



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Vigas Gerber com Dentes Múltiplos: Dimensionamento e Detalhamento

Eduardo Thomaz¹, Luiz Carneiro², Rebeca Saraiva³

¹Prof. Emérito / Instituto Militar de Engenharia / Seção de Engenharia de Fortificação e Construção /
ecsthomaz@terra.com.br

²Prof. Adjunto / Instituto Militar de Engenharia / Seção de Engenharia de Fortificação e Construção /
carneiro@ime.eb.br

³Aluna do Curso de Doutorado em Engenharia de Defesa / Instituto Militar de Engenharia /
rebecadias@gmail.com

Resumo

Este trabalho tem por objetivo tecer considerações sobre o dimensionamento e detalhamento de vigas Gerber de concreto armado e protendido. São mostradas formulações para cálculo da tensão cisalhante média na seção rotulada de vigas Gerber com um ou mais dentes. Ilustram-se detalhamentos de seções rotuladas de dentes Gerber simples ou múltiplos de concreto armado e protendido. Por fim, são apresentados resultados de um ensaio de uma viga Gerber de concreto armado de 2 vãos e com uma rótula formada por três dentes, realizado pelo primeiro autor.

Palavras-chave

Vigas Gerber; Dentes múltiplos; Concreto armado; Concreto protendido.

Introdução

Um dos detalhes freqüentes com que o engenheiro calculista de estrutura se depara é a rótula. Teoricamente, rótula é a ligação entre duas barras de uma estrutura na qual não há transmissão de momento fletor, ou seja, admite-se liberdade total de rotação entre uma e outra barra. Através da rótula só são transmitidos esforços normais (axiais) e cortantes (transversais).

Na realidade, qualquer realização prática de rótula se afasta mais ou menos das condições teóricas. Normalmente, nas estruturas de concreto, as rótulas não sofrem grandes rotações. Os aparelhos de neoprene fretado, muito usados hoje em dia nas rótulas, admitem em suas dimensões mais comuns rotações de no máximo $15 \cdot 10^{-3}$ radianos, isto é, cerca de 1° .

Entre os tipos de rótulas usadas nas estruturas de concreto armado ou protendido, há rótulas em que ocorre a predominância de esforço normal N sobre o esforço cortante Q e outras em que acontece o contrário.

A solução prática de concreto para esse primeiro caso ($N \gg Q$) foi imaginada por Freyssinet. Consiste no estrangulamento da seção de concreto de tal forma que haja plastificação do concreto à compressão. Segundo experiências realizadas por DIX (1962) e LEONHARDT e REIMANN (1966), este tipo de articulação apresenta capacidade de rotação de até em torno dos $5 \cdot 10^{-3}$ radianos e não será abordado neste trabalho.

O segundo caso de rótula em que ocorre a predominância de esforço cortante Q sobre o esforço normal N é encontrado em vigas tipo Gerber, muito adotadas nas construções de pontes. Nestas vigas, a rótula usada quase que universalmente é o dente Gerber, que é assunto deste trabalho.



São apresentadas neste trabalho considerações sobre o dimensionamento e detalhamento de vigas Gerber de concreto armado e protendido, além de resultados de um ensaio de uma viga Gerber de concreto armado de 2 vãos e com uma rótula formada por três dentes, realizado pelo primeiro autor.

Dentes Gerber Simples

São um tipo de rótula usada muito nas construções de pontes, na qual ocorre a predominância de esforço cortante sobre o esforço normal.

A Figura 1 apresenta um esquema sobre a evolução do dente Gerber, na qual se percebe o uso de placas de neoprene fretado. Estas permitem a ocorrência de deformações axiais das vigas, provenientes da retração, deformação lenta (em vigas de concreto protendido) e deformações térmicas.

