

ANALISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA DE PELE NO COMBATE AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Janilson Pereira (1), Alexandre Vargas (2);

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) *janilson_pereira@hotmail.com*, (2) *avargas@unesc.net*

RESUMO

O dimensionamento da armadura de combate ao cisalhamento em vigas de concreto armado pode ser realizado por dois modelos de cálculo recomendados pela NBR 6118:2014: Modelo I e Modelo II. Em ambos, a armadura é transversal e secciona as fissuras típicas do esforço cortante. Por outro lado, a norma também estabelece que para vigas com altura superior a 60cm devem ser dispostas longitudinalmente nas duas faces, armadura de pele. Essas armaduras, por sua vez, também “costuram” as fissuras de cisalhamento e não são consideradas no combate ao esforço cortante. Nesse contexto, esse trabalho busca avaliar experimentalmente a influência da armadura de pele no combate ao cisalhamento em vigas. Foram moldados dois grupos, sendo um de referência e outro com armadura de pele. Todas as amostras foram submetidas à ensaio de flexão em quatro pontos com as cargas aplicadas 20 cm mais próximas dos apoios. Os resultados dos ensaios mostraram que o uso de armadura de pele, neste estudo, promoveu um aumento de (41,1%) da capacidade resistente da viga na ruptura, com menores deslocamentos verticais, não melhorando o controle da fissuração, em comparação às vigas de referência.

Palavras-Chave: Armadura de pele. Cisalhamento. Estribos em vigas.

1. INTRODUÇÃO

Em estruturas de concreto armado, devido a baixa resistência a tração do concreto, é caracterizado como um fenômeno natural o aparecimento de fissuras, sendo estas, indesejáveis não só por motivos estéticos, mas também, por afetarem negativamente durabilidade do elemento estrutural. Nas vigas de concreto armado, em geral, as principais solicitações são o momento fletor e a força cortante. Rusch (1981) explica que em seções retangulares, estas fissuras de flexão, assim que surgem, desencadeiam uma considerável redistribuição de tensões internas com consequências difíceis de calcular e que influenciam a inclinação das fissuras de cisalhamento, com isso, acarretando a ruptura da peça. Para contrapor estes esforços de cisalhamento, a maneira mais comum é a utilização de armadura transversal em

forma de estribos, que têm o papel de ligar, através da alma, os banzos tracionados e comprimidos, interferindo na propagação das fissuras de cisalhamento. A norma brasileira NBR 6118:2014 admite dois modelos para o cálculo desta armadura, denominados Modelo de cálculo I e Modelo de cálculo II. Apesar de ambos partilharem da mesma analogia de considerarem uma viga em estado de fissuração como uma treliça, têm considerações distintas, nas limitações da inclinação das bielas de compressão. O Modelo I, que adota o modelo da treliça de Morsch, determina diagonais de compressão inclinadas com ângulo fixo de 45° , em relação ao eixo longitudinal da peça, admitindo um valor fixo para a parcela complementar de resistência interna do concreto V_c , que independe da força cortante de cálculo V_{sd} . O Modelo II, por sua vez, utiliza a treliça generalizada Morsch, e determina uma variação de 30° a 45° para os ângulos das bielas, admitindo uma redução da resistência interna do concreto V_c , com o aumento da força cortante de cálculo V_{sd} .

Tendo em vista que a norma NBR 6118:2014, permite uma variação angular da inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal da peça de 45° a 90° , é significativo salientar que, em grandes vigas, o uso de estribos com inclinação de 45° a 60° limitam com maior eficiência a aberturas de fissuras, diminuindo os esforços nas bielas de compressão e o valor do deslocamento do diagrama de momentos (Leonhardt e Monnig, 2008).

Em vigas com altura superior a 60cm, a norma NBR 6118:2014 indica a utilização de armadura de pele com o propósito de limitar a abertura de fissuras na zona tracionada das mesmas. Trata-se de uma armadura lateral, calculada como 0,10% da área da seção transversal da alma para cada face da viga, dispostas no sentido longitudinal, com espaçamento não superior à 20 cm. Embora a armadura de pele, conforme indicado, trata-se de uma armadura lateral disposta no sentido longitudinal, ela normalmente não é considerada no cálculo de combate ao cisalhamento. Tendo em consideração que as fissuras de cisalhamento apresentam uma inclinação em torno de 45° , e a armadura de pele está disposta de maneira a “cortar” essas fissuras, surge o interesse em saber, o quanto é considerável a sua influência no combate ao cisalhamento. De acordo com o estudo proposto por Hassanean (2006), o uso de barras laterais, variando o número de camadas ao longo da alma da seção transversal, proporciona um ganho na diminuição do ângulo e da abertura das fissuras de cisalhamento em vigas curtas. Já Adorno (1996) afirma que há um aumento

significativo da capacidade resistente ao cisalhamento na flexão em vigas com armadura de pele para relações de distância de carga apoio/ altura útil (a/d).

