

ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM FUROS NA ALMA

EXPERIMENTAL ANALYSIS AND THEORY IN BEAMS OF REINFORCED CONCRETE WITH HOLES IN SOUL

Maria Araújo Moreira¹; José Fabiano Araújo Moreira², Thiago Andrade Gomes³,
Francisco Leandro Fernandes Farias⁴, Maycon Douglas Alves Rodrigues⁵; Ricardo José Carvalho Silva⁶

RESUMO

Furos em vigas são comuns em obras de engenharia, para passagem de tubulações elétricas, hidráulicas, entre outras. Este estudo objetiva verificar se a presença de furos em diferentes localizações e quantidades diminui a resistência mecânica de vigas de concreto armado e analisar as recomendações normativas impostas pela Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Concreto - NBR 6118 (2014). Como orienta a referida Norma, o furo deve ser moldado antes da concretagem. Acontece que em muitos casos o furo é feito depois de a viga estar concretada, tendo que ser aberto com auxílio de equipamento perfurante, com a viga sendo vibrada no ato da perfuração. Há corte da armadura, podendo comprometer a resistência da peça. Para este estudo foram ensaiadas cinco vigas. Com base nesses ensaios, concluiu-se que a presença de furos em diferentes localizações e quantidades influencia na resistência mecânica e no modo de ruptura de vigas. Além disso pôde-se perceber que a NBR 6118 (2014) é satisfatória para o dimensionamento de furos em vigas. A Norma, porém, generaliza as condições para todas as regiões das vigas, tornando-a conservadora em relação à distância entre as faces dos furos e o seccionamento das armaduras em região de flexão pura.

Palavras-chave: Vigas de Concreto Armado, Vigas com Furos, NBR 6118 (2014).

ABSTRACT

Holes in beam are common in engineering works, for the passage of electrical, hydraulic pipes, among others. This study aims to verify if the presence of holes in different locations and quantities decreases the mechanical strength of reinforced concrete beams and to analyze the normative recommendations imposed by the Brazilian Standard of Design of Concrete Structures - NBR 6118 (2014). As it guides the same, the hole must be molded before concreting. It happens that in many cases the hole is drilled after the beam is made, having to be opened with the aid of drilling equipment, with the beam being vibrated at the time of drilling and still being able to cut the reinforcement, which may compromise the strength of the piece. For this study five beams were tested. Based on these tests, it was concluded that the presence of holes in different locations and quantities influences the mechanical strength and the breaking mode of beams. In addition, it could be seen that NBR 6118 (2014) is satisfactory for the design of holes in beams. However, the norm generalizes the conditions for all beam regions, making it conservative in relation to the distance between the hole faces and the sectioning of the reinforcement in pure flexion region.

Keywords: Reinforced Concrete Beams, Beams with Holes, NBR 6118 (2014).

Recebido em: 08 nov 2019

Aprovado em: 07 jan 2020

¹ Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: mariamoreirapj@gmail.com

² Mestre em Estruturas pela Universidade de Brasília. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: jf_moreira1991@hotmail.com

³ Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: thiago.andg@gmail.com

⁴ Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: leandrofernandes1d@gmail.com

⁵ Graduando em Engenharia Civil da Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: maycond.md26@gmail.com

⁶ Orientador. Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: ricardo.carvalho222@gmail.com

INTRODUÇÃO

As vigas são extremamente importantes para a estrutura de uma edificação. Junto dos outros elementos, ajudam a distribuir o carregamento e dar maior estabilidade, visto que são responsáveis por transferir as cargas das lajes para os pilares. É muito comum haver furos na alma das vigas para passagem de tubulações elétricas, hidráulicas, de incêndio ou de climatização. A Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Concreto - NBR 6118 (2014) orienta que, quando forem previstos furos e aberturas em elementos estruturais, seu efeito na resistência e na deformação deve ser verificado, e não podem ser ultrapassados os limites previstos nesta Norma. Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987) comentaram que os métodos-padrão de dimensionamento não são aplicáveis a regiões de uma estrutura onde a distribuição de deformação é significativamente não linear, como é o caso de furos e outras descontinuidades.