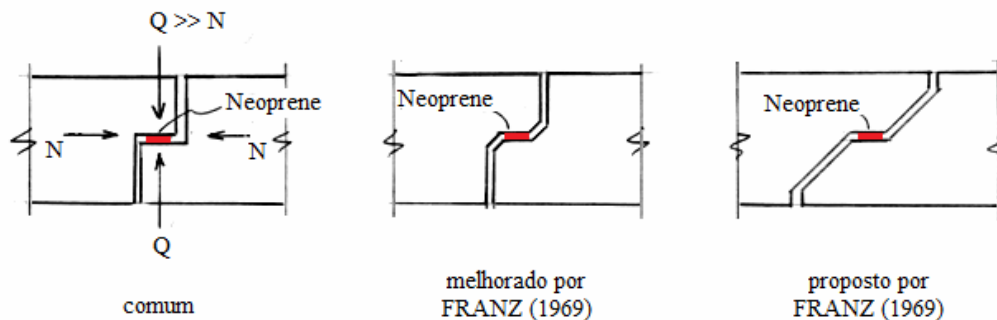


Figura 1 – Evolução do dente Gerber segundo FRANZ (1969).

Como mostrado na Figura 1, FRANZ (1969) procurou evitar cantos vivos nas extremidades das vigas com o intuito de diminuir o risco de fissuração excessiva devido à concentração de tensões de tração, além de obter menor taxa de armadura e facilitar a concretagem.

Uma das desvantagens do uso de dentes Gerber refere-se ao esforço cortante solicitante, que deve ser resistido apenas pela metade da altura da viga.

No caso de vigas de concreto protendido, é comum o uso de ancoragens mortas (passivas) nos dentes Gerber, como apresentado na Figura 2. Tais ancoragens, usadas por conta da impossibilidade da protensão direta dos cabos junto ao dente de concreto, são de eficácia duvidosa. Não se pode assegurar que a protensão do cabo, feita da outra extremidade, tenha atingido as ancoragens mortas.

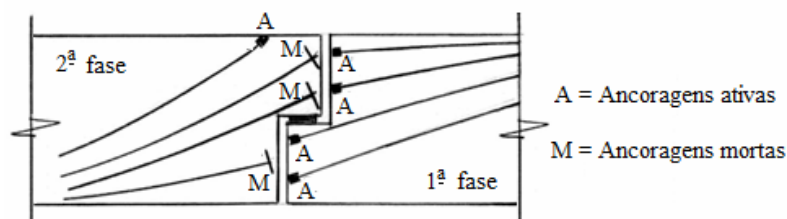


Figura 2 – Esquema de uso de ancoragens em dentes Gerber de concreto protendido.



Outra desvantagem do uso de dentes Gerber é elevada taxa de armadura (ver Figura 3), que tende a ser maior para o caso de vigas protendidas pela presença das ancoragens e suas respectivas armaduras de fretagem. Esta elevada taxa de armadura ocasiona normalmente falhas de execução, como barras de aço fora da posição de projeto, concreto mal vibrado, nichos de concretagem, entre outras.

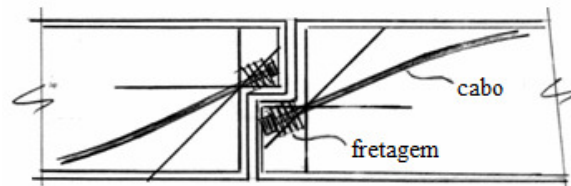


Figura 3 – Esquema de uso de armaduras em dentes Gerber simples de concreto protendido.

Dentes Gerber Múltiplos

Objetivando-se obter uma maior capacidade resistente ao esforço cortante do que a de um dente Gerber comum, idealizaram-se os dentes Gerber múltiplos.

Em um dente Gerber comum, conforme mostra a Figura 4, tem-se que a tensão cisalhante média em uma seção A é igual a:

$$\tau_a = 2Q/(bh) \quad (1)$$

sendo b e h a largura e a altura total da viga.

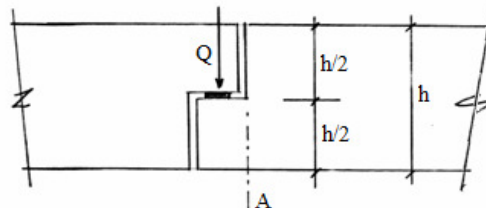


Figura 4 – Dente Gerber comum de concreto.

