

Manual de Construção em Aço



Projeto de Aberturas em Almas de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto

**PROJETO DE ABERTURAS EM
ALMAS DE VIGAS DE AÇO
E VIGAS MISTAS
DE AÇO E CONCRETO**

Série “Manual de Construção em Aço”

- Galpões para Usos Gerais
- Ligações em Estruturas Metálicas
- Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço
- Alvenarias
- Painéis de Vedação
- Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço
- Tratamento de Superfície e Pintura
- Transporte e Montagem
- Steel Framing: Arquitetura
- Interfaces Aço-Concreto
- Steel Framing: Engenharia
- Pontes e viadutos em vigas mistas
- Trelças tipo Steel Joist
- Viabilidade Econômica
- Dimensionamento de Perfis Formados a Frio conforme NBR 14762 e NBR 6355 (CD)
- Projeto e Durabilidade
- Estruturas Mistas Vol. 1 e 2
- Prevenção contra Incêndio no Projeto de Arquitetura
- Projeto de Abertura em Almas de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto

GUSTAVO DE SOUZA VERÍSSIMO
JOSÉ CARLOS LOPES RIBEIRO
RICARDO HALLAL FAKURY
JOSÉ LUIZ RANGEL PAES

PROJETO DE ABERTURAS EM ALMAS DE VIGAS DE AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

INSTITUTO AÇO BRASIL
CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO

**RIO DE JANEIRO
2012**

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por quaisquer meio, sem a prévia autorização desta Entidade.

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Informações do AçoBrasil/CBCA

V517p Veríssimo, Gustavo de Souza
Projeto de aberturas em almas de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto /
Gustavo de Souza Veríssimo, José Carlos Lopes Ribeiro, Ricardo Hallal Fakury, José
Luiz Rangel Paes. -- Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2012.
117p.; 29 cm. -- (Série Manual de Construção em Aço)

Bibliografia

ISBN 978-85-89819-31-2

1.Vigas de Aço 2. Ábacos de dimensionamento 3. Vigas Mistas I. Títulos (série) II. Ribeiro, José
Carlos Lopes III.Fakury, Ricardo Hallal IV. Paes, José Luiz Rangel.

CDU 692(035)

Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço
Av. Rio Branco, 181 / 28º Andar
20040-007 - Rio de Janeiro - RJ
e-mail: cbca@acobrasil.org.br
site: www.cbca-acobrasil.org.br

SUMÁRIO

Capítulo 1

Aberturas nas almas de vigas: teoria e tratamento prático	9
1.1 Introdução	10
1.2 Geometrias das aberturas em almas de vigas	11
1.3 Nomenclatura básica na região da abertura	12
1.4 Aspectos do comportamento das vigas com aberturas na alma	12
1.5 Parâmetros importantes que condicionam a influência das aberturas nas vigas	14
1.5.1 Considerações iniciais	14
1.5.2 Forma da abertura	14
1.5.3 Posição da abertura	14
1.6 Prescrições quanto a dimensões e posição das aberturas segundo a ABNT NBR 8800:2008	14
1.7 Sobre os trabalhos de Darwin, Lawson e Veríssimo <i>et al.</i>	15
1.8 Ábacos para projeto de aberturas sem reforço	16
1.8.1 Metodologia	16
1.8.2 Aplicabilidade	17
1.8.3 Requisitos adicionais para vigas mistas	20
1.8.4 Ábacos gerados	21
1.9 Cálculo da flecha em vigas com aberturas na alma	22

Capítulo 2

Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado	23
---	----

Capítulo 3

Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico	33
---	----

Capítulo 4

Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida	43
--	----

Capítulo 5

Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado	53
---	----

Capítulo 6

Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico	63
---	----

Capítulo 7

Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje	73
---	----

Capítulo 8

Exemplos de utilização dos ábacos	83
-----------------------------------	----

8.1 Determinação da zona neutra para aberturas retangulares concêntricas em viga de aço constituída por perfil I soldado	84
8.2 Determinação da zona neutra para aberturas retangulares excêntricas em viga de aço constituída por perfil I soldado	89
8.3 Projeto de aberturas circulares concêntricas em viga de aço constituída por perfil laminado	93
8.4 Projeto de aberturas circulares concêntricas em viga mista constituída por perfil laminado	96
8.5 Determinação da zona neutra para uma viga mista com perfil I laminado sujeita a cargas concentradas	99
8.6 Determinação da zona neutra para vigas com grandes aberturas	104
Capítulo 9	
Aberturas em Perfis U, Tubulares e Formados a Frio	109
9.1 Considerações preliminares	110
9.2 Aberturas em perfis U	110
9.3 Aberturas em perfis de seção tubular retangular	110
9.4 Aberturas em perfis tubulares circulares	110
9.5 Aberturas em perfis formados a frio (PFF)	111
Notação	112
Referências Bibliográficas	115

Apresentação

O setor siderúrgico, através do Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, tem a satisfação de tornar disponível para o universo de profissionais envolvidos com o emprego do aço na construção civil, mais este manual, de uma série relacionada à construção em aço.

