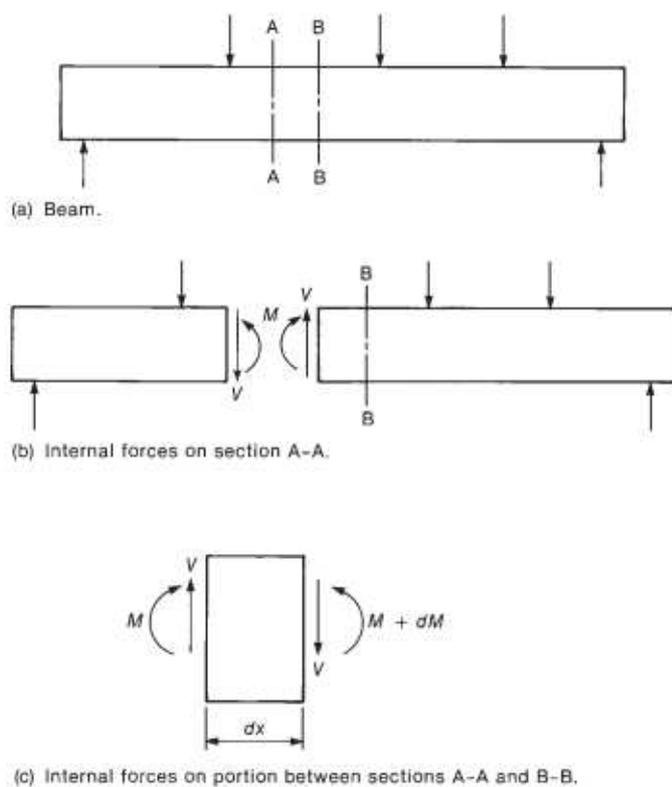


Figura 4.16 - Forças internas no Cisalhamento (MACGREGOR, 2009).



Figura 4.17 - Falha de cisalhamento: Depósito da Força Aérea dos EUA (MACGREGOR, 2009)

Segundo o ACI 544.1R-96, as fibras de aço, além de aumentarem a resistência do concreto ao cisalhamento, também apresentam potencial para substituir os estribos das vigas. A melhor performance do CRFA aos esforços de cisalhamento, na óptica do referido documento, advém da capacidade das fibras em conter a abertura das fissuras, em aumentar a capacidade portante do concreto à formação da primeira fissura e à carga de ruína e em aumentar a adesão friccional com a matriz de concreto. MADAN *et al.* (2007) e KWAK *et al.* (2002) relatam que a resistência ao cisalhamento melhora com o aumento da quantidade de fibras e com a diminuição da relação a/d , onde a e d representam, respectivamente, os valores do vão de cisalhamento e da altura útil da viga. Para GUSTAFSSON e NOGHABAI (1997), concretos contendo fibras curtas e longas contribuem melhor para a resistência do concreto ao cisalhamento. BARROS (1995) comenta que alguns resultados experimentais sugerem que a resistência ao cisalhamento aumenta com o fator de forma das fibras.

O ACI 544.1R-96 informa que dependendo das propriedades geométricas das fibras e da sua quantidade na massa de concreto, o aumento da resistência ao cisalhamento pode, inclusive, alterar o modo de ruína de frágil para dúctil. No que diz respeito às vigas de CRFA, BARROS (1995) relata que a alteração do modo de ruína depende também da taxa de armadura de flexão e do parâmetro a/d . Barros complementa a abordagem afirmando que para baixos valores de a/d a alteração no modo de ruína só acontece para quantidades elevadas de fibras na massa de concreto (MORAES NETO, 2013).

4.8 EFEITO ARCO

Com o surgimento da alvenaria estrutural e a construção de edifícios utilizando esta técnica, surgiu o problema da parede apoiada em vigas. Os estudos sobre o assunto, iniciados por R. H. Wood em 1952, mostraram que as paredes estruturais de alvenaria apoiadas em vigas atuam conjuntamente, quando a viga, ao ser solicitada pela parede, se deforma, provocando na região deformada um “descolamento” da parede. Isso faz com que a ação da parede sobre a viga, inicialmente uma carga uniformemente distribuída, passe a se concentrar próxima aos apoios, equacionada na forma de cargas triangulares ou parabólicas. A figura a seguir esquematiza de forma simples a ação do efeito arco (CARVALHO, 2007).

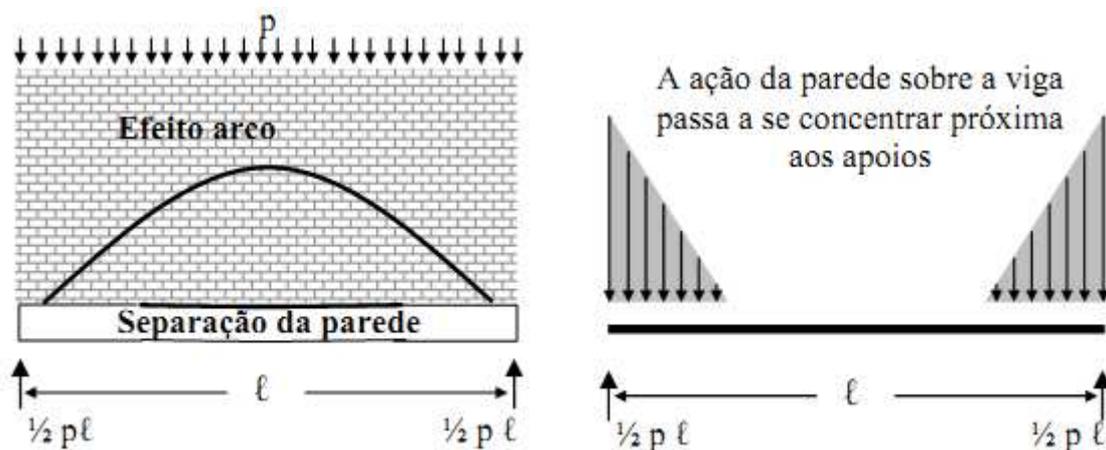


Figura 4.18 - - Efeito Arco nas paredes de Alvenaria (CARVALHO, 2007)

O efeito arco é relevante quando se analisa a interação entre a parede de alvenaria e sua estrutura de suporte. Interpreta-se que uma parede estrutural apoiada sobre uma viga em concreto armado comporta-se como um arco atirantado. O arco forma-se na parede e a viga funciona como tirante (Figura 4.19). Esse comportamento influencia a transferência da carga vertical da parede para seu elemento de apoio. Parte da carga antes localizada no centro da viga encaminha-se para a região dos apoios. Dessa forma, os esforços solicitantes da viga, em especial os momentos fletores, tendem a ser diminuídos, verificando-se por consequência concentrações de tensões nos extremos das paredes (PAES, 2008).

A interação entre paredes de alvenaria e estruturas de vigas sobre apoios discretos foi estudada em profundidade pela primeira vez por Wood (1952). Ele descreveu o sistema parede-viga como um arco atirantado, no qual a viga comporta-se como um tirante, e o arco forma-se na parede, tal como mostrado na Figura 4.19 (KLEINGESINDIS, 2014):

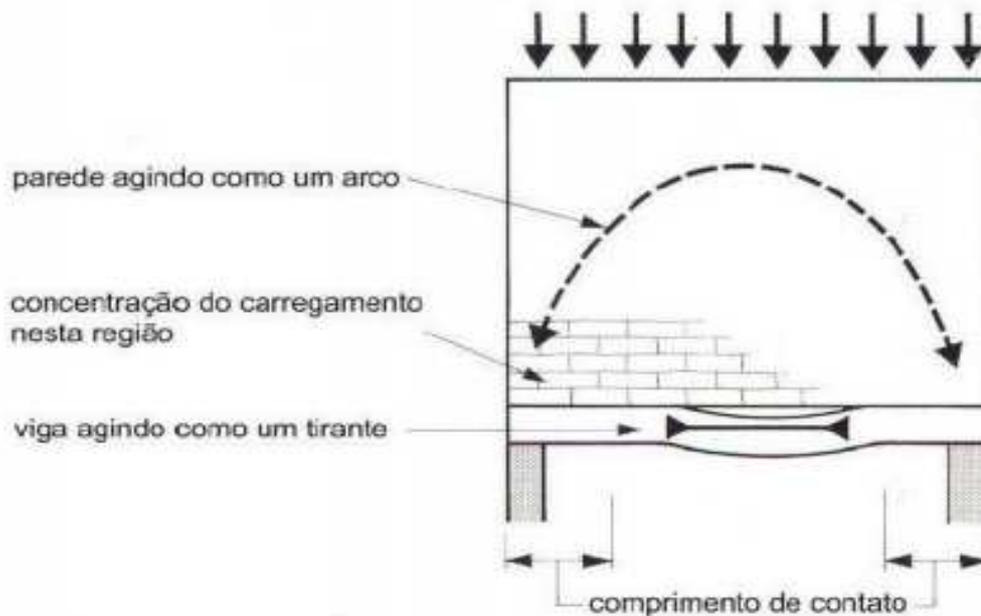


Figura 4.19 - – Sistema parede-viga como arco atirantado (PAES, 2008).

Em paredes de alvenaria apoiadas sobre apoios discretos, as cargas das paredes tendem a migrar diretamente para os apoios. É o conhecido efeito arco, mostrado na Figura 4.20, onde P é a carga total aplicada sobre a parede. Esse fenômeno contradiz a hipótese comumente adotada nos escritórios de projeto estrutural, de que as cargas das paredes chegam às vigas de suporte de forma uniformemente distribuída (KLEINGESINDIS, 2014).