A execução de uma edificação depende de vários projetos. Nunes et al. (2018) comentam que diversas vezes ocorrem problemas nas construções, devido a falhas e/ou ineficiência de projetos de engenharia civil, tendo em vista que não ocorre a compatibilidade com todos os outros projetos complementares (hidrossanitário, elétrico, estrutural, por exemplo), afetando na eficácia da obra. Um problema muito comum na execução de obras de construção civil, devido a essa falta de comunicação entre profissionais projetistas é a necessidade da continuidade das tubulações, que, sem a compatibilização dos projetos, geralmente são executadas de forma indevida, como por exemplo, por meio de furos aleatórios em elementos estruturais depois de prontos.

O objetivo desta pesquisa é verificar por meio de experimentos se a presença de furos (feitos depois das vigas serem concretadas e curadas) em diferentes localizações e quantidades diminui a resistência mecânica de vigas de concreto armado, visto que houve o seccionamento das armaduras e a peça foi submetida a vibrações no ato do furo. Além disso, analisar as recomendações impostas pela NBR 6118 (2014). Para tal serão analisadas cinco vigas ensaiadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual Vale do Acaraú.

Fundamentação Teórica

Nos últimos 40 anos, várias pesquisas sobre vigas com furos foram desenvolvidas. Dentre elas podem-se citar as pesquisas de Medeiros e Medeiros (1987), Mansur, Tan e Weng (2006), Silva, Moreira e Silva (2014), Aykac et al. (2014), Silva, Pontes e Silva (2016), Silva Neto et al. (2018) e Olanitori e Tifase (2019). Em cada pesquisa houve uma peculiaridade diferente, com conclusões parcialmente diferentes, em que uma completa a outra, como abordado a seguir.

Medeiros e Medeiros (1987) fizeram uma abordagem geral sobre aberturas para tubulações em vigas de concreto armado de seção retangular, discutindo alguns aspectos de dimensionamento e apresentando um exemplo prático de aplicação. Concluíram que se deve prever armaduras de suspensão, junto ao furo, colocadas em torno de 1/3 da altura da viga e que as aberturas circulares são mais favoráveis do que as com ângulos reentrantes.

Mansur, Tan e Weng (2006) estudaram sobre projeto de vigas de concreto armado com aberturas na alma. Além de analisar furos circulares também analisaram furos retangulares. Foi demonstrado que o método de projeto para grandes aberturas retangulares pode ser consideravelmente simplificado se for decidido usar armaduras simétricas de reforço.

Silva, Moreira e Silva (2014) realizaram um estudo teórico-experimental em vigas de concreto armado com furos localizados em diferentes regiões da alma, com a peculiaridade de esses furos terem sido feitos na fôrma antes da concretagem e concluíram que, para o dimensionamento de peças com tais descontinuidades, faz-se necessária a previsão de uma armadura de reforço para diminuir a quantidade de fissuras, assim como recomenda a norma NBR 6118 (2014).

Aykac et al. (2014) estudaram sobre o comportamento da flexão e da resistência de vigas de concreto armado com múltiplas aberturas transversais. Concluíram que o uso do reforço diagonal contribui para a ductilidade e capacidade de carga se as aberturas não forem reforçadas com estribos na direção longitudinal. Da mesma forma, os estribos nas aberturas aumentam a ductilidade e a capacidade das vigas de concreto com aberturas na ausência de aço diagonal. Também observaram que o uso dos dois (aço longitudinal e diagonal), juntos, tem pouca ou nenhuma contribuição para melhoria da ductilidade e carga de ruptura em vigas com aberturas.

Silva, Pontes e Silva (2016) ensaiaram vigas de concreto armado com furos feitos na fôrma antes da concretagem, com o diferencial de os furos estarem localizados na vertical. Concluíram que os furos influenciam na resistência ao cisalhamento das vigas e que a passagem destes furos quanto mais próxima do apoio, atravessando a biela comprimida, mais é prejudicial à estrutura.