A busca por uma utilização racional de recursos no projeto de edifícios com estrutura de aço muitas vezes induz à opção por soluções que propiciem a integração das instalações com a estrutura. Nesse sentido, o projeto de vigas de aço e mistas de aço e concreto com aberturas na alma para a passagem dos dutos de serviço das edificações tem sido cada vez mais demandado. Dessa forma, as instalações são integradas com as vigas dos sistemas de piso, reduzindo-se o espaço vertical necessário por pavimento e a altura total do edifício. Os benefícios são imediatos, em função da redução do consumo de materiais nas paredes, de revestimentos, de área de pintura, etc.

Outra situação em que as vigas com aberturas na alma se apresentam como solução adequada é quando planos diretores limitam a altura da edificação. A economia de espaço vertical atingida viabiliza um melhor aproveitamento arquitetônico.

Grande parte da pesquisa teórico-experimental sobre as vigas com aberturas na alma foi realizada nos Estados Unidos, tendo sido compilada e publicada por David Darwin em 1990 como guia de cálculo (Steel Design Guide Series 2) do American Institute of Steel Construction (AISC), entidade responsável pela norma americana de projeto de estruturas de aço. A exaustiva utilização dessa publicação no mercado americano e de diversos outros países desde então é evidência de sua aplicabilidade e consistência.

Neste manual são apresentados ábacos de dimensionamento para vigas com aberturas na alma, obtidos com o auxílio de um simulador computacional implementado com base no trabalho de Darwin, seguindo metodologia empregada na Dissertação de Mestrado de Gustavo de Souza Veríssimo, defendida na UFMG em 1996 e intitulada "Análise e Comportamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas com Aberturas na Alma", devidamente compatibilizada com os critérios da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008.

Tendo em vista que o cálculo manual de uma viga com aberturas é um processo muito trabalhoso, os ábacos propostos representam uma ferramenta útil e ágil para arquitetos e engenheiros envolvidos com o projeto de edifícios estruturados em aço.

Um trabalho técnico-científico contendo ábacos similares aos apresentados aqui, adaptados à gama de perfis laminados utilizada nos Estados Unidos, obtidos com o mesmo simulador, foram examinados e aprovados pelo conselho editorial do AISC e publicados no Engineering Journal em 2006, recebendo o prêmio de melhor trabalho do periódico naquele ano.

Centro dinâmico de serviços, com foco exclusivamente técnico e capacitado para conduzir uma política de promoção do uso do aço na construção, o CBCA está seguro de que este manual enquadra-se no objetivo de contribuir para a difusão de competência técnica e empresarial no País.

Capítulo 1

Aberturas nas almas de vigas:
teoria e tratamento prático

1.1 - Introdução

Recentemente, em todo o mundo, a preocupação com a sustentabilidade tem motivado a busca por soluções econômicas que racionalizem o aproveitamento de espaço, materiais, mão-de-obra e recursos diversos.

No Brasil, observa-se uma tendência de substituição da construção artesanal pela industrializada, com uma busca crescente por racionalização em todos os níveis do processo construtivo. Dentro dessa perspectiva, muitas vezes torna-se interessante a redução da altura dos andares e, conseqüentemente, da altura total da edificação, o que possibilita:

- melhor aproveitamento do espaço vertical envolvendo, por exemplo, a viabilização de certos arranjos arquitetônicos e até a criação de novos pavimentos, sem contrariar o gabarito de construção do município;
- redução do volume e da área total construída, o que leva a menores custos de execução e, posteriormente, de operação e manutenção.

Uma forma tradicional de reduzir a altura de uma edificação é a execução de aberturas nas vigas para passagem de dutos de instalações de ar condicionado, de transporte de água, de fiações elétricas, etc. No caso de pisos com estrutura de aço ou mista de aço e concreto, as vigas são, quase sempre, construídas com perfis I de aço e as aberturas são feitas na alma desses perfis, como ilustra a Figura 1.1.

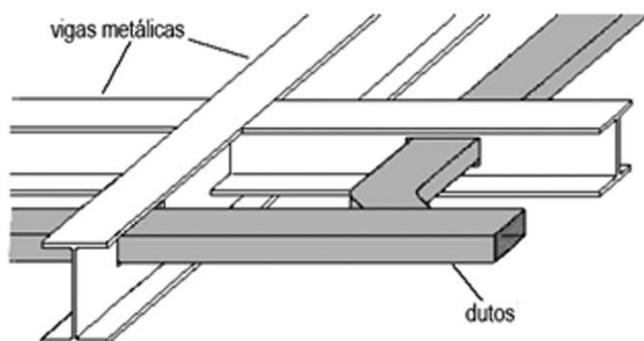


Figura 1.1 – Vigas de aço com aberturas na alma.