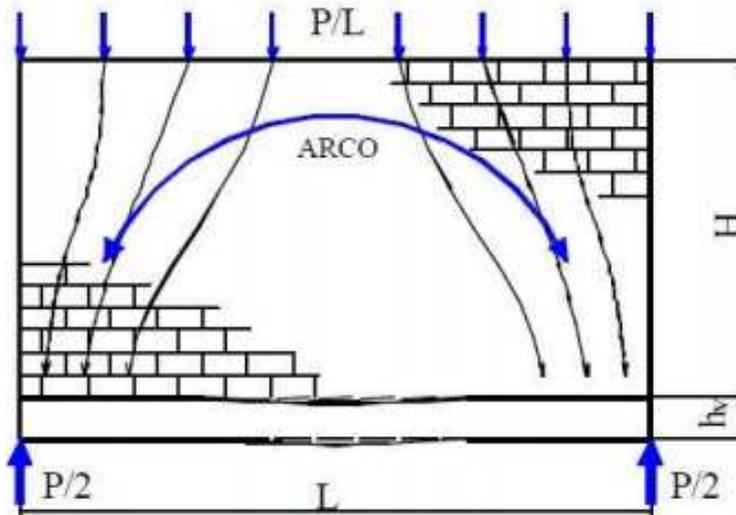


Figura 4.20 - Formação do arco em paredes sobre apoios discretos (BARBOSA, 2000).

Davies e Ahmed (1978) usam o modelo de um arco atirantado para simular a ação composta entre a parede e sua viga de apoio; o arco é formado pela parede e a viga atua como um tirante. Hendry *et al.* (1981) explicam o modelo mostrando que a máxima tensão vertical, ao longo da interface da parede-viga, acontece nos apoios e no meio do vão as tensões horizontais na viga podem ser tracionadas ao longo da altura, de forma que a viga atua como um tirante. Burhouse (1969) observa que a armadura atua como um tirante de um “arco” e sugere que toda a armadura deva ser levada aos apoios e o comprimento de ancoragem destas seja determinado com alguma folga (CARVALHO, 2007).

Ao se considerar a ação composta parede-viga, a ação da carga introduz deformações na viga devido à flexão desta; os apoios são parcialmente contidos horizontalmente de forma que a ação de arco ocorre na parede. O grau do arqueamento depende da rigidez relativa parede/viga, devendo também ser considerada a rigidez de flexão e a axial. Quanto mais rígida a viga, menor a sua deformação e maior será a área de contacto com a parede (CARVALHO, 2007).

Conforme Hendry (1981), as tensões verticais e cisalhantes na interface da parede-viga são concentradas na região dos apoios. As distribuições de tensões cisalhantes e verticais, nessas áreas, podem ser representadas de forma aproximada por um diagrama triangular. Quanto mais flexível a viga, mais as tensões se

concentram próximas dos apoios. Embora a força cisalhante tenda a contrariar a deformação descendente da viga, esta tende a se inclinar para baixo, afastando-se da parede, com o possível desenvolvimento de fissuras entre o topo da viga e a base da parede. A força cisalhante também induz uma tensão axial na viga, com magnitude variável ao longo do tramo. Na parede, é desenvolvida uma ação de arco e as tensões verticais se concentram próximas aos apoios (CARVALHO, 2007).

Ainda segundo o autor, para o desenvolvimento pleno da ação composta entre a parede e sua viga de apoio, há a necessidade de um vínculo suficiente entre a parede e a viga, para permitir o desenvolvimento das forças de cisalhamento exigidas. A resistência ao cisalhamento na interface parede/viga deve ser adequada, para transferir a tensão de cisalhamento horizontal induzida pela interface como resultado do efeito arco (CARVALHO, 2007).

Esse fenômeno foi observado inicialmente por Wood (1952), que o relacionou à relação altura da parede/vão, estabelecendo que para valores dessa relação inferiores a 0,6 o cisalhamento se torna maior que o suportável na interface da parede-viga. Burhouse (1969) realizou um estudo para investigar os efeitos da variação da relação altura/vão da parede, onde propõe, como forma de se evitar a ocorrência de deslizamento entre a parede e a viga, que não se façam mudanças na recomendação de Wood para que no projeto de ação composta aconteça:
 $H/L \geq 0,6$ (CARVALHO, 2007).

Embora a relação $H/L \geq 0,6$ para a ocorrência do efeito arco seja consensual entre os pesquisadores, Hendry (1981) observa que, embora a ação composta ainda seja possível, para valores inferiores a 0,6, o elemento deve eventualmente ser tratado como um elemento puramente de flexão. Em trabalho recente, JAGADISH e RAMACHANDRA (2000), adotam o valor 0,5 para a relação H/L (CARVALHO, 2007).

Uma ideia inicial a respeito das concentrações de carregamento sobre a viga de suporte é que tensões normais e de cisalhamento formam diagramas triangulares nas proximidades dos apoios discretos. Tanto tensões normais como cisalhantes tendem a zero no meio do vão. Tal ideia, ilustrada na Figura 4.21, é apresentada por Riddington e Stafford Smith (1977) e Hendry (1998) (KLEINGESINDIS, 2014).



Figura 4.21 – Tensões verticais e de cisalhamento na viga (SILVA, 2005).

Essa distribuição de carregamentos sobre as vigas provoca importantes mudanças nos diagramas de esforços das vigas, em relação a uma viga biapoiada clássica. Pode-se notar, nos diagramas de esforços da Figura 4.22, tanto o surgimento de esforços de tração na viga – dando sentido à hipótese do funcionamento como arco atirantado, como uma expressiva redução de momentos fletores no meio do vão, de forma coerente com o que haviam notado Wood (1952) e outros pesquisadores em seus trabalhos (KLEINGESINDIS, 2014).

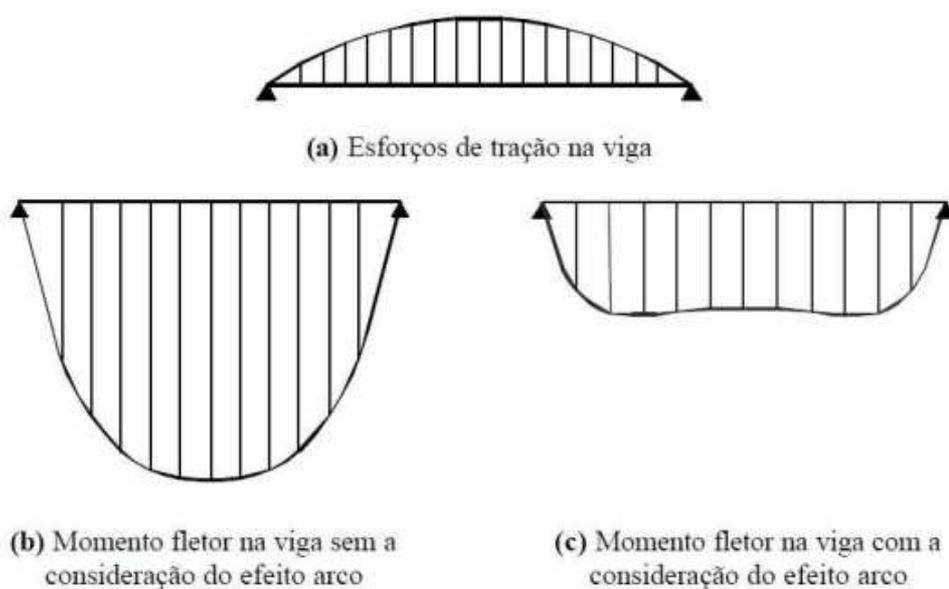


Figura 4.22 – Esforços em uma viga de um sistema parede-viga (BARBOSA, 2000).

Já o diagrama de tensões horizontais é praticamente idêntico ao de uma viga-parede comum, com uma região superior comprimida, e uma região inferior tracionada, como se vê na Figura 4.23. Barbosa (2000) observa que a linha neutra pode estar localizada tanto dentro da viga como na parte inferior da parede. No primeiro caso, as armaduras inferiores da viga encontram-se tracionadas, ao passo que as armaduras superiores encontram-se comprimidas. No segundo caso, tanto armaduras inferiores como superiores encontram-se tracionadas, bem como a base da parede.

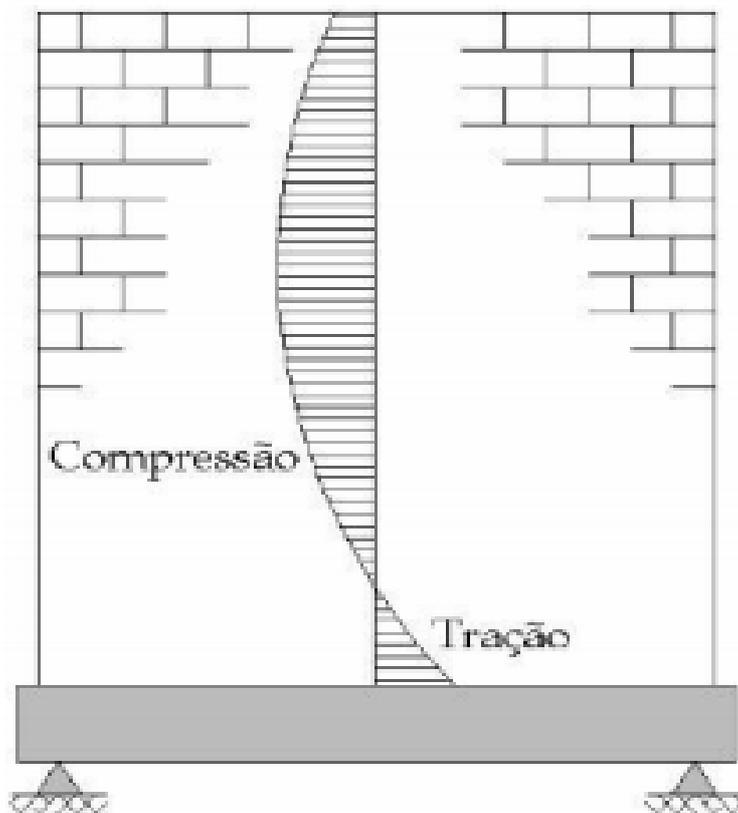


Figura 4.23 – Tensões horizontais no sistema parede-viga (SILVA, 2005).