Para o caso de um dente Gerber duplo, ilustrado na Figura 5, considerando o esforço cortante em cada dente igual a Q/2, as tensões cisalhantes médias nas seções A e B são iguais e têm os valores:

$$\tau_a = \tau_b = 1,5Q/(bh) \quad (2)$$

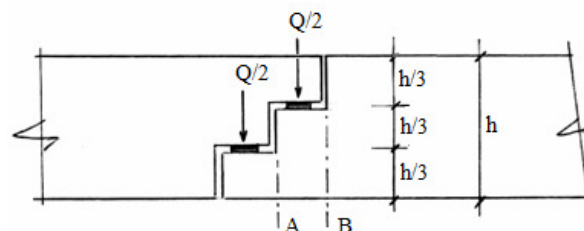


Figura 5 – Dente Gerber duplo de concreto.



Extrapolando para o caso de um número n de dentes, segundo mostra a Figura 6, sendo o esforço cortante em cada dente igual a Q/n , as tensões cisalhantes médias nas seções A, B e N também são iguais, cujos valores são:

$$\tau_a = \tau_b = \tau_n = (n+1)/n \cdot Q/(bh) \quad (3)$$

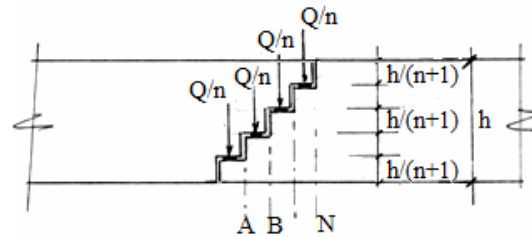


Figura 6 – Dentes Gerber múltiplos de concreto.

A Figura 7 apresenta uma tendência do comportamento da curva de valores de tensão cisalhante média no dente em função do número de dentes de um apoio Gerber. Constatou-se que a tensão cisalhante média no dente diminui com o aumento do número de dentes. Esta tensão parte de um valor máximo $2 \cdot Q/(bh)$, valor correspondente à tensão cisalhante média no dente para o caso de apoio Gerber simples, e tende ao valor $Q/(bh)$, valor referente à tensão cisalhante média do dente para um apoio Gerber com um número elevado de dentes de concreto.

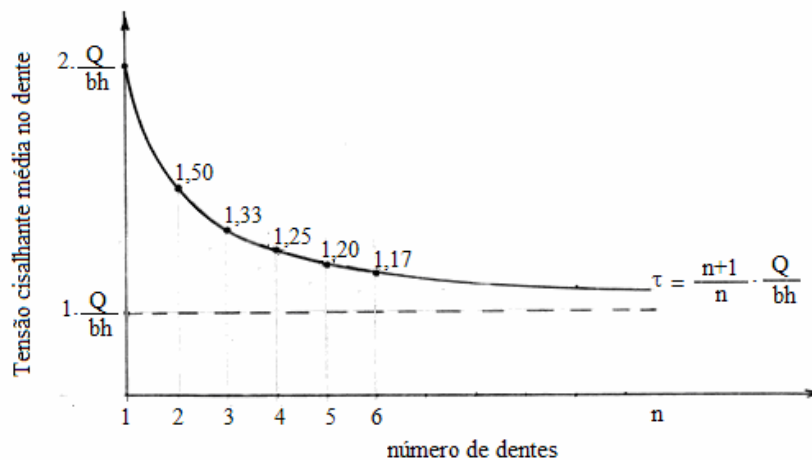


Figura 7 – Curva tensão cisalhante média no dente de concreto em função do número de dentes no apoio Gerber.

O problema a se determinar é a distribuição do esforço cortante nos diferentes dentes de apoio Gerber múltiplo. Não havendo rotação relativa no dente, pode-se considerar que o esforço cortante se distribui igualmente nos diferentes dentes.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Caso haja dente múltiplo em uma seção da viga que esteja sujeita a rotações relativas, é importante determinar o efeito destas rotações relativas na distribuição do esforço cortante nos diferentes dentes do apoio Gerber.

Deve-se levar em conta também o tipo de material usado nos aparelhos de apoio do dente. Normalmente, estes aparelhos são feitos de neoprene fretado, cuja curva tensão - deformação tem a forma segundo a Figura 8.