No entanto, a presença de aberturas pode reduzir a capacidade resistente e a rigidez das vigas, o que muitas vezes leva à necessidade de se usar sistemas especiais de reforço. Além disso, conduz a situações em que a determinação dos esforços resistentes (momento fletor e força cortante) se torna muito trabalhosa.

O desenvolvimento de sistemas sofisticados de instalações, com os dutos ganhando maiores dimensões, provocou, na década de 1960, a utilização de reforços que envolviam toda a abertura na alma (Figura 1.2), e que oneravam consideravelmente a fabricação das vigas. Até essa época não existia um critério de cálculo consolidado e havia pouca informação disponível sobre as mudanças de comportamento estrutural provocadas por aberturas nas almas de vigas. Não se sabia com certeza se o reforço proposto para determinada situação era de fato necessário, ou adequado. Têm-se registros de casos em que os reforços chegaram a representar 3% do peso das vigas de aço (Redwood, 1983).

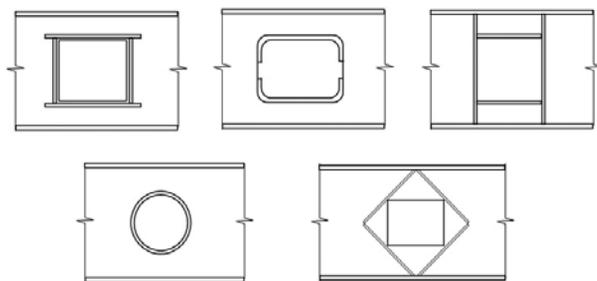


Figura 1.2 – Reforços envolvendo a abertura.

Estudos mais recentes (Darwin & Lucas, 1990) têm demonstrado que se o reforço for necessário, geralmente apenas enrijecedores horizontais acima e abaixo da abertura (Figura 1.3) são suficientes. Enrijecedores verticais ou em toda a periferia da abertura não se mostram interessantes no que se refere à relação entre aumento da capacidade resistente e custos.

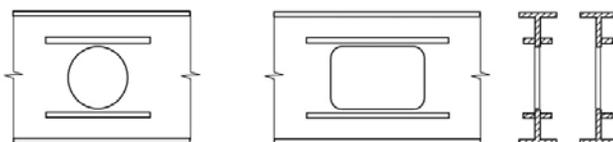


Figura 1.3 – Reforços com enrijecedores horizontais acima e abaixo da abertura.

O uso de dutos similares nos vários pavimentos e a previsão de alteração do leiaute ou da função de uma edificação ao longo de sua vida útil podem resultar na padronização de aberturas (com ou sem reforços) em muitas vigas. Essa padronização é importante na redução dos custos de fabricação, que se tornam ainda menores caso as aberturas sejam projetadas de forma a não necessitarem de reforços.

A Figura 1.4 mostra a estrutura de aço de um edifício de andares múltiplos em que aberturas nas almas das vigas foram muito utilizadas. Trata-se de um caso onde a interação entre arquitetos, engenheiros e profissionais de instalações resultou em alto grau de padronização, com resultado final compensador.



Figura 1.4 – Vigas de piso com aberturas nas almas.

Com os avanços tecnológicos experimentados nas últimas décadas, a integração de tecnologias CAD, CAE e CAM possibilita um detalhamento preciso (Figura 1.5) e grande agilidade na fabricação das vigas com aberturas nas almas (Figura 1.6).



Figura 1.5 - Detalhamento digital das aberturas.



Figura 1.6 – Fabricação automatizada.

1.2 - Geometrias das aberturas em almas de vigas

Embora possam ser feitas aberturas na alma de um perfil de aço com geometria qualquer, as mais comuns são circular, quadrada e retangular, como mostra a Figura 1.7.

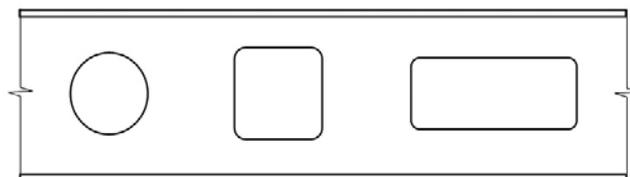


Figura 1.7 – Geometrias usuais de aberturas em alma de perfis de aço.

Salienta-se que as vigas casteladas com aberturas hexagonais ou octogonais, como as mostradas nas Figuras 1.8a e 1.8b, assim como as vigas celulares (Figura 1.8c), não se enquadram na categoria de vigas com aberturas na alma contempladas neste trabalho. Por apresentarem um comportamento estrutural diferenciado, caracterizado por modos de colapso específicos, essas vigas, denominadas vigas alveolares, exigem um modelo de cálculo apropriado (ver Silveira et al., 2011).