4.9 MODELOS SIMPLIFICADOS USANDO RIGIDEZ RELATIVA

Riddington e Stafford Smith (1977) foram um dos primeiros a introduzir o conceito de rigidez relativa. Eles verificaram que a formação do arco era influenciada por características geométricas – vão entre apoios, inércia da viga de apoio e espessura da parede -, mas também por características físicas como o módulo de elasticidade dos materiais constituintes da parede – alvenaria – e da viga – concreto, na maioria dos casos.

Assim, eles propuseram uma relação a qual chamaram de rigidez relativa, expressa pelo parâmetro K:

$$K = \sqrt[4]{\frac{E_P \cdot t_P \cdot L^3}{E_V \cdot I_V}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde:

E_P Módulo de Elasticidade Longitudinal da Parede;

E_V Módulo de Elasticidade Longitudinal da Viga

I_V Inércia da viga de apoio

L Distância entre apoios

t_P Espessura da parede

O conceito de rigidez relativa também foi usado por Davies e Ahmed (1977). Eles substituíram a distância entre apoios L pela altura da parede H , criando o parâmetro de rigidez relativa R :

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_P \cdot t_P \cdot H^3}{E_V \cdot I_V}} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Como afirma Barbosa (2000), a rigidez relativa não possui um resultado exato, e o seu conceito é bem mais qualitativo do que quantitativo. Ambos os parâmetros – K e R – têm a função de fornecer informação sobre a distribuição de tensões e a configuração deformada do sistema parede-viga. Eles contemplam, no numerador da fração, variáveis ligadas à rigidez da parede de alvenaria, e, no denominador, variáveis que expressam a rigidez da viga de suporte (KLEINGESINDS, 2014).

Assim, quanto maior o valor do parâmetro de rigidez, menos rígida é a viga de suporte em relação à parede que suporta, e mais pronunciado é o efeito arco. Quanto

mais pronunciado é o efeito arco, maior é a concentração de tensões nas proximidades dos apoios, e maior é o alívio de momento fletor no meio do vão. Por outro lado, quanto menor o valor da rigidez relativa, mais rígida é a viga em relação à parede, e a importância do efeito arco diminui. Neste caso, as alterações causadas pelo efeito arco perdem importância: as concentrações de tensões nos arredores dos apoios são menos pronunciadas, e o alívio de momento fletor no meio do vão é menos relevante.

Riddington e Stafford Smith (1977), e Davies e Ahmed (1977) propuseram métodos analíticos simplificados para consideração do efeito arco no cálculo de tensões normais, tensões cisalhantes, momentos fletores nas vigas de apoio e deslocamentos. Tomazela (1995) e Barbosa (2000) apresentaram esses métodos de maneira detalhada, com aplicações reais de cada um deles e comparações com resultados experimentais e análises numéricas, chegando a alguns resultados bastante discrepantes entre métodos simplificados e modelagens numéricas (KLEINGESINDS, 2014).

É preciso lembrar que os métodos simplificados mencionados foram desenvolvidos a partir de ensaios e simulações numéricas que normalmente contemplavam uma única parede suportada por uma viga biapoiada. Sabe-se que, na maioria dos casos reais em projetos de edifícios, essa situação nem sempre acontece, sendo mais comuns as vigas contínuas. Assim, Barbosa (2000) e Silva (2005) não recomendam o emprego de modelos simplificados para a determinação dos esforços e tensões. Ambos recomendam o emprego de simulações numéricas como procedimento fundamental ao considerar o efeito arco em projetos de edifícios.

Outra questão de grande importância na análise do efeito arco é a identificação dos trechos em que se formam os arcos. A princípio, poderia se imaginar que, na medida em que aumenta a altura de uma parede, modifica-se o arco formado pela interação da parede com a viga que a apoia. No entanto, Silva (2005) escreve que isso não ocorre: a partir de uma determinada altura de parede, o arco formado tem uma configuração praticamente constante (KLEINGESINDS, 2014).

Hendry, Sinha e Davies (1997) endossam essa opinião, ao escreverem que a interação entre parede e viga só acontece se houver ligação suficiente entre esses elementos, de maneira que as forças de cisalhamento necessárias possam se

desenvolver. Eles afirmam que as forças de atrito necessárias para fornecer essa ligação cisalhante desenvolvem-se para sistemas com relação H/L superior a 0,6 (KLEINGESINDS, 2014).

Riddington e Stafford Smith (1977) afirmam que, para uma razão entre altura da parede e vão da viga de apoio superior a 0,7, a porção de parede situada acima de $0,7L$ não traz nenhum impacto para a formação do arco. Ela representa apenas um acréscimo de carga, conforme mostra a Figura 4.25. Ainda que Riddington e Stafford Smith (1978) tenham retomado a sugestão de Wood (1952) – ou seja, $H/L > 0,6$ –, Tomazela (1995) demonstrou que a relação $H/L > 0,7$ é bastante adequada. Essa hipótese foi utilizada nos trabalhos de Barbosa (2000), Silva (2005) e Paes (2008).

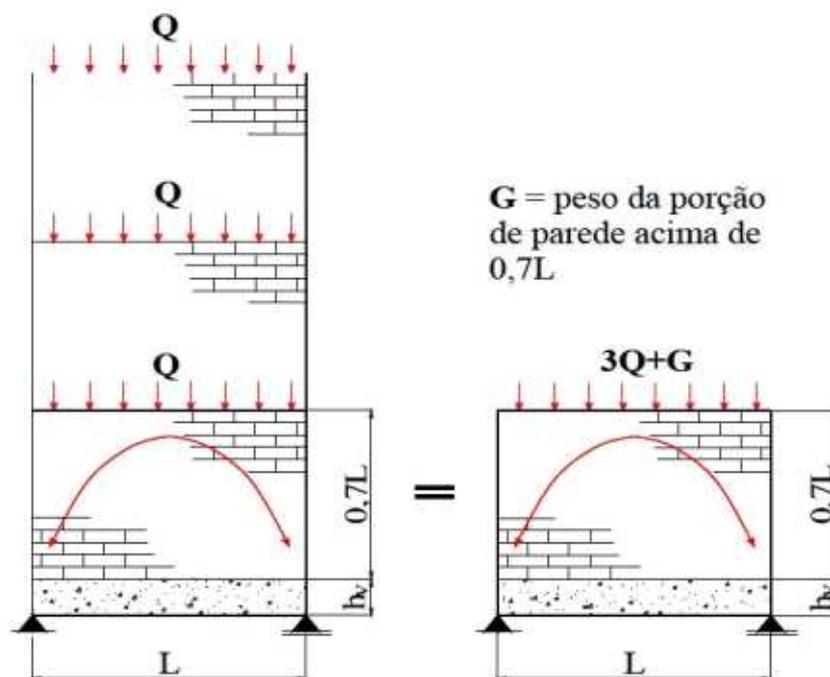


Figura 4.24 – Sistemas Parede-Viga com carregamento equivalente (PAES, 2008).

De acordo com Haseltine e Moore (1981), existem três condições principais para se determinar a capacidade da alvenaria de formar um arco. A primeira é que a razão entre a altura e o comprimento da parede seja maior que 0,6. A segunda é que as aberturas não estejam localizadas na região do arco imaginário, geralmente definida por dois arcos com centro no meio da viga de comprimento L e raios $0,25.L$ e $0,60.L$ (Figura 4.26). A terceira é que a tensão majorada imposta pela ação do arco não exceda a capacidade de compressão local da alvenaria.

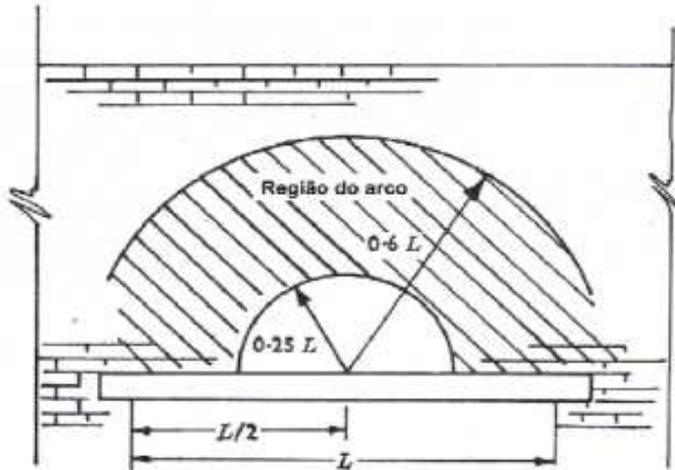


Figura 4.25 – Região de formação do arco (RIDDINGTON; STAFFORD SMITH, 1978).

4.9 EFEITO ARCO EM VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS

4.9.1 KIM *et al* (1999)

Neste trabalho desenvolveu-se uma expressão para estimar resistência ao cisalhamento em vigas de concreto reforçado, derivada da relação entre o cisalhamento e a taxa do momento fletor ao longo da viga, juntamente com os resultados experimentais do efeito de arco. Oito vigas de concreto reforçado simples sem reforço de armadura foram testadas estatisticamente até a ruína no intuito de investigar quantitativamente o efeito arco. As variáveis incluíram 04 relações vão de cisalhamento/profundidade (2, 2,5, 3 e 4) e a relação de aço longitudinal (1% e 2%). Baseado nos resultados experimentais, uma equação é proposta no intuito de estimar o momento interno do braço de alavanca, o que leva a uma equação de resistência ao cisalhamento que combina o efeito de viga e efeito de arco.

Os valores obtidos da equação resultante são comparados com os resultados experimentais e posteriormente com os valores obtidos nas equações propostas pelo ACI 318 e pela equação de Zsutty.

$$v_c = \left(1.9 \sqrt{f'_c} + 2500 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) \text{ (psi)} \quad \text{for } \frac{l_n}{d} \geq 5.0$$

Eq.4.4

Equação 4.6.1 – Equação para estimar a resistência ao cisalhamento (fissuras inclinadas) para relação $a/d \geq 5$ (ACI 318, 1996).

$$v_c = \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \times \text{Eq. (1)} \text{ (psi)} \quad \text{for } \frac{l_n}{d} < 5.0$$

Eq. 4.5

Equação 4.6.2 – Equação para estimar a resistência ao cisalhamento (fissuras inclinadas) para relação $a/d < 5$ (ACI 318, 1996).

$$v_u = 60 [f'_c \rho (d/a)]^{1/3} \text{ (psi)} \quad \text{for } a/d \geq 2.5$$

Eq. 4.6.