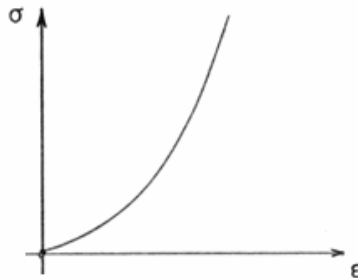


Figura 8 – Curva tensão - deformação do neoprene fretado.

O dimensionamento de um apoio Gerber com dentes múltiplos deve considerar o esforço cortante e a rotação. Caso o esforço cortante seja máximo e a rotação seja nula, chega-se a um apoio Gerber com dentes múltiplos com máximo desempenho.

Outro aspecto básico de um apoio Gerber com dentes múltiplos é a possibilidade da utilização de ancoragens ativas nas faces laterais do dente de concreto protendido, o que elimina o problema de ancoragens mortas ou passivas. As ancoragens mortas são sempre causa de dúvida no cálculo de um dente Gerber, pois não se tem certeza sobre o nível de protensão aplicada no cabo por outra extremidade se atinge a ancoragem morta.

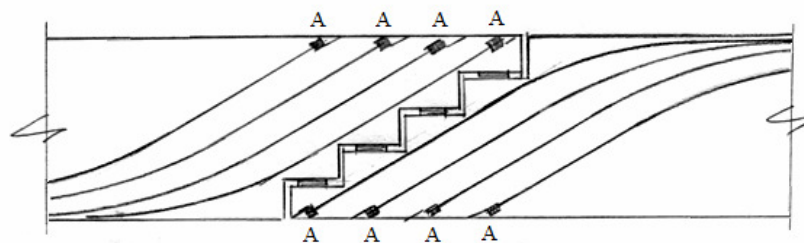


Figura 9 – Dentes Gerber múltiplos de concreto protendido com ancoragens ativas.

Em se tratando de concreto armado, a armadura passiva não é interrompida para o caso de apoio Gerber com dentes múltiplos, o que não ocorre para o caso de apoio Gerber com dentes simples. Além disto, a taxa de armadura de estribos e barras horizontais para o caso de apoio Gerber com dentes múltiplos pode ser menor que a para o caso de apoio Gerber com dentes simples, o que melhora as condições de concretagem.

A Figura 10 mostra um possível detalhamento da armadura interna de apoios Gerber com dentes simples e múltiplos de concreto armado. Observa-se a interrupção da armadura interna inclinada para o caso de apoio Gerber com dentes simples, o que não acontece para o caso de apoio Gerber com dentes múltiplos.

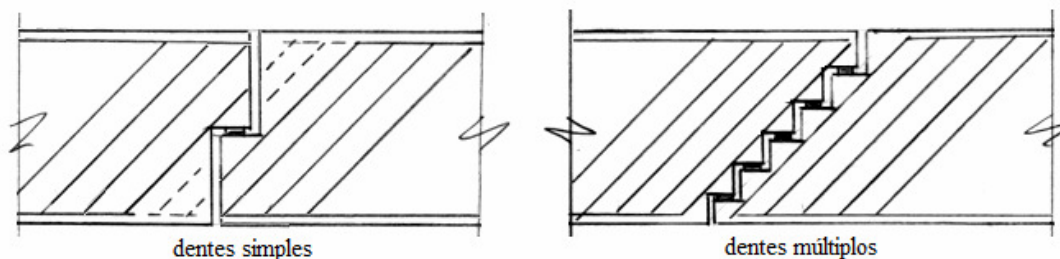


Figura 10 – Detalhes das armaduras internas de dentes Gerber simples e múltiplos de concreto armado.

Ensaio de Viga com Dentes Gerber Múltiplos

Afim de bem compreender a distribuição do esforço cortante nos dentes de apoio Gerber múltiplo, foi ensaiada uma viga contínua com dois vãos de concreto armado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UERJ (ver Figura 11), sob coordenação do primeiro autor deste trabalho.