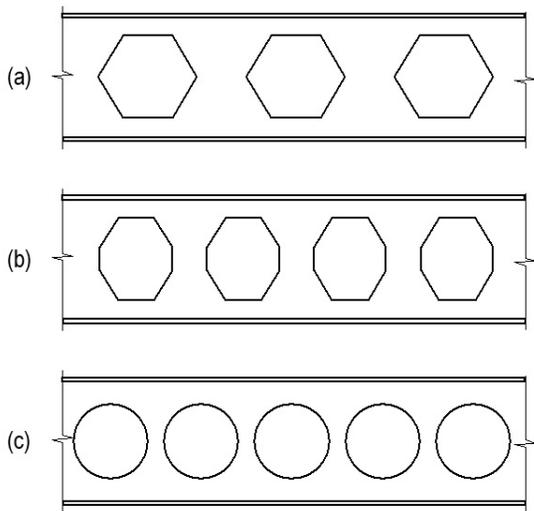


Figura 1.8 - Vigas alveolares: (a) casteladas com aberturas hexagonais; (b) casteladas com aberturas octogonais; (c) celulares.

1.3 - Nomenclatura básica na região da abertura

A parte da seção transversal situada acima de uma abertura na alma de um perfil I é denominada “tê superior” e a parte abaixo “tê inferior”, como mostra a Figura 1.9.

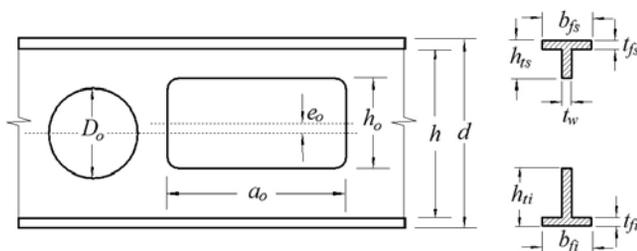


Figura 1.9 – Elementos de uma abertura na alma de um perfil I.

Nota-se que o diâmetro (e altura) das aberturas circulares é representado por D_o . Nas aberturas retangulares, o comprimento é representado por a_o e a altura por h_o . Nestas, dá-se o nome de “razão de aspecto” ao quociente entre a_o e h_o . Quando a razão de aspecto é igual a 1,0, obviamente, a abertura é quadrada.

As aberturas podem ser concêntricas ou excêntricas em relação à semialtura da seção transversal da viga, e essa condição é definida pela distância e_o . Quando essa distância é nula, tem-se uma abertura concêntrica. Quando é diferente de zero, uma abertura excêntrica.

1.4 - Aspectos do comportamento das vigas com aberturas na alma

As vigas de aço de pisos de edificações normalmente possuem perfil I fletido em relação ao eixo centroidal perpendicular à alma (eixo de maior momento de inércia, referido usualmente como x-x) e as vigas mistas também normalmente têm como elemento de aço um perfil I fletido em relação a um eixo perpendicular à alma. Essas vigas, na maioria das vezes, são birrotuladas e estão submetidas a um carregamento simétrico em relação ao centro do vão. Assim, nos trechos centrais, onde os momentos fletores são maiores, as forças cortantes são reduzidas, e nos trechos próximos dos apoios, as forças cortantes são elevadas e os momentos fletores pequenos. Nessas circunstâncias, a maioria das normas de projeto, inclusive a brasileira ABNT NBR 8800:2008, admite que os dois esforços sejam tratados isoladamente para efeito de dimensionamento estrutural.

De modo geral, as tensões normais decorrentes do momento fletor podem causar nas vigas de aço birrotuladas colapso por plastificação total da seção transversal (formação de rótula plástica), flambagem local da alma (FLA), flambagem local da mesa comprimida (FLM) ou ainda flambagem lateral com torção (FLT). Quando essas vigas pertencem a pisos de edificações, na maioria das vezes, a FLT não ocorre em virtude de a mesa comprimida do perfil de aço ter o deslocamento lateral impedido por laje de concreto ou algum outro componente estrutural equivalente. Nas vigas mistas birrotuladas, as tensões normais podem causar colapso por plastificação total da seção transversal ou flambagem local da alma do perfil de aço. As tensões de cisalhamento decorrentes da força cortante podem causar, tanto nas vigas de aço quanto nas mistas, colapso por plastificação ou flambagem da alma do perfil de aço.

A capacidade resistente da viga ao

momento fletor depende das propriedades mecânicas dos materiais utilizados (apenas o aço nas vigas de aço e o aço e o concreto nas vigas mistas), da intensidade e distribuição das tensões normais residuais e das dimensões da seção transversal.