Equação 4.6.3 – Equação para estimar a resistência (última) ao cisalhamento para relação $a/d \geq 2,5$ (ACI 318, 1996).

$$v_u = \left(\frac{2.5}{a/d} \right) \times \text{Eq. (3)} \text{ (psi)} \quad \text{for } a/d < 2.5$$

Eq. 4.7

Equação 4.6.4 – Equação para estimar a resistência (última) ao cisalhamento para relação $a/d < 2,5$ (ACI 318, 1996).

O programa experimental consistiu no ensaio de 8 vigas retangulares (100x300x1000mm) de concreto reforçado, submetidas a 2 pontos de carregamento, localizados simetricamente a 30cm do centro do vão. As principais variáveis foram a relação vão de cisalhamento e profundidade (a/d) e taxa de aço (ρ).

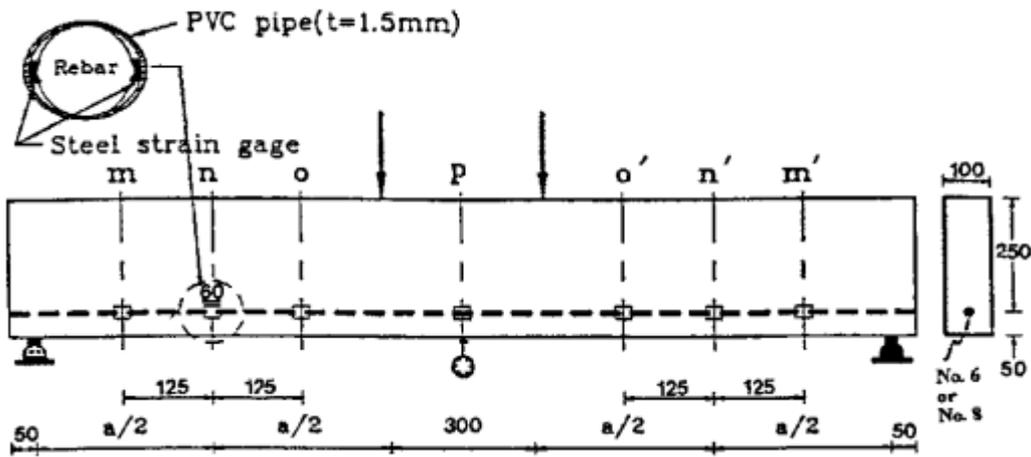


Figura 26 – Detalhes do ensaio nas amostras

Beam	a/d	ρ , percent	b , mm	d , mm	h , mm	A_s , mm ²	f'_c , MPa	f'_s , MPa	f_y , MPa	Shear strength, kN	
										Cracking	Ultimate
2P1	2.0	1.08	100	250	300	268.8	19.6	1.9	443	47.9	112.2
2.5P1	2.5	1.08	100	250	300	268.8	19.6	1.9	443	50.1	68.4
3P1	3.0	1.08	100	250	300	268.8	19.6	1.9	443	39.7	55.4
4P1	4.0	1.08	100	250	300	268.8	19.6	1.9	443	55.1	55.1
2P2	2.0	1.94	100	250	300	483.1	19.6	1.9	363	55.2	79.8
2.5P2	2.5	1.94	100	250	300	483.1	19.6	1.9	363	49.7	93.5
3P2	3.0	1.94	100	250	300	483.1	19.6	1.9	363	48.2	62.3
4P2	4.0	1.94	100	250	300	483.1	19.6	1.9	363	52.0	63.5

Note: Each specimen designated by number. First number denotes shear span-to-depth ratio a/d , and number following P denotes steel ratio ρ .

Tabela 4.4 - - Detalhes das amostras da viga e os resultados obtidos

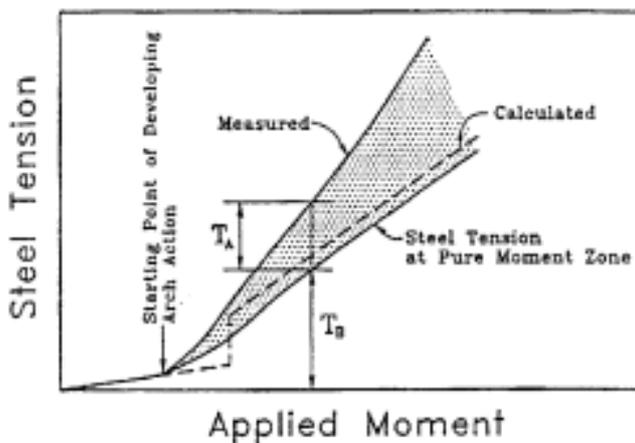


Figura 4.27 – Tensão do aço composta pela ação da viga e efeito arco

Baseado na figura 4.29, estima-se a tensão do aço T_m no que o vão de cisalhamento pode ser decomposta na seguinte equação:

$$T_m = T_B + T_A \quad \text{Eq. 4.8}$$

Onde:

T_A = Tensão do aço devido o efeito de arco

T_B = Tensão do aço devido ao efeito de viga

Posteriormente elaborou-se um modelo de Efeito de Arco para o ensaio e relacionou-se a relação T_A/T_B com a/d .

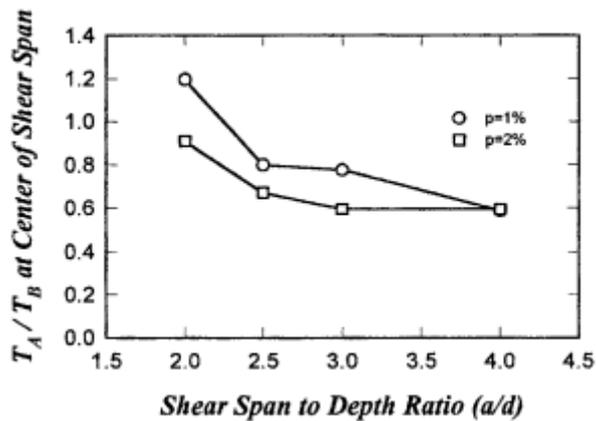


Figura 4.28 - T_A/T_B no centro do vão de cisalhamento

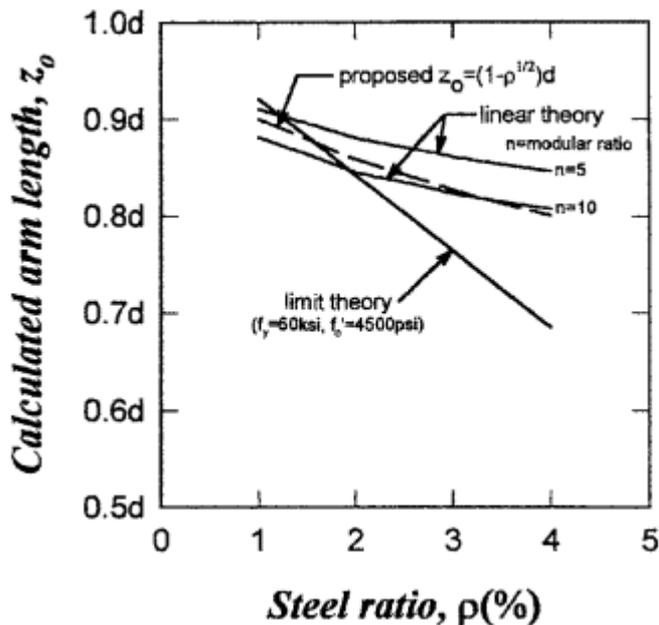


Figura 29 – Variação do momento interno do comprimento do braço

Posteriormente determinou-se uma equação para estimar a contribuição da ação da viga para o cisalhamento:

$$V_1 = k_2(1 - \sqrt{\rho})(f'_c)^{0.5}\left(\frac{d}{a}\right)^r bd$$

Eq. 4.9

Após esta etapa, determinou-se uma equação para estimar a contribuição do efeito arco para o cisalhamento:

$$V_2 = k_3\rho(1 - \sqrt{\rho})r\left(\frac{d}{a}\right)^r bd = k_3\rho^{0.9}(1 - \sqrt{\rho})\left(\frac{d}{a}\right)^{r+0.6} bd$$

Eq.4.10

Somando-se as equações 4.6.6 e 4.6.7, resulta na equação que define a resistência última ao cisalhamento:

$$v_u = \frac{V_u}{bd} = 0.2(1 - \sqrt{\rho})\left(\frac{d}{a}\right)^r \left[(f'_c)^{0.5} + 1020\rho^{0.9}\left(\frac{d}{a}\right)^{0.6} \right]$$

Eq. 4.11

<i>a/d</i>	No. of data	Standard deviation of $\frac{\text{measured } v_u}{\text{calculated } v_u}$		
		Eq. (21)	ACI	Zsutty
<i>a/d</i> < 2.5	133	0.321	0.606	0.399
<i>a/d</i> ≥ 2.5	418	0.193	0.315	0.187
Overall <i>a/d</i>	551	0.246	0.445	0.276

Tabela 4.5 - Comparação estatística da equação 4.6.8 às equações do ACI CODE e de Zsutty.