Silva Neto et al. (2018) estudaram sobre o desenvolvimento de uma constante para o cálculo de concentrações de tensões em vigas com furo central submetidas à flexão não uniforme. Por meio da observação da distribuição de tensões ao longo dos elementos estruturais em estudo e da identificação das semelhanças entre eles constatou-se que tais semelhanças permitiram a criação de polinômios que relacionam as constantes de concentração de tensão com os valores de altura e diâmetro do furo da placa em questão.

Olanitori e Tifase (2019) pesquisaram sobre o efeito de pequenos furos de serviço transversal na resistência ao cisalhamento de concreto armado Vigas esbeltas. O estudo mostra que a carga final de vigas com furos de serviço depende do tamanho e da posição dos furos e do tipo de carregamento.

Os trabalhos mencionados neste tópico falam de vigas com furos, estes inseridos por meio de tubos na hora da concretagem da viga. Este trabalho tem como diferencial o fato de ser o primeiro em que os furos foram feitos nas vigas depois de prontas, o que o torna relevante.

Recomendações Normativas

A NBR 6118 (2014) define que furos têm dimensões pequenas em relação ao elemento estrutural, enquanto que aberturas são um conjunto de furos muito próximos.

Para que furos e aberturas que atravessam na direção da largura da viga não tragam prejuízos à peça estrutural, a NBR 6118 (2014) define limites sobre sua execução. Quando o projeto estrutural de uma edificação exigir furos e aberturas, estes devem ser calculados e detalhados levando em conta as perturbações das tensões que os contornam, prevendo, além de armaduras para resistir às forças de tração convencionais, também armaduras dispostas no contorno e nos cantos de furos e aberturas.

A NBR 6118 (2014) recomenda que, em qualquer caso, a distância mínima de um furo à face mais próxima da viga deve ser no mínimo igual a 5 cm e duas vezes o cobrimento previsto para essa face. A seção remanescente nessa região, tendo sido descontada a área ocupada pelo furo, deve ser capaz de resistir aos esforços previstos no cálculo, além de permitir uma boa concretagem.

Além disso, devem ser respeitadas, simultaneamente, para dispensa da verificação, as seguintes condições do item 13.2.5.1 da NBR 6118 (2014):

- a) furos em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo $2h$, onde h é a altura da viga;
- b) dimensão do furo de no máximo 12 cm e $h/3$;
- c) distância entre faces de furos, em um mesmo tramo, de no mínimo $2h$;
- d) cobrimentos suficientes e não seccionamento das armaduras.

MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão citados os materiais utilizados para confecção das vigas, como foram feitos a concretagem e os furos e o tipo de ensaio utilizado para a sua análise.

Materiais

Os materiais utilizados nas vigas serão melhor detalhados nos tópicos seguintes com suas respectivas características.

Aço

Para a confecção das armaduras foram utilizados aço CA-50 na bitola de 8 mm de diâmetro para armadura positiva e CA-60 na bitola de 5 mm de diâmetro para estribo e porta-estribo. Os vergalhões foram fixados com arame recozido. O aço utilizado é da empresa siderúrgica brasileira Gerdau. A seguir, na Tabela 1, têm-se as propriedades características dos vergalhões de aço utilizados para a confecção das peças.

Tabela 1 - Características dos aços utilizados nas vigas. São Paulo, Brasil, 2011.

CA	Diâmetro Nominal (DN) (mm)	Massa Nominal (Kg/m)	Resistência Característica de Escoamento (f_y) (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento em 100
50	8	0,395	500	1,08 x f_y	8%
60	5	0,154	600	660	5%

Fonte: Catálogo da Gerdau (2011).

Concreto

Para a confecção das vigas, foi utilizado um concreto com o respectivo traço em volume: 1:1,47:1,19 (cimento; agregado miúdo; agregado graúdo), com a relação água/cimento de 0,67. Na Tabela 2 encontra-se a composição do concreto.

Tabela 2 - Quantidade de materiais utilizados para um traço de concreto. Sobral, Ceará, Brasil, 2019.