Na determinação do momento resistente quanto ao colapso por formação de rótula plástica, o módulo de resistência plástico da seção é a propriedade geométrica determinante, que é facilmente obtida nas vigas de aço e também nas mistas, mas neste último caso depende de considerações adicionais envolvendo a participação de dois materiais distintos (aço do perfil e concreto da laje) e a posição da linha neutra plástica (LNP), que pode se situar na laje de concreto, na mesa superior ou na alma do perfil de aço. No colapso por flambagem local, os módulos de resistência elásticos e as razões entre largura e espessura dos elementos constituintes do perfil de aço são também propriedades geométricas determinantes.

A capacidade resistente à força cortante, de acordo com a prática usual referendada pelas normas de projeto, é função da alma do perfil I, tanto nas vigas de aço quanto nas mistas, ou seja, da resistência ao escoamento por cisalhamento do aço, das tensões residuais de cisalhamento e das dimensões (altura e espessura) desse elemento. Na determinação da força cortante resistente, usa-se como propriedade geométrica a área efetiva de cisalhamento (área pela qual a força cortante deve ser dividida para se chegar, em valor aproximado, à máxima tensão de cisalhamento), igual ao produto entre a altura total da seção transversal do perfil de aço e a espessura da alma.

Quando se faz uma abertura na alma de um perfil de aço, parte desse elemento é eliminada, o que reduz significativamente sua área e, em proporção muito menor, os módulos de resistência elástico e plástico da seção transversal. Logo, em qualquer ponto,

ao longo dessa abertura, as tensões normais e de cisalhamento ampliadas em função da redução da seção podem assumir valores significativos, e a interação entre ambas precisa ser considerada.

A determinação da capacidade resistente de uma viga na seção da abertura é complexa, e uma solução genérica deve prever inclusive a possibilidade de aberturas excêntricas. Nesse caso, por exemplo, a linha neutra plástica (LNP) pode assumir diversas posições, dependendo da geometria da seção e da abertura, e para cada uma delas ter-se-á uma equação de capacidade resistente. A situação se complica ainda mais no caso das vigas mistas, devido à presença da laje, que possibilita ainda outras posições para a LNP. Além disso, as condições de contorno da alma se modificam completamente. Enquanto esse elemento originalmente é uma chapa apoiada em duas bordas longitudinais (as mesas), na região da abertura é uma chapa apoiada em uma borda (mesa) e livre na outra (extremidade da abertura), ficando mais susceptível à flambagem local.

Nas décadas de 1960, 1970 e 1980, diversos estudos sobre vigas com aberturas na alma foram conduzidos nos Estados Unidos e Canadá, abordando casos particulares, tais como aberturas circulares, aberturas retangulares, aberturas concêntricas, aberturas excêntricas, aberturas em vigas de aço e aberturas em vigas mistas. No final dos anos 1980, Darwin & Donahey (1988) e Darwin & Lucas (1990) demonstraram ser possível fazer uma abordagem unificada abrangendo os diversos casos frequentes. Desses estudos resultou o trabalho de Darwin (1990), publicado como guia de cálculo do American Institute of Steel Construction (AISC), entidade responsável pela norma americana de projeto de estruturas de aço, que trata do assunto de forma abrangente.

Algumas normas de projeto, como a brasileira ABNT NBR 8800:2008, a britânica BSI:2000 e a canadense CSA:2003 fornecem regras simples para a execução de aberturas que não causem redução significativa da capacidade resistente das vigas. No entanto, por terem fundamentação generalista, essas regras são conservadoras e se restringem a aberturas circulares posicionadas dentro do terço médio da altura do perfil e nos dois quartos centrais do vão da viga.

1.5 - Parâmetros importantes que condicionam a influência das aberturas nas vigas

1.5.1 Considerações iniciais

Em obras correntes, as empresas de instalações com frequência indicam a colocação de aberturas nas vigas sem conhecimento de aspectos importantes de engenharia estrutural. Portanto, cabe enfatizar alguns dos parâmetros que devem nortear o planejamento dessas aberturas em vigas de piso. Como explicitado anteriormente, na sua grande maioria, as vigas de aço e mistas são constituídas por perfis I, nos quais a alma é responsável por resistir à força cortante. A execução de uma abertura implica na eliminação de parte desse elemento e, conseqüentemente, afeta mais a capacidade resistente à força cortante do que ao momento fletor (a maior parte do momento fletor é resistida pelas mesas nas vigas de aço e pelas mesas juntamente com a laje de concreto nas vigas mistas).

1.5.2 Forma da abertura

A concentração de tensões nas imediações das aberturas circulares é menor do que nos cantos de aberturas quadradas e retangulares, onerando menos a capacidade resistente da viga. Isso significa que, podendo-se optar, a forma circular deve ser escolhida.