Nesse contexto, o presente estudo tem como principal objetivo, avaliar através de pesquisas bibliográficas e ensaios experimentais, a influência da armadura de pele no combate ao cisalhamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de apresentar as características técnicas da armadura de pele e avaliar sua influência no combate ao cisalhamento, foi realizado um experimento prático, com seis vigas de concreto armado, sendo divididos em dois grupos com três vigas cada um. O grupo **A**, de referência, apenas com estribos e armadura longitudinal de flexão e o grupo **B** com a mesma armadura do grupo anterior acrescida de armadura de pele. Todas vigas foram concretadas com concreto convencional e com o mesmo traço. As seis vigas foram levadas ao rompimento total através do ensaio de flexão em quatro pontos, para verificação da carga máxima, deslocamentos verticais e fissuração. Além dos ensaios de flexão das vigas, foram realizados ensaios complementares, como o *slump-test* (abatimento de tronco de cone), para confirmar se o concreto atendia aos critérios estabelecidos pela norma. Também foram moldados doze corpos de prova para a caracterização do concreto quanto a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade aos 28 dias. Os ensaios de caracterização do concreto foram realizados no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil respeitando o estabelecido pela NBR 5739:2007, enquanto que os ensaios de flexão foram realizados no LEE – Laboratório experimental de estruturas, ambos localizados no Iparque – Parque científico e tecnológico da UNESC. No fluxograma apresentado da Figura 1, pode-se visualizar o procedimento experimental.

Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental.

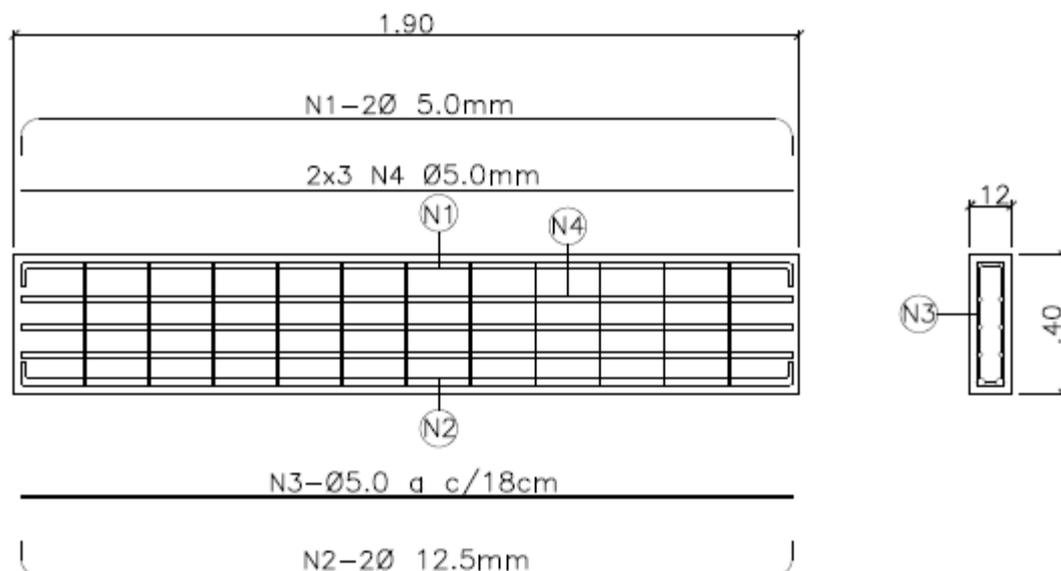


Fonte: do autor

2.1 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DAS VIGAS

As formas para concretagem das vigas foram fabricadas em um canteiro de obras no município de Criciúma/SC. As vigas foram definidas com seções transversais de 12x40 cm e 190 cm de comprimento. Como armadura de combate à flexão foram adotadas 2 ϕ 12.5 mm na região tracionada e 2 ϕ 5.0 mm como porta estribo. O cobrimento adotado foi o estabelecido pela NBR 6118: 2014 de 2.5 cm considerando grau de agressividade I, essa configuração foi estabelecida para a viga atuar no Domínio 2 de deformação. Embora a NBR 6118:2014 não indique obrigatoriedade na adoção de armadura de pele para vigas com altura inferior a 60 cm, foram respeitados os 0.10% da seção de concreto em cada face como parâmetros indicado pelo item 17.3.5.2.3. usando 3 ϕ 5.0 mm em cada face, como detalhado na Figura 2.