Material	Tipo	Quantidade (m ³)
Cimento	CP II-E-32-RS	0,036
Agregado Miúdo	Natural	0,053
Agregado Graúdo	Granito	0,043
Água	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sobral (SAAE)	0,024

Fonte: Própria

As vigas apresentaram resistência característica à compressão média de 36,99 MPa, dado obtido por meio do ensaio de compressão axial de corpos de prova, e foram ensaiadas numa prensa automática.

Concretagem das vigas

Todas as vigas foram concretadas no mesmo dia, utilizando a mesma dosagem de concreto. O adensamento do concreto foi feito por meio de vibrador, para evitar a formação de ninhos de concretagem e segregação do material. Depois de concretadas, as vigas foram submetidas à cura

úmida, imersos em água por um período de sete dias, a fim de evitar a perda de água para o ambiente e garantir o processo de hidratação do cimento.

Confecção dos furos

Depois de prontas e com 28 dias de cura, as vigas foram furadas. Para isso utilizou-se a Perfuratriz DD 130 da marca Hilti, comumente utilizada para perfuração de concreto, passagem e abertura de tubulações e cabos. O dispositivo perfurante foi uma Serra Copo diamantada de 60 mm. Durante o processo de perfuração a viga sofreu muita vibração.

Dados das vigas

Foram ensaiadas cinco vigas de concreto armado com dimensões 10x15x110 cm; uma delas não apresentava abertura de alma (Viga V1) e quatro apresentavam abertura de alma em locais distintos (Vigas V2, V3, V4 e V5). Cada viga tinha duas armaduras de flexão na bitola de 8 mm, duas armaduras porta-estribos na bitola de 5mm e onze estribos com espaçamento entre eles de 10 cm também na bitola de 5mm. O cobrimento das vigas é de 20 mm. Os detalhes dos furos serão especificados no tópico 4.

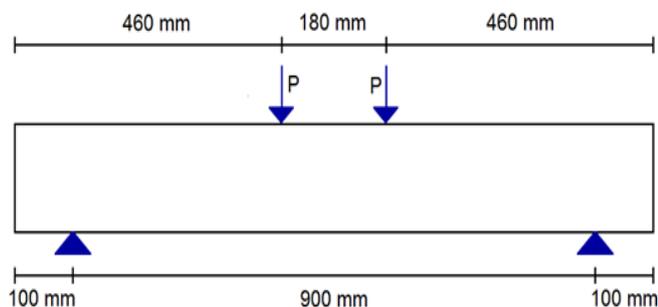
Ensaio utilizado

O ensaio usado foi o de Stuttgart, também conhecido como ensaio de quatro pontos. Esse foi o escolhido por se tratar de um ensaio clássico comumente usado na mecânica experimental para vigas de concreto armado. Consiste em carregar gradativamente uma viga retangular biapoiada com duas cargas concentradas simétricas, até que o aumento do carregamento leve a viga à ruptura, permitindo numa mesma peça a observação da flexão pura (sem a presença de cisalhamento) e da flexão simples (com a presença de cisalhamento).

Utilizou-se uma prensa, adaptada com uma bandeja metálica, com os dois apoios flexíveis distantes entre si 90 cm, e um dispositivo para a distribuição da carga em dois pontos simétricos. As distâncias escolhidas foram essas por conta dos

limites de espaço da prensa. A Figura 1 demonstra o esquema estrutural de aplicação das cargas e prensa preparada para o ensaio.

Figura 1 - Esquema estrutural de aplicação das cargas e prensa adaptada para o ensaio de Stuttgart. Sobral, Ceará, Brasil, 2019.