A viga de concreto armado tinha seção transversal retangular de 200 mm x 240 mm de dimensões (largura x altura) e dois vãos de 1000 mm de comprimento cada. O apoio Gerber possuía 3 dentes e encontrava-se distante 293 mm à direita do apoio central da viga, como mostrado na Figura 12.

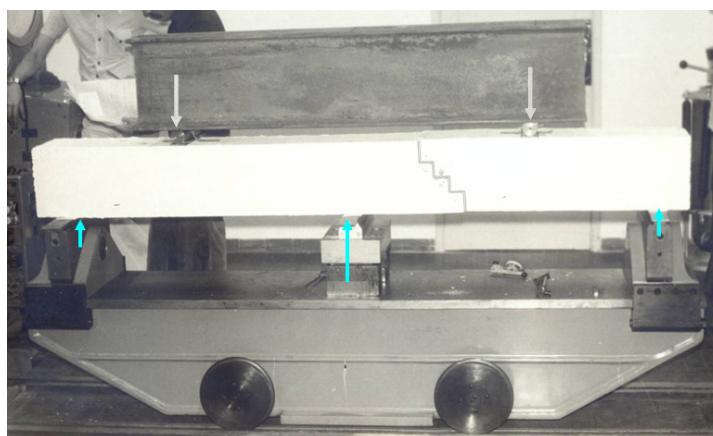


Figura 11 – Vista da viga ensaiada em laboratório.

A armadura principal de tração era composta por 5 barras de 8 mm de diâmetro e 6 barras de 6,3 mm de diâmetro, enquanto a armadura de compressão possuía 5 barras de 8 mm de diâmetro. A resistência média do concreto à compressão era 27,4 MPa e a resistência ao escoamento das barras de aço, 600 MPa (aço CA-60).

Aplicaram-se duas cargas concentradas, como se observa na Figura 12, distantes 414 mm, cada uma, dos apoios extremos da viga. Este comprimento foi escolhido de tal maneira que a rotação fosse nula tanto para viga contínua com dois vãos sem ou com dente Gerber na seção distante 293 mm à direita do apoio central da viga.

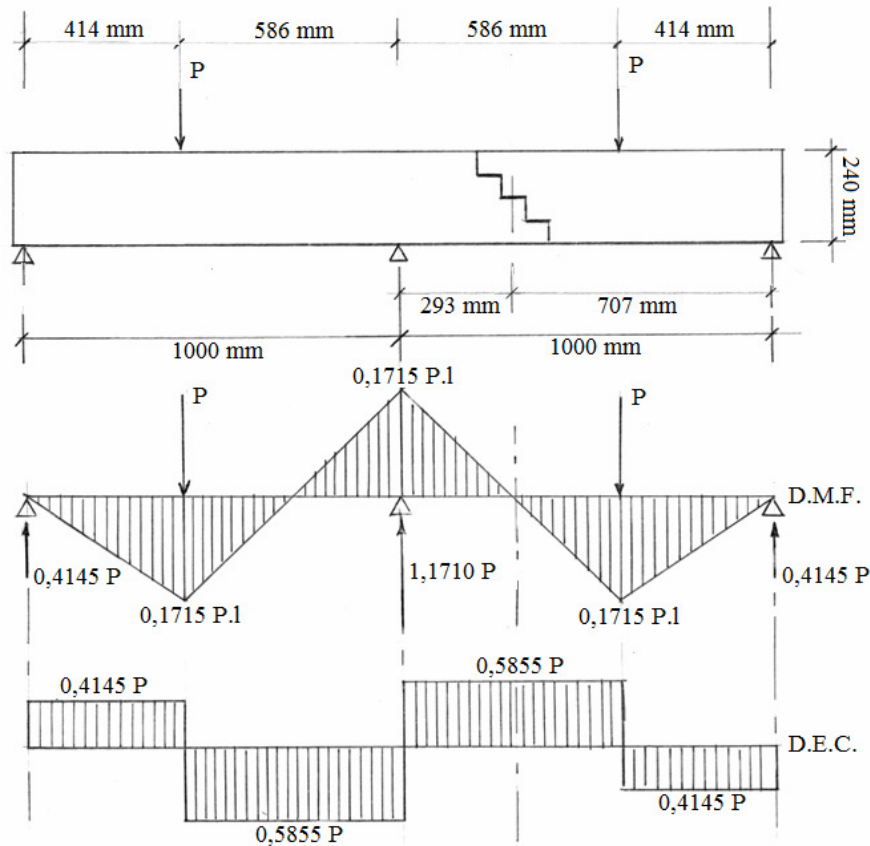


Figura 12 – Esquema estrutural da viga ensaiada.