Figura 2: Detalhamento da armadura nas vigas.



Fonte: Autor, 2016.

Para a armadura de combate ao cisalhamento, foi estabelecido o diâmetro de 5.0 mm, para estribos de dois ramos verticais, por ser o menor diâmetro especificado pela NBR 6118:2014. Para a definição dos espaçamentos entre estribos, foi adotada a seguinte metodologia: Usando **Modelo I de cálculo**, que define as diagonais de compressão com ângulo θ de 45° e **Vc** constante, estabeleceu-se o espaçamento para os estribos

de 18 cm respeitando o limite do espaçamento máximo permitido ($S_{m\acute{a}x}$), especificado no item 18.3.3.2 da NBR 6118:2014, e expresso nas Equações 1 e 2:

$$S_{m\acute{a}x} = 0,6d \leq 300 \text{ mm se } V_{sd} \leq 0,67 V_{Rd2} \quad \text{Equação 1.}$$

$$0,3d \leq 200 \text{ mm se } V_{sd} \geq 0,67 V_{Rd2} \quad \text{Equação 2.}$$

Sendo: V_{Rd2} = Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto.

V_{sd} = Força cortante resistente de cálculo.

Adotando o valor de d (altura útil) igual a 36.0 cm, com base na seção transversal da viga e a resistência do concreto de 40 Mpa, calculou-se então a parcela da força cortante resistida de serviço através das Equações 3 e 4:

$$A_{sw} = \left(\frac{n \cdot x \cdot A_{sunit}}{s} \right) \quad \text{Equação 3.}$$

Onde: A_{sw} = Área de aço da seção transversal da viga;

n = Número de ramos;

A_{sunit} = Área de aço transversal de uma barra da armadura de cisalhamento;

s = Espaçamento entre os estribos, medido segundo o eixo longitudinal da peça;

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad \text{Equação 4.}$$

Em que: V_{sw} = Parcela da força cortante resistida pela armadura transversal;

A_{sw} = Área de aço da seção transversal da viga;

s = Espaçamento entre os estribos, medido segundo o eixo longitudinal da peça;

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

f_{ywd} = tensão na armadura transversal passiva, limitada ao valor f_{yd} , no caso de estribos, e a 70% desse valor, no caso de barras dobradas, não se tomando, para ambos os casos, valores superiores a 435 MPa;

α = Ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, podendo tomar $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Em seguida, encontrou-se a parcela da força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça (V_c), através da Equação 5.

$$V_c = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

Equação 5.

Sendo: $f_{ctd} = \left(\frac{0,21 \cdot f_{ck} \left(\frac{2}{3}\right)}{\gamma_c} \right)$, com f_{ck} em Mpa.

Onde: V_c = Parcela da força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça;

f_{ctd} = Valor de cálculo da resistência à tração do concreto;

b_w = Menor largura da seção, compreendida ao longo da altura útil d ;

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

f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão;

Por intermédio dos valores encontrados, referentes à parcela de força cortante resistida pela armadura transversal da viga e a parcelada força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça, encontrou-se a força cortante resistente de cálculo (V_{sd}), através da Equação 6.

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c$$

Equação 6.

Onde: V_{sw} = Parcela da força cortante resistida pela armadura transversal;

V_{sd} = Força cortante resistente de cálculo;

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

Posteriormente, encontrou-se a força cortante de serviço (V_{sk}), utilizando a Equação 7:

$$V_{sk} = \frac{V_{sd}}{1,4}$$

Equação 7.

Onde: V_{sk} = Força cortante de serviço;

V_{sd} = Força cortante resistente de cálculo;

A Tabela 1 apresenta os resultados dos valores da força cortante utilizando o **Modelo de Cálculo I**.

Tabela 1: Cálculo da força cortante pelo **Modelo de Cálculo I**.

$\Theta = 45^\circ$					
Diâmetro	S (cm)	V _{sw} (kn)	V _c (kn)	V _{sd} (kn)	V _{sk} (kn)
Ø5mm	18,00	140,87	45,46	186,33	133,09

Fonte: Autor, 2016.