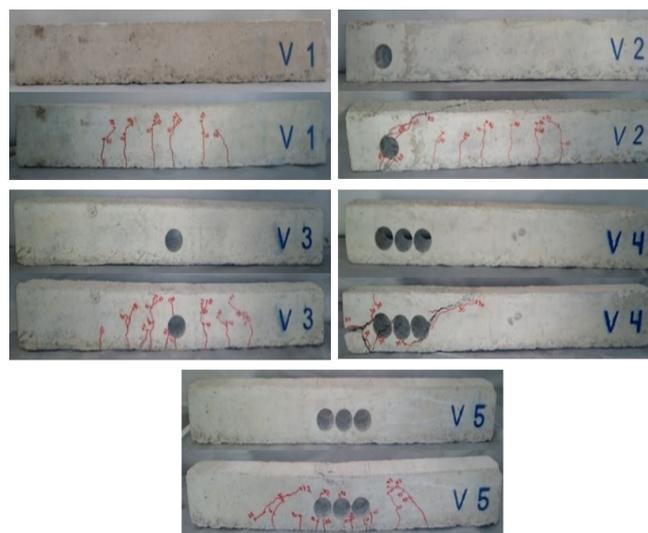
Fonte: Própria

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todas as vigas os incrementos de cargas foram de 20 kN. A seguir serão discutidos os resultados experimentais para cada uma delas. A figura 2 mostra as cinco vigas ensaiadas.

Até o carregamento de 40 kN não foi observada nenhuma fissura, nesse momento a viga encontrava-se no “estádio I”. As primeiras fissuras apareceram com o carregamento de 60 kN, indicando a passagem do “estádio I” para o “estádio II”, mantendo-se nesse estágio até o carregamento de 72 kN quando veio a romper, apresentando um total de seis fissuras visíveis. A ruptura ocorreu por flexão com deformação plástica excessiva do aço. A viga V1 pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Vigas antes e depois do ensaio com mapa de fissuração. Sobral, Ceará, Brasil, 2019.



Fonte: Própria

A viga V2 apresentava uma abertura na região próxima ao apoio na parte inferior. A viga permaneceu no “estádio I” até o carregamento de 40 kN, mudando para o “estádio II” com o carregamento de 60 kN. Manteve-se nesse estágio até o carregamento de 80 kN quando veio a romper, apresentando um total de oito fissuras visíveis. Em relação a viga V1 não houve uma expressiva mudança na carga de ruptura, porém a peça rompeu por cisalhamento (presença de grandes fissuras na região do apoio), com tração diagonal. A Figura 2 indica os detalhes da viga V2.

A viga V3 apresentava uma abertura na região central próxima à armadura positiva, teoricamente a zona mais adequada para prever aberturas em vigas, pois é uma zona de tração onde o responsável por absorver os esforços é o aço. A viga permaneceu no “estádio I” até o carregamento de 20 kN, mudando para o “estádio II” com o carregamento de 40 kN. Manteve-se nesse estágio até o carregamento de 73 kN quando veio a romper, apresentando um total de nove fissuras visíveis. Da mesma forma que a viga V1 a ruptura ocorreu por flexão com deformação plástica excessiva do aço. Comparando as vigas V2 e V3, percebe-se que a ruptura ocorreu de formas diferentes, indicando interferência da posição do furo na forma de ruptura da viga. A Figura 2 mostra os detalhes da viga V3.

A viga V4 apresentava três aberturas na região próxima ao apoio na parte inferior. Até o carregamento de 20 kN não foi observada nenhuma fissura, nesse momento a viga encontrava-se no “estádio I”. As primeiras fissuras apareceram com o

carregamento de 30 kN na região de flexão simples, próximas ao apoio, indicando a passagem do “estádio I” para o “estádio II” nessa região, rompendo com esse carregamento. A peça apresentou um total de quatro fissuras visíveis. A região de flexão pura permaneceu no “estádio I”. Pode-se observar na Figura 2 o aparecimento de muitas fissuras próximas ao furo. Da mesma forma que a viga V2, a ruptura ocorreu por cisalhamento com tração diagonal, confirmando a interferência da posição do furo na forma de ruptura da viga. Nota-se que a viga V4 apresentou a menor carga de ruptura entre todas as vigas, indicando interferência da quantidade de furos em regiões próximas ao apoio, na resistência da peça. A Figura 2 contém os detalhes da viga V4.