Na ruptura, a carga P atingiu o valor de 370 kN em cada vão e houve esmagamento do concreto em região próxima à aplicação da carga concentrada no segundo vão da viga. O aspecto pós-ruptura da viga pode ser visto na Figura 13.

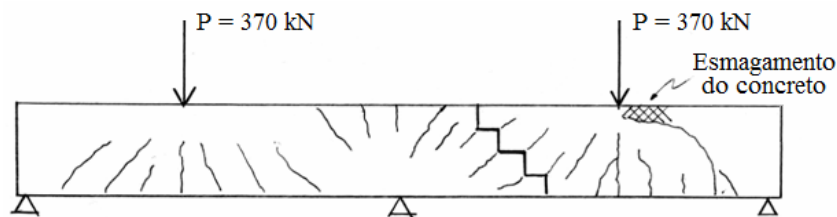


Figura 13 – Aspecto pós-ruptura da viga ensaiada.

Para a carga de ruptura P de 370 kN, o esforço cortante atuante Q no apoio Gerber foi 216,6 kN ($0,5855 \cdot P$ segundo Figura 12). Assim, empregando a Equação 3, para $n = 3$, $b = 200$ mm e $h = 225$ mm (adotou-se h igual a altura útil da viga), a tensão cisalhante média atingiu 6,4 MPa, o que correspondeu a 23% da resistência média do concreto à compressão. Como visto na Figura 13, fissuras a 45° com relação ao eixo longitudinal da viga surgiram nos cantos reentrantes dos dentes para a carga P de 105 kN (cerca de 28% da carga de ruptura) e pouco se propagou até a ruptura da viga. Não houve ruptura de dente algum.



A Figura 14 reúne as curvas carga P - deformação de encurtamento de cada neoprene. Só foi possível medir a deformação de encurtamento de cada neoprene até a carga de 120 kN. Após este valor, alguns pinos metálicos se descolaram da viga (ver Figura 15) e não foi possível continuar as leituras por meio de um extensômetro mecânico.

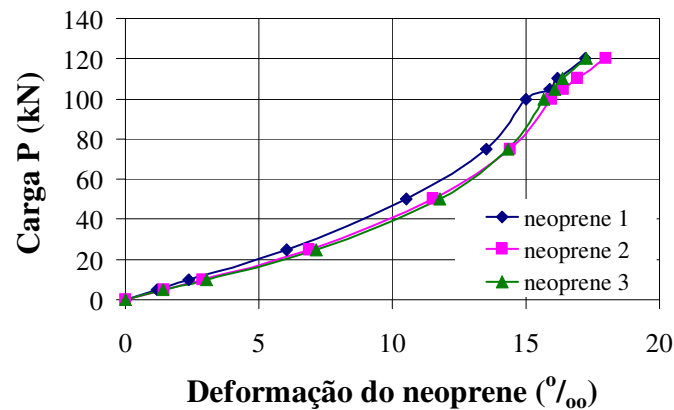


Figura 14 – Curvas carga - deformação de cada neoprene da viga ensaiada.

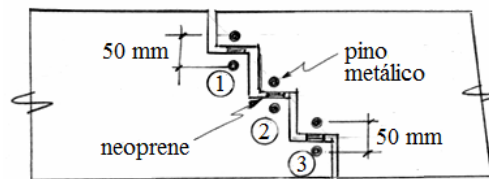


Figura 15 – Detalhe de instrumentação para leitura das deformações de encurtamento para cada neoprene da viga ensaiada.

Pode-se constatar da Figura 14 que as deformações de encurtamento de cada neoprene foram muito próximas umas das outras, o que pôde levar a concluir que a distribuição de esforço cortante parece ter ocorrido de maneira uniforme entre os três apoios de neoprene do dente.