1.5.3 Posição da abertura

Em relação ao comprimento da viga, deve-se procurar posicionar as aberturas longe dos pontos sujeitos a valores altos de força cortante, como apoios e seções de atuação de forças concentradas. Como já foi explicitado, a capacidade resistente à força cortante é muito afetada pelas aberturas na alma.

As aberturas devem ser projetadas, preferencialmente, centradas em relação à altura do perfil de aço. Em algumas situações, no entanto, isso não é possível. É comum que dutos condutores de fluidos necessitem de caimento ao longo do comprimento, exigindo aberturas com excentricidade variável em um conjunto de vigas de piso paralelas. Nesse caso, e em casos similares, pode ser impossível evitar a execução de aberturas excêntricas, mas sempre se deve procurar situar o centro dessas aberturas o mais próximo possível da semialtura do perfil de aço.

1.6 - Prescrições quanto a dimensões e posição das aberturas segundo a ABNT NBR 8800:2008

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, em seu Anexo I, admite a execução de aberturas concêntricas e excêntricas sem reforço nas almas de vigas de aço birrotuladas, prismáticas, com seção em forma de I simétrica em relação ao eixo de menor inércia, fletidas em relação ao eixo de maior inércia, sem a necessidade de cálculos específicos considerando os efeitos dessas aberturas. No entanto, as aberturas têm que ser circulares, as almas das vigas devem possuir relação entre altura e espessura, h/t_w , de no máximo $3,76\sqrt{E/f_y}$, e a mesa comprimida deve apresentar relação entre metade da largura e espessura, $b_{fc}/(2t_{fc})$, de no máximo $0,38\sqrt{E/f_y}$, onde E é módulo de elasticidade e f_y a resistência ao escoamento do aço. Além disso, deve-se ter (ver Figura 1.10):

- carregamento atuante uniformemente distribuído;
- aberturas situadas dentro do terço médio da altura e nos dois quartos centrais do vão da viga;
- distância entre os centros de duas aberturas adjacentes, medida paralelamente ao eixo longitudinal da viga, de no mínimo 2,5 vezes o diâmetro da maior dessas duas aberturas;
- força cortante solicitante de cálculo nos apoios no máximo igual a 50% da força cortante resistente de cálculo da viga.

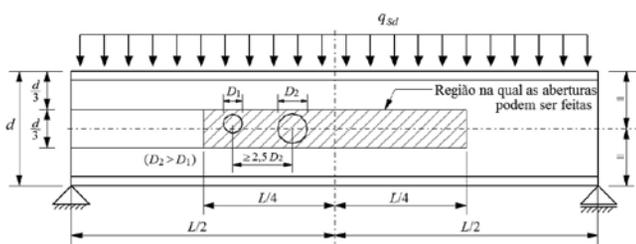


Figura 1.10 - Condições para execução de aberturas circulares sem reforço (ABNT NBR 8800:2008).

As regras apresentadas podem ser também aplicadas a vigas mistas de aço e concreto, desde que o perfil de aço atenda aos requisitos apresentados, exceto o referente à relação entre largura e espessura da mesa comprimida.

Deve-se observar que as prescrições da ABNT NBR 8800:2008, a rigor iguais às da norma canadense CSA:2003, somente permitem o emprego de aberturas sem reforço, sem complexos cálculos complementares, em situações muito particulares. Isso, evidentemente, limita e dificulta bastante o trabalho dos projetistas, uma vez que tais cálculos, como já foi explicitado anteriormente, são trabalhosos e demandam tempo considerável.

Procurando fornecer uma orientação aos projetistas, a ABNT NBR 8800:2008 indica que os cálculos complementares, quando

necessários, podem ser executados conforme os trabalhos de Lawson (1987), Darwin (1990) e Veríssimo *et al.* (2006).

1.7 - Sobre os trabalhos de Law-son, Darwin e Veríssimo *et al.*

Darwin (1990), em seu trabalho, incorporou estudos anteriores de Lawson (1987), fornecendo procedimentos de cálculo para determinação da capacidade resistente de vigas de aço e mistas com perfil I com aberturas na alma. Esses procedimentos envolvem aberturas circulares, quadradas e retangulares, com e sem reforço, concêntricas e excêntricas, com altura de até 70% da altura do perfil de aço.

O trabalho de Darwin (1990), com a chancela do AISC, conquistou confiabilidade e reconhecimento internacional e, como consequência, tem tido amplo emprego por projetistas de várias partes do mundo. Nesse trabalho, foram previstos determinados modos de colapso, e estabelecidas diversas restrições para que outros modos de colapso não pudessem ocorrer. Essas restrições referem-se basicamente à geometria do perfil de aço, às dimensões e posicionamentos das aberturas, à razão de aspecto das aberturas retangulares, ao modo de execução dos cantos das aberturas quadradas e retangulares, ao tipo de carregamento atuante e à posição de atuação de eventuais forças concentradas.