A viga V5 apresentava três aberturas na região central próxima à armadura positiva. A viga permaneceu no “estádio I” até o carregamento de 20 kN, mudando para o “estádio II” com o carregamento de 40 kN. Manteve-se nesse estágio até o carregamento de 72 kN quando veio a romper, apresentando um total de onze fissuras visíveis. Da mesma forma que as vigas V1 e V3 a ruptura ocorreu por flexão com deformação plástica excessiva do aço. Assim como a viga V3 não houve uma diminuição expressiva da carga de ruptura em relação à viga V1, podendo indicar que aberturas no meio inferior próximo à armadura positiva da peça não interferem na sua resistência. Os detalhes da viga V5 podem ser observados na Figura 2.

Para análise dos resultados serão abordadas as condições impostas pela NBR 6118 (2014) e depois será feita uma análise comparativa entre as condições reais das vigas.

Cálculo das recomendações da NBR 6118 (2014)

Utilizaram-se os dados das vigas ensaiadas para o cálculo das orientações da Norma, obtendo assim os valores mínimos ou máximos permitidos por ela.

A distância mínima de um furo à face mais próxima da viga será chamada de “A”, e deve ser no mínimo igual a 5 cm e duas vezes o cobrimento previsto para essa face. O cobrimento das vigas é de 2 cm, então “A” pode ser 5 cm ou 4 cm. Nesse caso “A” é igual a 4 cm, a fim de satisfazer a condição.

“B” será a distância mínima da face do apoio. “B” é igual a $2h$, sabendo-se que h é a altura da

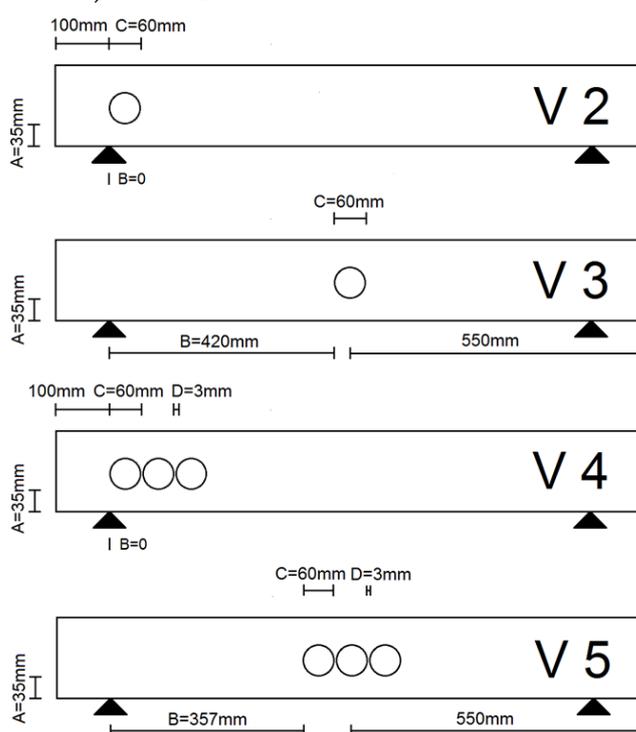
viga, que é de 15 cm. Logo B vale 30 cm. A dimensão máxima do furo será chamada de “C”, e deve ser no máximo 12 cm e $h/3$. Então “C” pode ser 12 cm ou 5 cm. Nesse caso “C” é igual a 5 cm a fim de satisfazer a condição.

A distância mínima entre faces de furos em um mesmo tramo será chamada de “D”, que é igual a $2h$, ou seja, igual a 30 cm. Os cobrimentos deverão ser suficientes e não pode haver o seccionamento das armaduras.

Análise comparativa das condições recomendadas pela NBR 6118 (2014) e condições reais das vigas

A Figura 3 mostra os detalhes e dimensões das vigas com furos e a Tabela 3 mostra as dimensões impostas pela NBR 6118 (2014) e dimensões reais das vigas. Por meio da Tabela 3 vê-se que “A”, ou seja, a distância do furo à face mais próxima das vigas é de 35 mm, o que se encaixa no que orienta a Norma. A dimensão dos furos das vigas “B” é de 60 mm, o que não desentoa muito da dimensão máxima de furo recomendada pela Norma. Os cobrimentos foram suficientes, porém houve o seccionamento (corte) das armaduras transversais (estribos) nas quatro vigas com furos. As outras condições serão analisadas a seguir para cada viga com furo.