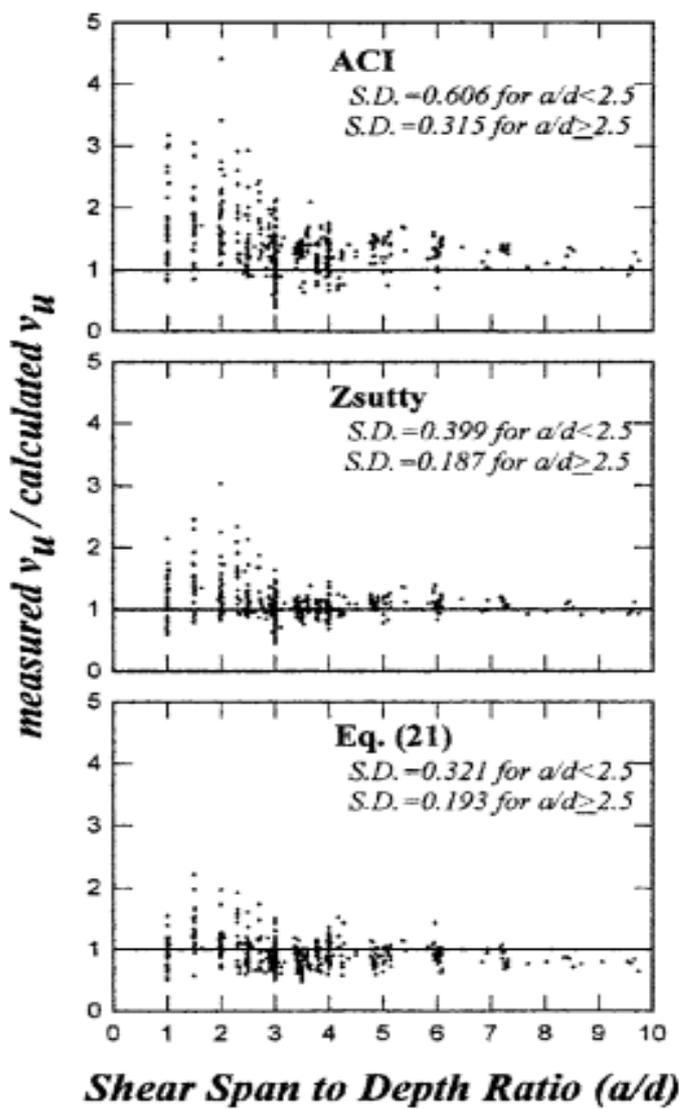


Figura 4.30 – Comparação das diversas equações com a respectiva relação a/d .

4.6.2 HAMAHARA *et al* (2001)

Neste estudo foram conduzidos ensaios em 04 vigas curtas de concreto reforçado no intuito de avaliar o mecanismo de transferência do cisalhamento devido o efeito arco. As variáveis do ensaio foram a quantidade de reforço de armadura e a performance de ligação do reforço longitudinal (com e sem ligação).

Muitos pesquisadores aceitam a hipótese que o modelo de arco pode ser aplicado se o reforço longitudinal não é ligado no concreto ao redor ou em vigas pequenas (curtas). Como consequência, pequenas vigas sem ligação são aplicadas no intuito de investigar-se o mecanismo de transferência de cisalhamento no efeito arco.

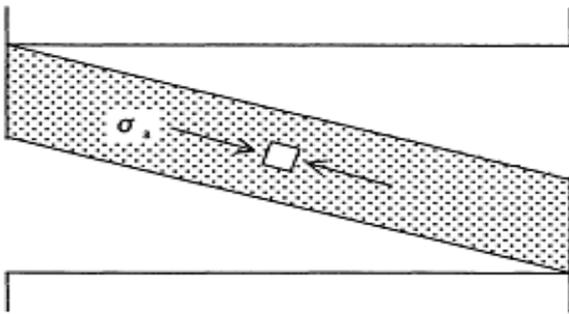


Figura 4.31 – Mecanismo de arco

Specimens	Concrete		Stirrup				Longitudinal reinforcement**	
	f_c' (N/mm ²)	$E \times 10^4$ (N/mm ²)	ρ_w^* (%)	dia (mm)	spacing (mm)	f_y (N/mm ²)		$E \times 10^5$ (N/mm ²)
PW00-B	31.5	3.09	0	-----	-----	-----	-----	bond
PW00-NB	34.7	3.00	0	-----	-----	-----	-----	no bond
PW04-B	27.8	3.01	0.4	D6	75	319	1.80	bond
PW04-NB	32.9	2.90	0.4	D6	75	319	1.80	no bond

$$\rho_w^* = a_w / (b \times x)$$

Tabela 4.6 - Perfis das vigas de ensaio

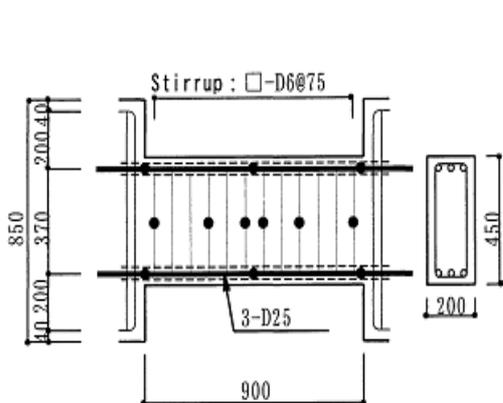


Figura 4.32 - Detalhe do teste na viga

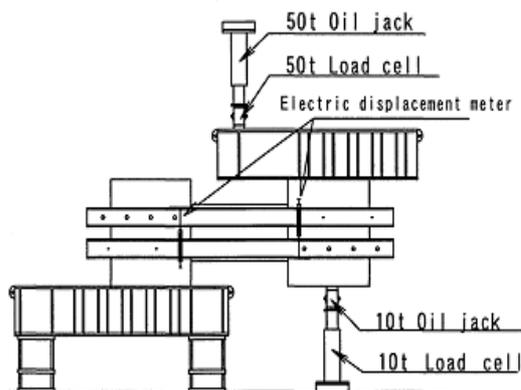


Figura 33 - Sistema de carregamento

Como resultado obteve-se que todas as vigas de teste falharam devido a formação de fissuras diagonais ao longo das linhas de conexão juntamente com as fibras de compressão nas seções críticas de flexão.

Na tabela 4.6.3 verifica-se os resultados obtidos no ensaio e na figura 4.35 os modos de ruptura:

Specimens	V_{cr} (kN)	V_{max} (kN)	R_{max} (%)	Mode of failure
PW00-B	96.50	274.5	1.882	B-DT
PW00-NB	44.33	300.0	1.451	C-DT
PW04-B	88.26	374.9	0.834	B-DT
PW04-NB	66.96	332.6	2.290	C-DT

V_{cr} : shear force at flexural cracking V_{max} : ultimate shear force

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio

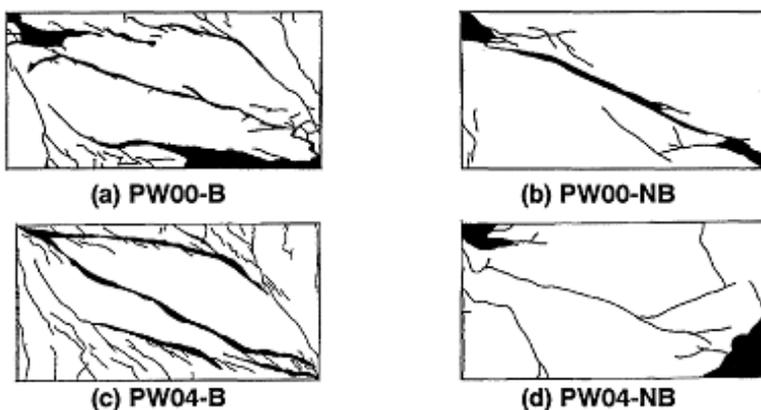


Figura 4.34 – Modos de ruína

A figura 4.36 mostra a relação entre o ângulo de rotação e a taxa de deformação devido à flexão e a deformação total em cada viga ensaiada. A deformação devida a flexão é derivada do Teorema de Mohr e a deformação devida ao cisalhamento é considerada como a diferença entre a deformação total e a deformação por flexão.

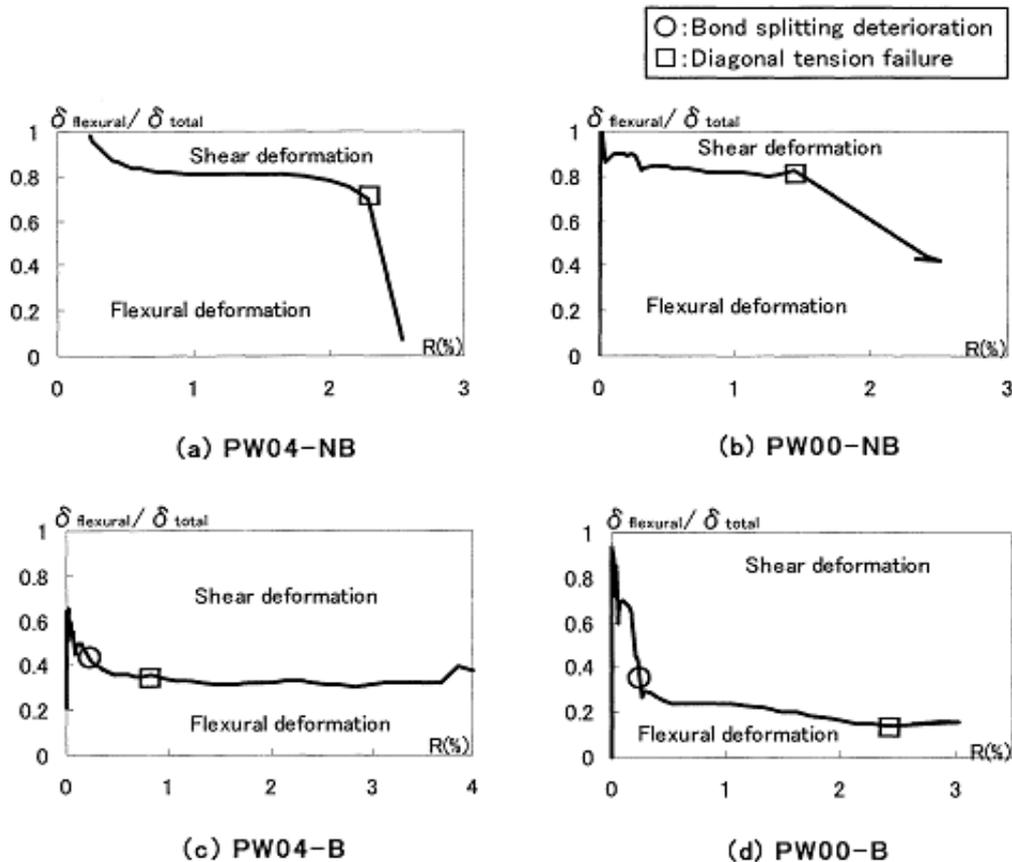


Figura 35 – Relação entre rotação do ângulo e a taxa de deformação por flexão

Desta forma todas as vigas utilizadas no ensaio ruíram quando ocorreu o aparecimento de fissuras diagonais as quais desenvolveram-se ao longo das linhas de conexão e fibras de compressão nas seções críticas de flexão.