Veríssimo *et al.* (2006), com base em Darwin (1990), desenvolveram um simulador computacional que levou a um conjunto de ábacos que fornecem, de maneira direta, os tamanhos de abertura possíveis e as posições em que essas aberturas podem ser colocadas na alma de perfis laminados W americanos de vigas de aço e de vigas mistas de aço e concreto, sem a necessidade de reforços. Esses pesquisadores utilizaram como referência principal um trabalho precedente (Veríssimo, 1996), no qual foi elaborado um programa

Aberturas nas almas de vigas: teoria e tratamento prático

computacional que serviu como base para o simulador citado.

1.8 - Ábacos para projeto de aberturas sem reforço

1.8.1 Metodologia

Com base na formulação e nos critérios apresentados por Darwin (1990), devidamente compatibilizados com os princípios da ABNT NBR 8800:2008, implementou-se aqui um simulador computacional, similar ao de Veríssimo *et al.* (2006), capaz de mapear a região da alma da viga na qual uma abertura com determinadas características, sem reforços, tenha influência desprezável nas capacidades resistentes à força cortante e ao momento fletor. Essa região, chamada de zona neutra, é

representada pela área hachurada mostrada na Figura 1.11.

A zona neutra se origina no centro do vão e se estende igualmente nos sentidos dos dois apoios da viga, devendo ser considerada sempre centrada em relação à semialtura do perfil de aço, conforme mostrado na Figura 1.11.

Com o simulador computacional, foram gerados ábacos cujas curvas representam envoltórias que cobrem os casos mais críticos sob o ponto de vista de capacidade resistente, e que permitem a identificação imediata da zona neutra para vigas com aberturas circulares, quadradas e retangulares, concêntricas e excêntricas (ver Figura 1.12).

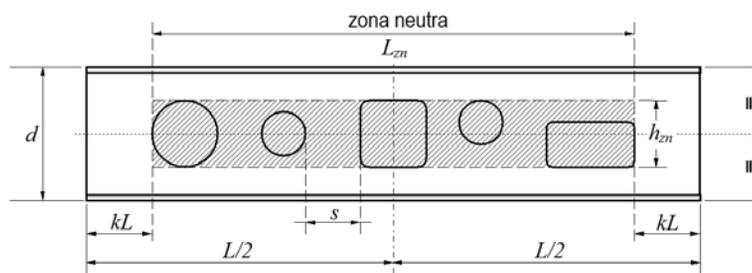


Figura 1.11 – Delimitação da zona neutra.

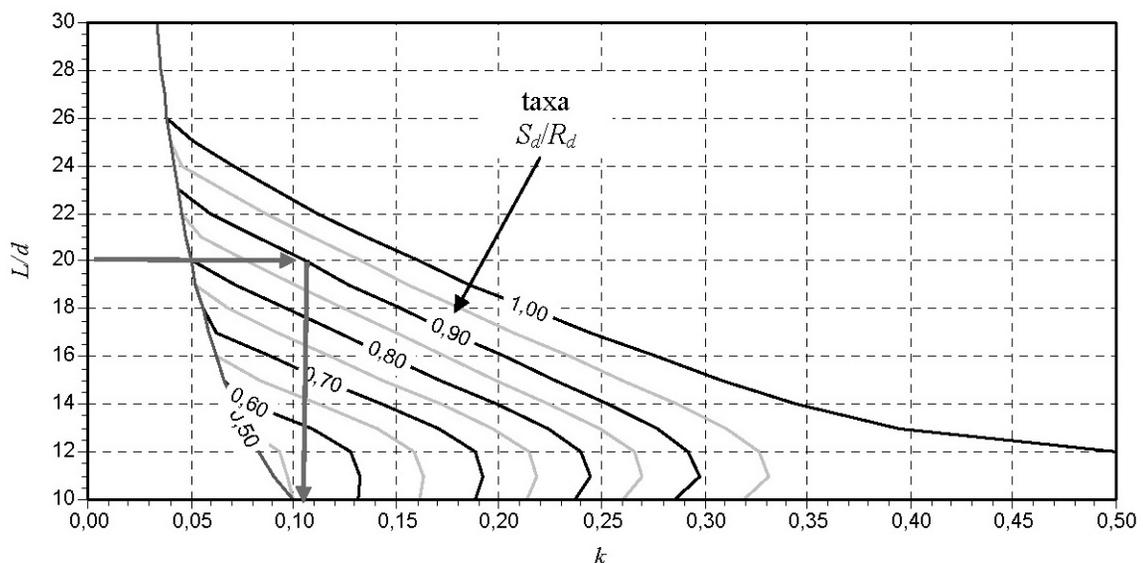


Figura 1.12 – Exemplo de um ábaco de zona neutra.