Figura 3 - Detalhe e dimensões das vigas com furos. Sobral, Ceará. 2019.



Fonte: Própria

Tabela 3 - Dimensões impostas pela norma e dimensões reais das vigas. Sobral, Ceará, Brasil, 2019.

Condição	Norma (mm)	Viga	Viga	Viga	Viga
		2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)
A - Distância mínima do furo à face mais próxima da viga	40	35	35	35	35
B - Distância mínima da face do apoio	300	0	420	0	357
C - Dimensão máxima do furo	50	60	60	60	60
D - Distância mínima entre faces dos furos	300	-	-	3	3

Fonte: Própria

Viga V2

Por meio da Tabela 3 percebe-se que a distância mínima da face ao apoio da viga V2 não foi atendida segundo o que orienta a Norma, e isso não interferiu significativamente na resistência em relação à viga V1, o que era previsto, pois essa distância foi definida exatamente para questionar a veracidade da Norma. No entanto a viga V2 rompeu por cisalhamento com tração diagonal, o que pode ser explicado pelo fato de que no ato da perfuração houve corte de estribos numa região de flexão simples, e estes são responsáveis por resistir a esforços transversais de tração, além do mais é nessa região que se formam as bielas diagonais que precisam de concreto para resistir à compressão. A Figura 3 indica os detalhes da viga V2.

Viga V3

A Tabela 3 mostra que a distância da face do apoio à viga V3 está totalmente dentro da Norma. A presença do furo localizado no meio da viga na zona de tração não interferiu na resistência em relação à viga V1, nem na forma de ruptura, o que indica que as condições impostas pela Norma para esse tipo de localização do furo estão corretas. O fato dos

estribos cortados na viga V3 não interferiu na resistência da viga o que pode ser explicado em virtude de o furo está localizado em uma região de flexão pura, ou seja, não há cisalhamento, logo o estribo não tem função de resistir a cargas transversais de tração. Além do mais, não há formação de bielas nessa região, fazendo com que o volume de concreto retirado pelo furo não faça falta. A viga V3 pode ser observada na Figura 3.

Viga V4

De acordo com a Tabela 3 vê-se que, diferente do que orienta a Norma, a distância mínima da face do apoio da viga V4 aos furos não foi atendida, além da distância mínima entre as faces e os furos ter sido muito menor do que a Norma recomenda. Isso indica que esses fatores foram responsáveis pela perda significativa de resistência da viga V4, validando a Norma para esta situação. O fato dos estribos cortados na viga V4 tanto contribuiu, como também pode explicar a ruptura por cisalhamento com tração diagonal, visto que os furos estão localizados numa região de flexão simples, onde os estribos são responsáveis por resistirem a esforços transversais de tração. Além do mais é nessa região que se formam as bielas diagonais que precisam de concreto para resistir à compressão. A Figura 3 indica os detalhes da viga V4.

Viga V5

A Tabela 3 mostra que, assim como a viga V3, a distância da face do apoio aos furos da viga V5 está totalmente dentro da Norma. A presença dos furos localizados no meio da viga na zona de tração não interferiu na resistência em relação à viga V1, nem na forma de ruptura, o que indica que as condições impostas pela Norma para esse tipo de localização dos furos estão corretas. Assim como na viga V3, o fato de os estribos cortados na V5 não interferir na resistência da viga pode ser explicado por estarem os furos localizados em uma região de flexão pura, ou seja, não há cisalhamento, logo o estribo não tem função de resistir a cargas transversais de tração. Além do mais, não há formação de bielas nessa região, fazendo com que o volume de concreto retirado pelo furo não faça falta. A viga V5 pode ser observada na Figura 3.

Assim como constatado aqui, Silva, Pontes e Silva (2016) também mostraram que a passagem dos furos quanto mais próxima do apoio, atravessando a biela comprimida, é prejudicial à estrutura.