A taxa de deformação por flexão nas vigas no teste sem ligação foi maior que 80% até a tensão diagonal de ruína ocorra, o que é considerada alta se comparada com as vigas teste com ligação.

4.6.3 JEON *et al* (2013)

No presente trabalho, um modelo comportamental é proposto para o estudo das contribuições individuais para a capacidade de cisalhamento em elementos de concreto reforçado. Com base na relação entre o cisalhamento e o momento fletor ($V = dM / dx$) nas vigas submetidas às cargas combinadas de cisalhamento e momento, o mecanismo de cisalhamento é explicitamente desacoplado em 02 componentes básicos: a ação da viga e no efeito arco. Então, o comportamento geral de uma viga é explicada em termos da combinação desses dois componentes básicos. A condição de compatibilidade entre as deformações associadas às duas ações é formulada utilizando a idealização da treliça junto com algumas aproximações. A partir dessa condição de compatibilidade, a proporção da contribuição de cisalhamento pela ação do efeito arco é determinada. O desempenho do modelo é examinado por uma comparação com os dados experimentais em literaturas. Os resultados mostram que o modelo proposto pode explicar o comportamento da viga ao cisalhamento de forma consistente com um significado físico claro.

Model	Resistant components				Responses		
	V_c			$V_s (=V_2)$	θ	f_v stirrup stress	ΔT tension shift
	$V_{uc} (=V_a)$	V_{ei}	V_d				
Classical truss model	X	X	X	○	45°	$\frac{1}{\rho_s b_w z_d} (V)$	$1/2(V)$
Standard truss model type (a)	X	X	X	○	Variable	$\frac{\tan \theta}{\rho_s b_w z_d} (V)$	$1/2(V) \cot \theta$
Modified truss model							
ACI	○ Lump sum V_c (fixed)			○	45°	$\frac{1}{\rho_s b_w z_d} (V - V_c)$	$1/2(V - V_c)$
EC-2	○ Lump sum V_c (fixed)			○	Variable	$\frac{\tan \theta}{\rho_s b_w z_d} (V - V_c)$	$1/2(V - V_c) \cot \theta$
AASHTO LRFD	X	○ (variable)	X	○	Variable	$\frac{\tan \theta}{\rho_s b_w z_d} (V - V_{ei})$	$1/2(V - V_{ei}) \cot \theta$
Complex truss model							
Type (b)	○	X or ○	X	○	Irregular variable	Undefined	Undefined
Type (c)	○	X or ○	X	○	Irregular variable	Undefined	Undefined
Type (d)	○	X or ○	X	○	Irregular variable	Undefined	Undefined

Tabela 4.8 - Componentes de resistência de diversos modelos de treliça

Assim sendo o presente trabalho pretende formular numericamente um modelo

de treliça com uma corda de compressão inclinada mostrado na figura 4.37 decompondo no arco amarrado e na viga.

O conceito de base teórica para a presente abordagem baseia-se na relação entre o momento de cisalhamento e de flexão numa viga de concreto armado fissurado, isto é, $V = dM / dx$. Utilizando algumas idealizações em conjunto com as recentes elaborações de Collins e Mitchell (1991) e Hsu (1993), uma condição de compatibilidade grosseira é estabelecida e formulada entre a deformação associada ao arco amarrado e a deformação com a armadura. Desse modo, o mecanismo resistente ao cisalhamento da viga é separado nos componentes da base. O desempenho da presente abordagem é examinado brevemente por uma comparação com os dados experimentais existentes e um estudo de sensibilidade. Mostra-se também que os resultados teóricos podem explicar de maneira rigorosa e consistente o comportamento experimentalmente observado do feixe que falha em cisalhamento.

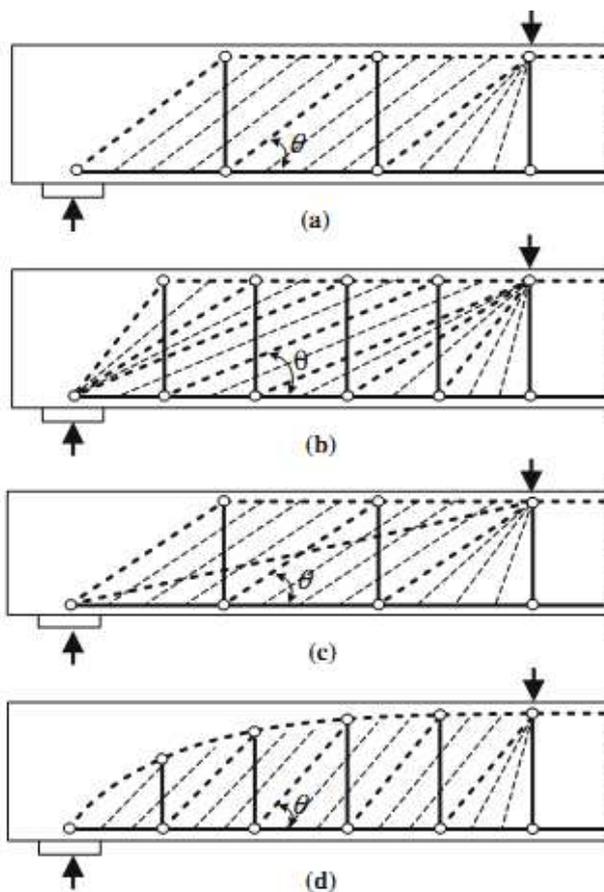


Figura 4.36 – Idealização refinada da treliça com uma corda de compressão inclinada: a) Modelo de treliça padrão; b) Treliça tipo Fan (Marti, 1985); c) Modelo de treliça combinada com Strut-Tie (Walraven & Niwa); d) Modelo refinado de treliça (Leonhardt, 1965)

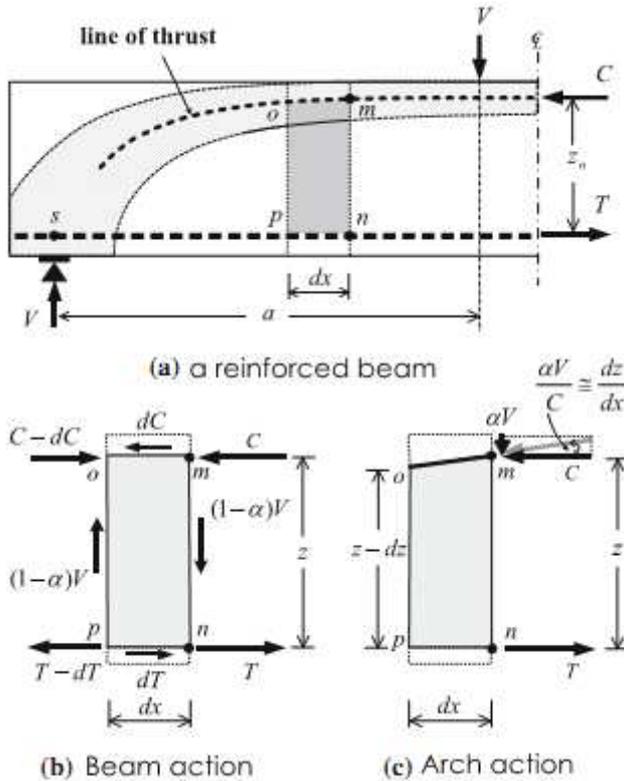


Figura 4.37 – Interpretação mecânica dos componentes resistentes ao cisalhamento: a) Viga de concreto reforçado; b) Ação da viga para $z dT/dx$; c) Efeito arco para $C dz/dx$.

Se tal comportamento de cisalhamento da viga puder ser desacoplado nos componentes da base, o mecanismo resistente ao cisalhamento seria muito claramente descrito. Assim, para o objetivo do presente estudo, é empregar um fator α definido a seguir (Kim e Jeong 2011a, 2011b, 2011c):

$$\alpha = \frac{\text{cisalhamento resistido pelo efeito arco}}{\text{cisalhamento total}}$$

Eq.4.6.9

Após uma série de equações são formuladas e utilizadas para a obtenção da resistência última ao cisalhamento V_u , mostrada na equação 4.6.10:

$$V_{u,y} = \frac{1}{1 - \alpha_u} \left(V_{ci} + A_s f_{vy} \frac{z}{s} \cot \theta_x \right) \leq V_{uf}$$

Eq. 4.6.10

Assim sendo obteve-se os valores de resistência ao cisalhamento último fez-se a

comparação com os valores estimados, mostrado na figura 4.40:

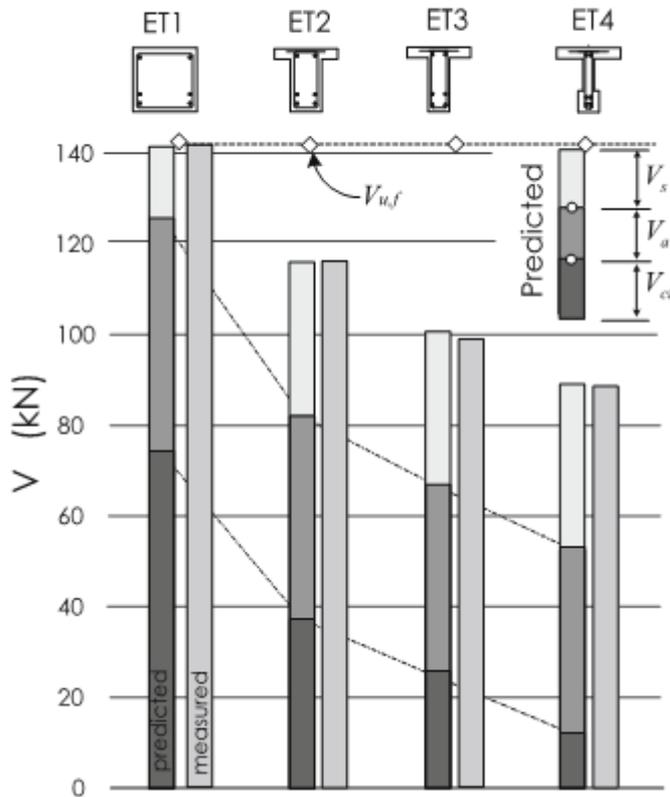


Figura 4.38 – Comparação entre os valores da resistência última ao cisalhamento estimados com os mensurados