Após a fabricação das formas, juntamente com as armaduras, as vigas foram levadas para o LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC, localizado no Iparque, para concretagem das mesmas. A Figura 3 mostra as formas e a armadura prontas para concretagem.

Figura 3: Detalhe das formas e armadura prontas para concretagem.



Fonte: Autor, 2016

O traço unitário do concreto sem adição de fibras utilizado foi de 1:2,8:3,2 com $a/c=0,55$ para um $f_{ck} = 25$ mpa. A Tabela 2 apresenta o consumo por m^3 dos materiais utilizados no concreto.

Tabela 2 – Composição e consumo por m³ dos materiais.

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento CP II	329,1
Areia	937,9
Brita 1	1.036,6
Água	181,0

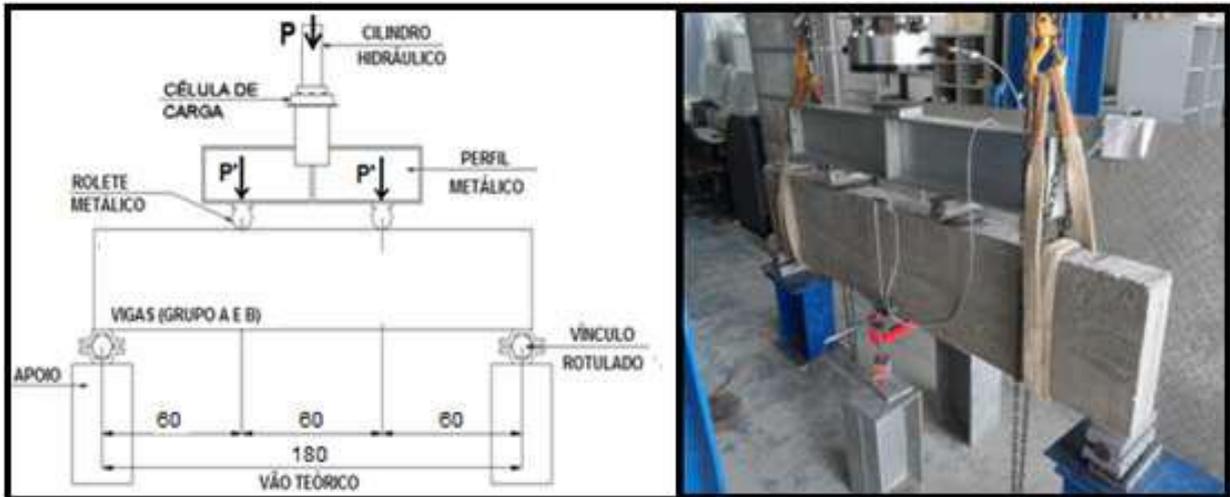
Fonte: Autor, 2016

A caracterização do concreto fresco foi feita por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump-test*). Foram moldados doze corpos de prova cilíndricos (Ø10x20 cm) para controle da resistência do concreto à compressão axial e ao módulo de elasticidade. Para garantir o cobrimento da armadura foram utilizados espaçadores plásticos. O concreto foi adensado com o auxílio de um vibrador. A concretagem foi realizada no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC, localizado no Iparque.

2.2 METODOLOGIA DE ENSAIO NAS VIGAS

Todas as amostras foram submetidas à ensaio de flexão em quatro pontos no Laboratório Experimental de Estruturas – LEE da UNESC. As vigas foram dispostas sob um pórtico metálico, onde foi aplicada uma carga sobre as mesmas, através de um cilindro hidráulico com capacidade de 500 kN. Essa carga foi transferida por uma viga metálica para os dois pontos médios da viga, através de dois roletes. Os valores de carga foram obtidos através da célula de carga instalada na base do cilindro. Para a medição dos deslocamentos no vão central das vigas, foram utilizados 02 transdutores indutivos de deslocamento (LVDT - do inglês *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear) de 100 mm, localizado no centro do vão da viga. Estes equipamentos estão ligados ao sistema de aquisição de dados Quantum X® que utiliza o *software* Catman Easy®, ambos da marca HBM®. A Figura 4 mostra o detalhamento do equipamento utilizado.