As vigas de Silva, Moreira e Silva (2014) tinham furos feitos antes da concretagem das vigas, e todas romperam por flexão, incluído as que tinham furos próximos aos apoios. Diferentemente, esse estudo traz uma análise de vigas com furos feitos depois de prontas, que, por consequência, danificaram as armaduras transversais, e, assim, propiciaram a ruptura por cisalhamento.

Os ensaios de Olanitori e Tifase (2019) obtiveram resultados semelhantes aos encontrados nesse artigo. Ambos os resultados mostraram que a carga final de vigas com furos depende da posição destes furos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presença de furos em diferentes localizações e quantidades influencia na resistência mecânica de vigas prontas de concreto armado. O modo de ruptura da peça também está relacionado com a localização dos furos, visto que furos localizados em regiões de flexão pura romperam por flexão e furos localizados em regiões de flexão simples romperam por cisalhamento.

Com base nos resultados obtidos, fica evidente que a NBR 6118 (2014) é satisfatória para o dimensionamento de furo na alma das vigas, apresentando orientações confiáveis. A Norma generaliza as condições para todas as regiões das vigas, porém, na região de flexão pura, a distancia entre as faces dos furos menor do que a Norma recomenda e o seccionamento das armaduras não interferiram na resistência das peças.

Este estudo tem como contribuição uma análise mais detalhada e quantitativa do que acontece quando se furam vigas depois de concretadas. Observa-se a importância de se prever a presença dos furos nas vigas no momento do projeto, para que os reforços das aberturas sejam calculados e dimensionados previamente. Vale apenas ressaltar, que essas conclusões se limitam apenas aos resultados experimentais encontrados das 5 vigas ensaiadas neste trabalho. Mais ensaios são necessários para validação desses resultados.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se o reforço de vigas prontas com furos por meio de

fibras, já que não dá para fazer um reforço de armação em vigas prontas, com o objetivo de encontrar possíveis soluções para essas situações.

AGRADECIMENTOS

À SIGNUS Construções pela execução das vigas de concreto armado.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual Vale do Acaraú pela valiosa contribuição.

REFERÊNCIAS

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

Aykaç, B. et al. Flexural Behavior and Strength of Reinforced Concrete Beams with Multiple Transverse Openings. *ACI Structural Journal*, v. 111, n. 23, p.267-278, 2014.

Gerdau. *Aço para construção civil*. Catálogo da Gerdau: São Paulo, 2011.

Mansur, M.A.; TAN, Kiang-Hwee; W. WENG. Analysis of Concrete Beams with Circular Web Openings Using Strut-And-Tie Models. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 2, p. 89-98, 2006.

Medeiros, R.O.; Medeiros, J.E.L. Vigas de Alma Vazada. *Revista Tecnologia*, p. 27-30, 1987.

Nunes, A.A. et al. Análise da Incompatibilização de Projetos em Obra Pública. *REINPEC*, v. 4, n. 2, p.13-276, 2018.

Olanitori, L.M.; Tifase, T.O. Effect of Small Transverse Service Holes on Shear Strength of Reinforced Concrete Slender Beams. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, Nigeria, v. 23, n. 3, p.539-543, 2019.

Schlaich, J.; Schafer, K; Jennewein, M. Toward a Consistent Design of Structural Concrete. *Pci Journal*, v. 32, n. 3, p.74-150, 1987.

Silva Neto, J.A. et al. Desenvolvimento de uma Constante para o Cálculo de Concentrações de Tensões em Vigas com Furo Central Submetidas à Flexão não Uniforme. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, v. 15, n. 3, p.66-82, 2018.

Silva, R.J.C.; Moreira, J.F.A.; Silva, R.F. Análise do Modelo de Bielas e Tirantes para Vigas de Concreto com Furos. *Essentia (Sobral/CE)*, v. 15, n. 2, p.67-87, dez. 2013/mai. 2014.

Silva, R.J.C.; Pontes, A.E.A.; Silva, R.F. Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado com Furos na Vertical. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, v. 13, p.21-41, jun. 2016.