Com base na relação entre o cisalhamento e a taxa de mudança no momento fletor ($V = dM / dx = zdT / dx + Tdz / dx$) em vigas de concreto armado submetidas a cisalhamento e flexão, um modelo comportamental foi proposto no presente trabalho. . No modelo, a taxa da mudança no braço de alavanca (dz / dx) é contabilizada, de modo que o mecanismo de resistência ao cisalhamento foi separado em dois componentes de base - a ação do arco e a ação do feixe. A relação (denotada por fator α) de contribuição à resistência ao cisalhamento pelo efeito arco amarrado em um feixe é numericamente derivada da compatibilidade grosseira das deformações associadas às ações de base. Então, o comportamento real de feixes críticos de cisalhamento é formulado por meio da interpolação entre a abordagem seccional e a abordagem de arco amarrado usando o valor do fator α . A adequação da nova abordagem foi examinada brevemente por alguns resultados de testes em literaturas,

e os resultados mostram uma excelente concordância entre o previsto e o medido. A partir do presente estudo, pode-se concluir que o fator- α parece ser o parâmetro mais crucial para a compreensão do comportamento de elementos de concreto armado de cisalhamento crítico.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental em que basea-se este trabalho consiste na avaliação do efeito de arco em vigas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), no que tange à ação do cisalhamento, objetivando-se avaliar a eficácia da utilização de fibras de aço como elemento de reforço de vigas. Desta forma esta seção é dedicada à apresentação da abordagem experimental, discutindo-se as propriedades das vigas à serem ensaiadas, a caracterização dos materiais, o plano de instrumentação e o detalhamento do sistema de ensaio.

5.1 – CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

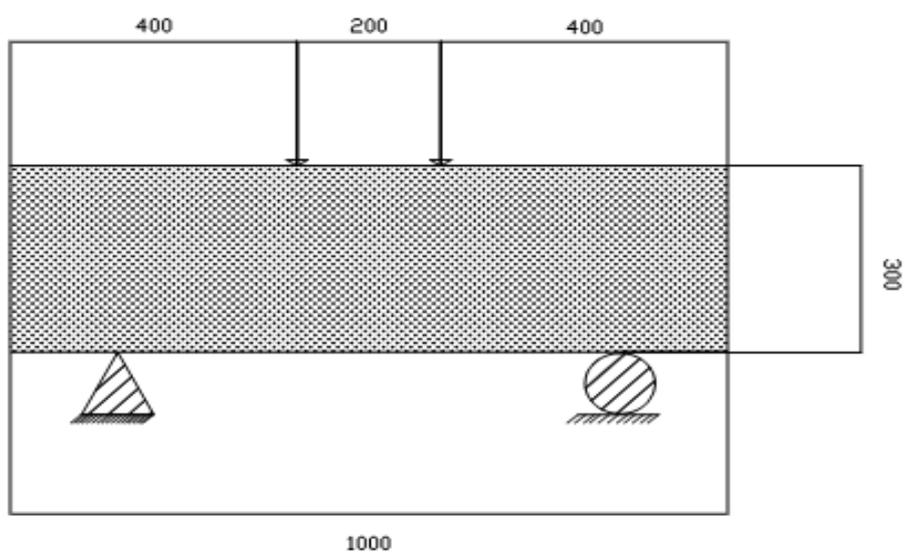
O programa experimental é formado por 16 vigas com dimensões $150 \times 300 \times 1000 \text{ mm}^3$, onde as variáveis experimentais de análise consistirão em consumo de fibras ($C_f = 0,8, 1, 1,2$ e $1,4\%$ em volume) e classe de resistência do concreto C30 ($f_c = 30 \text{ MPa}$), C40 ($f_c = 40 \text{ MPa}$), C50 ($f_c = 50 \text{ MPa}$) e C60 ($f_c = 60 \text{ MPa}$) aos 28 dias de idade. Para analisar os efeitos de reforço das fibras no concreto pretende-se adotar os valores preconizados no ModelCode 10 (2013).

Para o presente momento, ainda não definiu-se qual o tipo e geometria das fibras de aço a serem utilizadas nos ensaios.

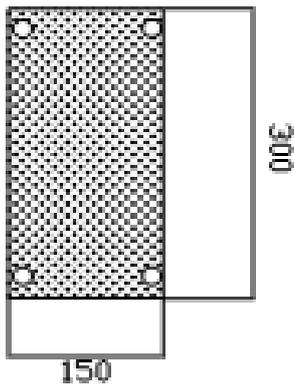
VIGAS	b-h (mm ²)	d (mm)	f_c (MPa)	C_f (%)
V30_08			30	0,8
V30_1			30	1
V30_1,2			30	1,2
V30_1,4			30	1,4
V40_0,8			40	0,8
V40_1			40	1
V40_1,2			40	1,2
V40_1,4			40	1,4
V50_0,8	150-300	À definir	50	0,8
V50_1			50	1
V50_1,2			50	1,2
V50_1,4			50	1,4
V60_0,8			60	0,8
V60_1			60	1
V60_1,2			60	1,2
V60_1,4			60	1,4

*b-h = largura-altura da viga

Tabela Tabela 5.1 – Propriedade das vigas



a) Vista Longitudinal (dimensões em mm)



b) Seção Transversal (dimensões em mm)

Figura 5.1 – Detalhes das vigas de ensaio

Pretende-se submeter as vigas confeccionadas em CRFA a um ensaio de carregamento ao cisalhamento, objetivando-se analisar em quais condições de ensaio e projeto (consumo de fibras e resistência do concreto) as mesmas o efeito de arco é mais acentuada, em quais condições de caracterização (C_f e f_c) de materiais e obtêm-se os melhores resultados no que concerne a resistência ao cisalhamento

Posteriormente pretende-se realizar a criação de um banco de dados com os valores obtidos no ensaio e na literatura técnica especializada e realizar um estudo estatístico no que concerne aos critérios de segurança (COLLINS).

Como última etapa pretende-se estimar a resistência última do CRFA e se esta estimativa está em consonância com os valores experimentais e os obtidos na literatura.

5.2 – SISTEMA DE ENSAIO

Nesse aspecto, as condições de apoio das vigas foram garantidas por roletes de aço, como mostra a Figura 5.2a. A aplicação das cargas se dará a partir de um cilindro hidráulico da marca ENERPAC, com capacidade de 103 kN e precisão de 1 kN, Figura 5.2b. O monitoramento das cargas será realizado por uma célula de carga da marca ENARPAC, modelo RCH, com precisão de 0,5 kN e capacidade de 103 kN, Figura 5.2b. Por fim, a idealização do sistema de ensaio é apresentada na Figura 5.2c.