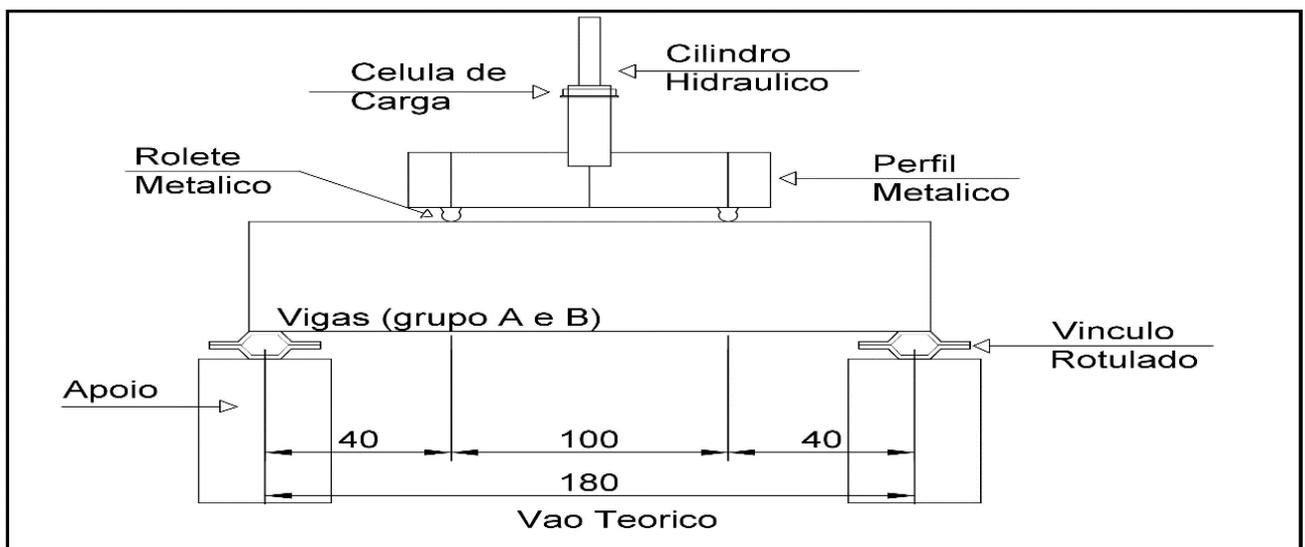
Figura 4: Posicionamento dos elementos no ensaio instrumentado de 4 pontos.



Fonte: Flávia Pasquali Bez Birolo, 2014

Após constatar-se que as primeiras vigas ensaiadas apresentavam ruptura por flexão, adotou-se para ensaios das vigas restantes (V3, V4, V5 e V6) um novo espaçamento de 20 cm mais próximo dos apoios, afim de induzir a ruptura por cisalhamento, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Posicionamento dos elementos no ensaio instrumentado de 4 pontos.



Fonte: Autor, 2016

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

O resultado do *slump-test* do concreto utilizado no experimento apresentou abatimento do tronco de cone de 11 cm, configurando assim, uma consistência medianamente plástica. Os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova foram realizados com 28 dias. Os resultados são apresentados Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da resistência à compressão axial.

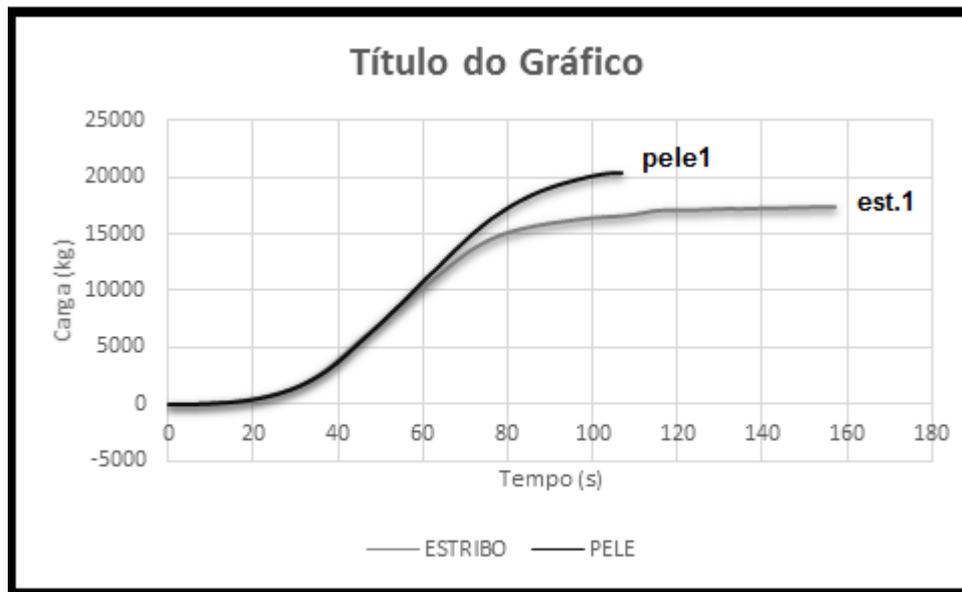
Corpos de prova - Grupo A	fc (MPa)	Corpos de prova - Grupo B	fc (MPa)
CP 01	38,30	CP 01	38,80
CP 02	40,10	CP 02	42,10
CP 03	39,90	CP 03	38,30
<i>Média</i>	<i>39,43</i>	<i>Média</i>	<i>39,73</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>0,98</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>2,06</i>