Propõe-se neste trabalho, após análise dos resultados da viga ensaiada, o tipo de armadura conforme esboço apresentado na Figura 16 para o caso de vigas de concreto armado, com estribos inclinados. Caso fossem utilizadas barras de aço dobradas (ver Figura 17), estas devem ter alça na sua extremidade, conforme foi feito no ensaio descrito neste trabalho. Para o caso de vigas de concreto protendido, o esboço da armadura proposta encontra-se na Figura 18.

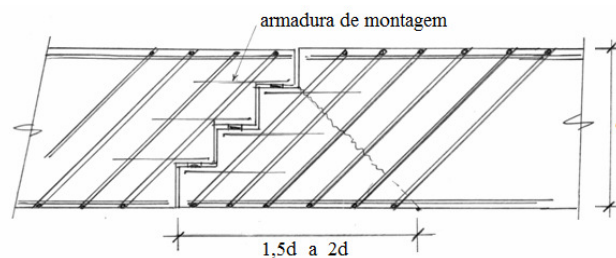


Figura 16 – Detalhe das armaduras internas propostas para vigas de concreto armado.

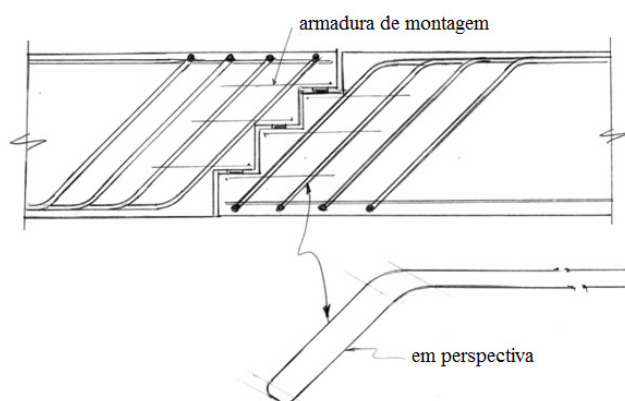


Figura 17 – Detalhe da armadura interna em laço proposta para vigas de concreto armado.

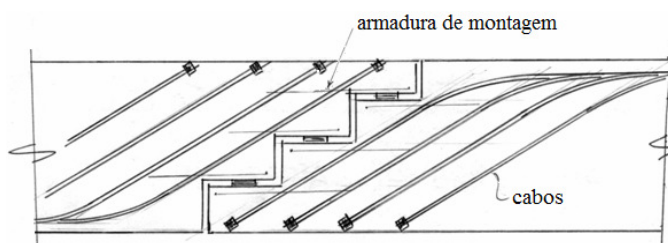


Figura 18 – Detalhe das armaduras internas propostas para vigas de concreto protendido.

Conclusões

Este trabalho abordou o dimensionamento e detalhamento de vigas Gerber de concreto armado e protendido. De posse da teoria apresentada e dos resultados dos ensaios de uma viga Gerber de concreto armado de 2 vãos e com uma rótula formada por três dentes, pôde-se chegar as seguintes conclusões:

- demonstrou-se que o apoio Gerber sofre alguma rotação interna, ainda que pequena, apesar de na teoria só admitir que sejam apenas transmitidos esforços normais e cortantes;
- em apoio Gerber com dentes múltiplos, pode-se considerar que há distribuição uniforme de esforço cortante entre os apoios de neoprene;
- apesar dos dentes terem apresentado fissuras nos seus cantos reentrantes para carga P de cerca de 28% da carga de ruptura da viga, estas fissuras pouco se propagaram e não houve ruptura de dente algum na etapa de ruptura da viga;
- o tipo de armadura mais eficiente para o caso de vigas Gerber de concreto armado é aquela que utiliza barras de aço dobradas com alça na sua extremidade.

Referências

- DIX, J. Betongelenke unter oftmals wiederholter Druck und Biegebeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 150, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1962.
- FRANZ, G. Konstruktionslehre des Stahlbetons. Ed. Springer, 1969.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



LEONHARDT, F.; REIMANN, H. Betongelenke. Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 175, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1966.