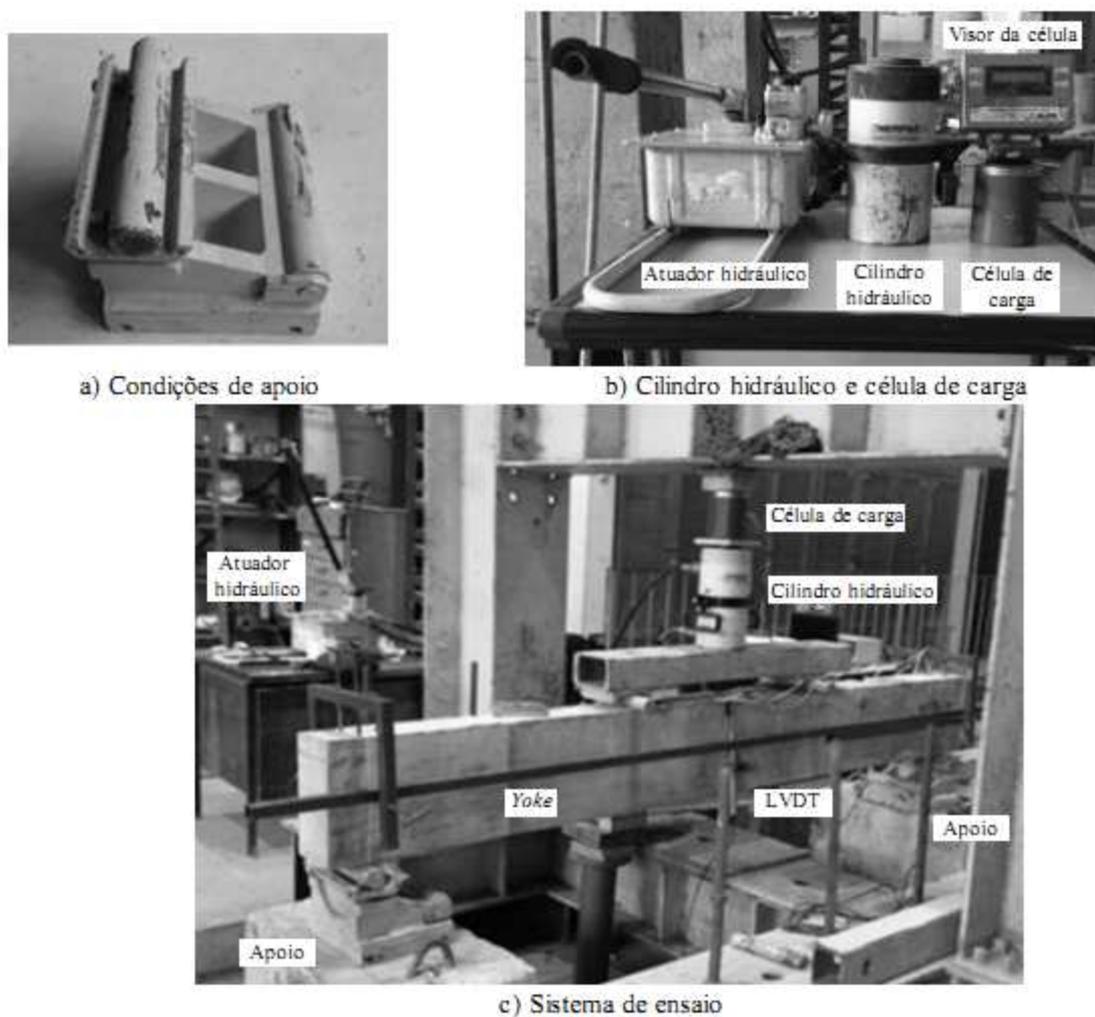


Figura 5.2 Concepção do ensaio

5.3 – INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação proposta objetivou a coleta de dados que se julgou necessária para permitir análises das vigas quanto à eficiência das fibras como mecanismo de reforço e à viabilidade de utilizar apenas fibras no reforço à flexão. Sendo assim, tem-se a seguir a explanação do plano de instrumentação a ser empregado no monitoramento do deslocamento vertical, da deformação, da curvatura, dentre outros aspectos relacionados à instrumentação.

5.3.1 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Conhecer o deslocamento vertical das vigas é fundamental, pois juntamente com o valor da carga, estabelece-se a relação carga-deslocamento. Essa relação, além de ser uma informação que revela o comportamento das vigas, também é valiosa no que diz respeito à realização de uma análise numérica. Destarte, monitorou-se a seção central da viga, conforme mostra a Figura 5.3. Para a instrumentação, empregou-se um LVDT, modelo LDS-100, da marca LD Sensors Ltd. Para auxiliar nessa medição, também foi utilizado um dispositivo de fixação chamado Yoke, ver Figura 5.2c, que tem como principal vantagem permitir a leitura do deslocamento em função do eixo da viga.

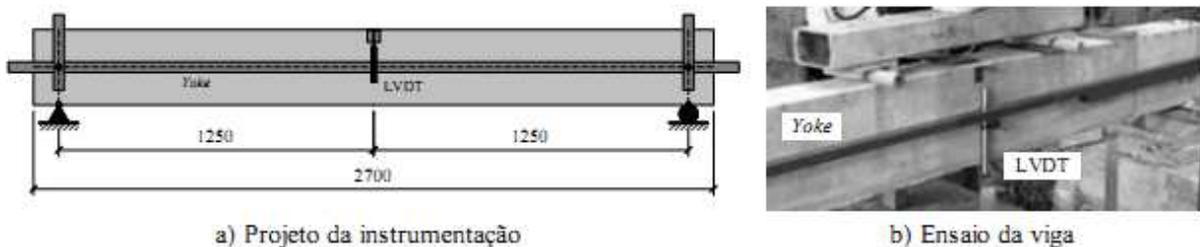


Figura 5.3 – Monitoramento do deslocamento vertical da seção da viga

5.3.2 – DEFORMAÇÕES

. A instrumentação apresentada na figura 5.4a, além de permitir avaliar o nível de deformação nas armaduras, também permitiu definir a curvatura φ da seção monitorada, possibilitando, ao fim, a avaliação da relação momento-curvatura ($M-\varphi$). Os instrumentos a serem utilizados nessa medição foram Extensômetros Elétricos de Resistência (EER) da marca EXCEL Sensores, modelo PA-06-125AA-120L. Ressalta-se que foi instrumentada apenas uma seção da viga, localizada 50 mm do vão central. Complementando a declaração, informa-se que cada barra instrumentada receberá apenas um EER, fixado na face lateral dessas barras, ver Figura 5.4b.

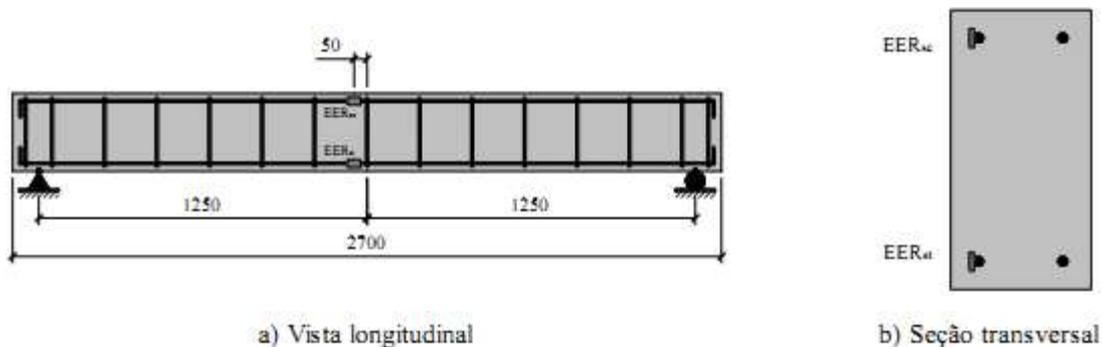


Figura 5.4 – Monitoramento da deformação

5.4 – MATERIAIS

Até a presente data não foi possível estipular a caracterização dos materiais a serem utilizados no estudo, tendo como parâmetro atual apenas a classe de resistência do concreto ($f_c = 30, 40, 50$ e 60 MPa). No que concerne ao concreto, pretende-se seguir as recomendações de dosagem preconizadas pelo IPT.

No que tange ao aço, intende-se utilizar as recomendações preconizadas pela NBR 6892 (2015).

No que tange às fibras, seguir-se-à aos valores estipulados no planejamento experimental ($C_f (\%) = 0,8, 1,0, 1,2$ e $1,4$).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7 CONCLUSÕES

8 CRONOGRAMA DA DISSERTAÇÃO

Atividades pendentes	2018				2019		
	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Qualificação							
Montagem das formas							
Concretagem							
Ensaio							
Análise dos resultados							
Finalização do trabalho escrito							
Defesa da dissertação							
Elaboração do artigo							

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15530. (2007). **Fibras de aço para concreto** - Especificações. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6118 2014). **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ACI 318 (2014). **Building Code Requirements for Structural Concrete**, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ACI 544.3R-08. (2008). **Guide for specifying proportioning, and production of fiber -reinforced concrete**. Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute.

BRAZ, M. C. A; NASCIMENTO, F. B. C. **Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Ciências Exatas e Tecnológicas**. Maceió, v. 3, n.1 p.45-56. Novembro 2015. Periódicos.set.edu.br.

BURHOUSE, P. (1969). **Composite action between brick panel walls and their supporting beams**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v.43, p.175-194. June

composite walls/beams. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LOAD-BEARING BRICKWORK, British Ceramic Society, London: p.305-320

DAEJOONG, K.; KIM, W.; WHITE, R. N. **Arch Action in Reinforced Concrete Beams – A Rational Prediction of Shear Strength**. ACI Structural Journal. July-August, 1999.

DAVIES, S.R.; AHMED, A.E. (1977). **An approximate method for analyzing**
FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras** / A. D. de Figueiredo. – São Paulo, 2011. 248p

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010

HAMAHARA, M.; LIDA, S.; UCHIDA, R.; SUETSUGU, H. **Arch Mechanism in reinforced concrete beams**. 26th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES. 27 -28 August 2001, Singapore.

HASELTINE, B.A.; MOORE, J.F.A. (1981). **Handbook to BS-5628: structural use of masonry**. Part1: Unreinforced masonry. The Brick Development Association Journal of the Structural Division, ASCE, v.88, n.ST3, p.137-166, June.

KLEINGESINDS, S. E.. **Influência do efeito arco sobre o custo de estruturas de suporte em concreto armado para edifícios de alvenaria estrutural**. Tese (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

LOFGREN, I. (2005). **Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction: A fracture mechanics approach to material testing and structural analysis**. PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

MACGREGOR, J.G; WIGHT, J. K. **Reinforced concrete:mechanics and design**. 6th edition, New Jersey, USA, 2009.

MORAES NETO, B.N. (2013). **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001A/13 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 343 p

MOUSA, H. Y. **Eficácia das fibras de aço no reforço à flexão de vigas em concreto armado com taxa de armadura mínima**. Tese de Mestrado. PPGEC-UFGA, Belém, 2017

PAES, M.S. (2008). **Interação entre edifício de alvenaria estrutural e pavimento em concreto armado considerando-se o efeito arco com a atuação de cargas verticais e ações horizontais**. 163p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PASA, V. F. **Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço Via Método dos Elementos Finitos** / Vanessa Fátima Pasa – Porto Alegre: PPGEC / UFRGS, 2007. 158p
Proceedings... Part 1, v.64, p.137-151, February

RIDDINGTON, J.R.; STAFFORD SMITH, B. (1977). **The composite behavior of elastic wall-beam systems**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, v.63, p.377- 391, June.

RIDDINGTON, J.R; STAFFORD SMITH, B. (1978). **Composite method of design for heavily loaded wall-beam structures**. In: Institution of Civil Engineers.

ROSENHAUPT, S. (1962). **Experimental study of masonry walls on beams**. São Paulo, São Carlos, 1995.

TOMAZELA, C.A.. **Ação conjunta parede-viga na alvenaria estrutural**. 249p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 224f. Tese (Doutorado) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, 2003

WOOD, R.H. (1952). **Studies in composite construction**. Part 1: The composite action of brick panels supported on reinforced concrete beams. National Building Studies, Research Paper n.13.

WOOD, R.H.; SIMMS, L.G. (1969). **A tentative design method for the composite action of heavily loaded brick panel walls supported on reinforced concrete beams**. Garston, UK, Building Research Station.6p. (BRS Current paper CP26/69).