Fonte: Autor, 2016.

3.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NA FLEXÃO

Para esta análise foram consideradas apenas as primeiras vigas de ambos os grupos, usando o distanciamento de três terços do vão e foi aplicada a carga até a ruptura das peças. A viga V1 do grupo B apresenta um ganho de resistência 17% em relação a viga V1 do grupo A. Como ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Resultados da resistência para levar as vigas à ruptura *versus* tempo.



Fonte: Autor, 2016.

3.3 CARREGAMENTO NO DESLOCAMENTO MÁXIMO (L/250)

A Tabela 4 apresenta as cargas necessárias para alcançar o deslocamento máximo admitido por norma (L/250), que neste caso, é de 7,2 mm. Pode-se observar que: para o grupo B (Pele) a carga para atingir o mesmo deslocamento foi 0,18% superior que ao do grupo A (Referencia). Não foram incluídos os valores de carga e deslocamento para flecha máxima de serviço das vigas (V3, V4, V5 e V6) respectivamente, uma vez que, adotamos diferente espaçamento após o rompimento das duas vigas.

Tabela 4: Resultados das cargas para deslocamento máximo (L/250).

Vigas Grupo A	Carga L/250 (KN)	Deslocamento L/250 (mm)	Vigas Grupo B	Carga L/250 (KN)	Deslocamento L/250 (mm)
VA1	158,00	7,20	VB1	187,04	7,20

Fonte: Autor, 2016.

3.4 ANALISE DO CARREGAMENTO E DESLOCAMENTO NA RUPTURA

Com a aplicação da carga, considerando apenas as vigas (V3, V4, V5 e V6), foram obtidos os deslocamentos máximos das vigas até atingir a ruptura. As vigas do grupo A (referência) (V3 e V4) romperam por cisalhamento e a média da carga máxima na ruptura foi de 211,73 kN. Para as vigas do grupo B usando armadura de Pele, a viga (V5) rompeu por cisalhamento como as de referência, já a viga (V6) teve uma ruptura por flexão, pois verificou-se que com o aumento da sua resistência ao cisalhamento transfigurou-se o rompimento para flexão, comprovando assim sua eficiência no combate ao cisalhamento, obtendo uma média da carga máxima na ruptura de 298,74 kN, apresentando uma resistência 41,1% maior que as vigas de referência, mostrando que o reforço se comportou conforme o esperado.

As cargas máximas e os deslocamentos atingidos na ruptura encontram-se dispostos na Tabela 5.

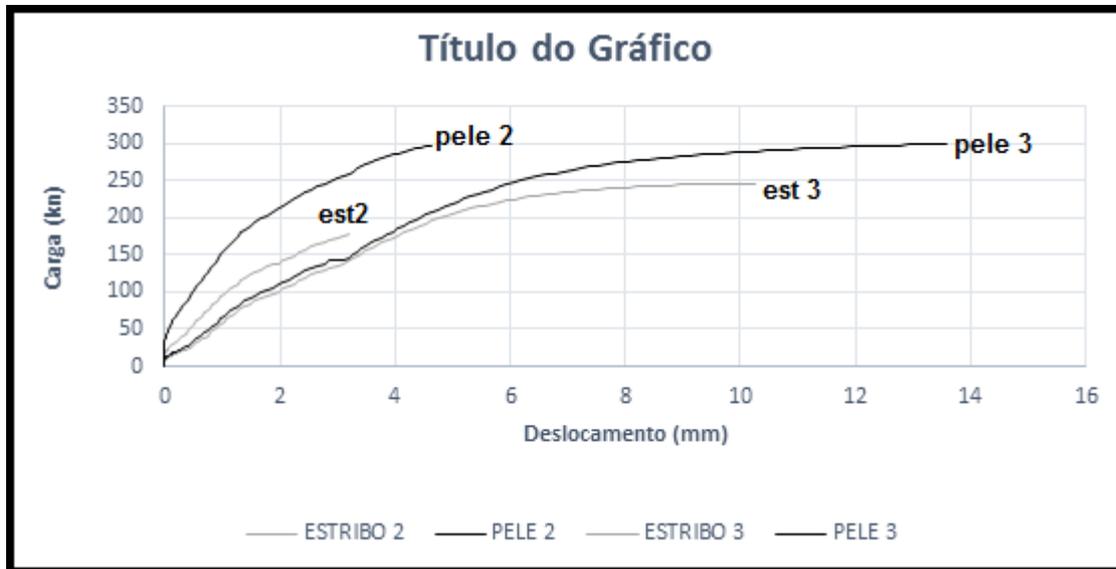
Conforme apresentado na Figura 7 o gráfico do comportamento das cargas *versus* deslocamentos das vigas do grupo A e B.

Tabela 5: Cargas máximas e os deslocamentos na ruptura.

Vigas Grupo A	Carga Máxima (kN)	Deslocamento na carga máxima (mm)	Vigas Grupo B	Carga Máxima (kN)	Deslocamento na carga máxima (mm)
Viga 1	-	-	Viga 1	-	-
Viga 2	177,77	4,99	Viga 2	297,93	9,70
Viga 3	245,69	12,56	Viga 3	299,54	13,60
<i>Média</i>	<i>211,73</i>	<i>8,78</i>	<i>Média</i>	<i>298,74</i>	<i>11,65</i>
<i>Desvio Padrão</i>	-	-	<i>Desvio Padrão</i>	-	-

Fonte: Autor, 2016.

Figura 7: Cargas versus deslocamentos.



Fonte: Autor, 2016.

3.5 FISSURAS

As fissuras referentes as primeiras vigas de ambos os grupos foram medidas com o auxílio de fissurômetro e as demais avaliadas apenas por critério visual. Considerando o espaçamento a três terços do vão teórico, as primeiras vigas de ambos os grupos obtiveram comportamentos similar ruptura por flexão, com a viga do grupo A tendo um percentual de 28,57% menor em relação as aberturas das fissuras da viga do grupo B, como pode ser observado na figura 8.

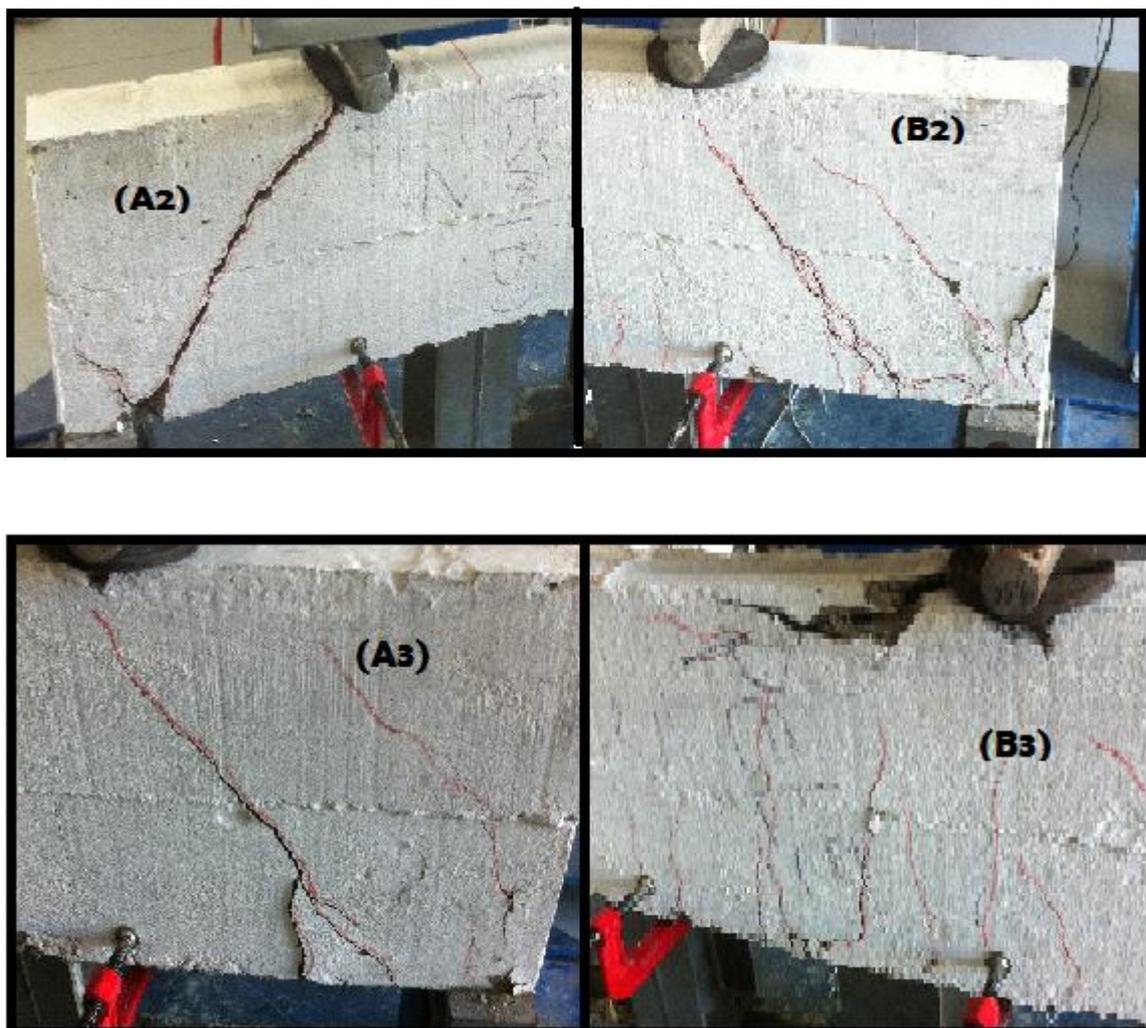
Figura 8: Vigas fissuradas após ruptura espaçamento a três terços.



Fonte: Autor, 2016.

Para o espaçamento adotado na Figura 5, as vigas referência e a viga 2 do grupo B, obtiveram ruptura na área cisalhante apresentando as aberturas das fissuras com ângulos entre 30° e 45° , evidenciando as divisões das bielas de compressão, além do aparecimento das fissuras de flexão, do centro em direção aos apoios, enquanto que a viga 3 do grupo B alcançou a ruptura na interface da área flexionada. A figura 9, apresenta o aspecto das fissuras nas vigas após os ensaios.

Figura 9: Vigas fissuradas após ruptura espaçamento ilustrado Figura 5.



Fonte: Autor, 2016.

4 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos, e considerando as condições de seção transversal, comprimento da viga, armadura de flexão e concreto utilizados nesse trabalho, pode-se concluir:

- O uso de armadura de pele propicia um ganho significativo de 41,1% na capacidade resistente da viga em relação ao cisalhamento.
- Na análise da fissuração ocasionada pela flexão, observou-se que a viga do grupo B (Pele), apresentou um percentual de 28,57% superior, não melhorando assim, o controle da fissuração em comparação às vigas do grupo A (referência).

Com relação a trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar experimentos com três grupos: um usando estribos, um usando só com armadura de pele e outro usando conjuntamente estribos e armadura de pele;
- Realizar experimento variando o número de camadas das armadura de pele.
- Realizar estudos de viabilidade econômica para a aplicação do reforço.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

ADORNO, Ana Lucia Carrijo – **Contribuição de armadura de pele na resistência ao cisalhamento na flexão em viga de concreto armado.** Brasília, 1996.

BEZ BIROLO, Flavia Pasquali - **Análise experimental de vigas de concreto armado submetidas ao mesmo esforço de cisalhamento, dimensionadas pelos dois modelos diferentes propostos pela NBR 6118:2014.** Criciúma, 2014.

LEONHARDT, Fritz; MONNIG, Eduard. **Construções de concreto.** Editora Interciência, 1982 V1.

FUSCO, Péricles Brasiliense – **Estruturas de Concreto.** Editora Afiliada, 1981.

DE ARAUJO, Jose Milton – **Curso de Concreto Armado.** Editora DUNAS, 2014 V2.

BASTOS, Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos. **Dimensionamento de vigas de Concreto armado à Força Cortante.** Bauru- SP, 2008.

SOUZA, Vicente Custodio Moreira de; RIPPER, Thomas. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de Concreto.** São Paulo: PINI, 1998.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de armar as estruturas de concreto.** São Paulo: PINI, 1995.

HASSANEAN, Yehia A. **Shear response of large r. c. beams provided with side bars under repeated loading.** Faculty of Engineering, Assiut University, Assiut, Egypt, 2006.