O parâmetro kL que aparece na Figura 1.11 representa a fração do comprimento da viga que define o início e o fim da zona neutra. O valor de k é obtido no ábaco compatível com a situação tratada (viga de aço ou viga mista; abertura circular, quadrada ou retangular; perfil soldado duplamente simétrico ou monossimétrico ou perfil laminado, altura da zona neutra em relação à altura do perfil), a partir dos dois dados de entrada seguintes:

1) razão entre o vão da viga e a altura da seção transversal do perfil de aço (L/d);

2) taxa de sollicitação (razão S_d/R_d) da viga, igual ao maior valor entre M_{Sd}/M_{Rd} e V_{Sd}/V_{Rd} , em que M_{Sd}/M_{Rd} é a máxima relação entre os momentos fletores sollicitante e resistente de cálculo e V_{Sd}/V_{Rd} a máxima relação entre as forças cortantes sollicitante e resistente de cálculo na viga, ambas determinadas sem considerar as aberturas, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

Na Figura 1.12 é ilustrado o procedimento de busca do valor de k para uma viga hipotética com relação $L/d = 20$ e com taxa de sollicitação $S_d/R_d = 0,90$. Para essas condições, o valor de k é aproximadamente igual a 0,105. Isso significa que a zona neutra se inicia em $0,105L$ e termina em $(L - 0,105L)$.

A altura da zona neutra está vinculada ao próprio ábaco. Cada ábaco é gerado para uma altura específica dessa zona, que se relaciona com a altura total do perfil. Evidentemente, deve-se escolher um ábaco que contemple uma altura de zona neutra que envolva a abertura pretendida.

Quando a abertura possui alguma excentricidade em relação à semialtura do perfil (abertura excêntrica), a altura da zona neutra é dada por:

$$h_{zn} = H_o + 2e_o$$

onde H_o é a altura das aberturas quadradas ou retangulares (h_o) ou o diâmetro das aberturas circulares (D_o).

Se a abertura é centrada em relação à semialtura do perfil (abertura concêntrica), a excentricidade e_o é nula e a altura da zona neutra é igual à altura da abertura pretendida.

Exemplos mais detalhados de utilização dos ábacos são apresentados no Capítulo 8.

1.8.2 Aplicabilidade

1.8.2.1 Generalidades

Os ábacos fornecidos neste trabalho foram desenvolvidos de modo a permitir ao projetista da estrutura que identifique a região em que podem ser feitas aberturas circulares, quadradas ou retangulares sem reforço (zona neutra – ver Figura 1.11), e os tamanhos dessas aberturas, nas almas de vigas de aço e de vigas mistas birrotuladas com relação $10 \leq L/d \leq 30$. Nas aberturas retangulares, é prevista razão de aspecto na faixa de 1:1 ($a_o = h_o$, o que indica abertura quadrada) até 2:1 ($a_o = 2h_o$). Esses limites estão relacionados a exigências mínimas para assegurar a estabilidade da alma nas bordas da abertura, bem como a resultados experimentais que respaldam os modelos analíticos utilizados.

Nos subitens 1.8.2.2 e 1.8.2.3, respectivamente, são descritas as condições que as vigas de aço e as vigas mistas precisam cumprir para que os ábacos possam ser utilizados com segurança. Se todas as condições não forem cumpridas, deve-se efetuar uma verificação rigorosa das regiões das aberturas por meio de uma formulação analítica adequada ou por análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos.

Aberturas nas almas de vigas: teoria e tratamento prático

1.8.2.2 Vigas de aço

Nas vigas de aço, o uso dos ábacos está condicionado ao atendimento das condições relacionadas a seguir.

a) Tipos de perfil

São previstos os seguintes perfis:

- I laminado, fletido em relação ao eixo de maior momento de inércia, com altura da seção transversal (d) entre 200 mm e 620 mm, razão entre altura da seção transversal e largura das mesas (d/b_f) igual ou superior a 1,20, razão entre espessuras das mesas e da alma (t_f/t_w) situada entre 1,0 e 1,79 e razão entre altura da seção transversal e espessura das mesas (d/t_f) entre 15,5 e 53,2;

- I soldado duplamente simétrico não híbrido, fletido em relação ao eixo de maior momento de inércia, com altura de seção transversal (d) entre 200 mm e 2000 mm, razão entre altura da seção transversal e largura das mesas (d/b_f) entre 1,50 e 2,86, razão entre espessuras das mesas e da alma (t_f/t_w) situada entre 1,0 e 3,13 e razão entre altura da seção transversal e espessura das mesas (d/t_f) entre 12 e 88;

- I soldado monossimétrico não híbrido com mesas de mesma largura (b_f) e espessuras diferentes (t_{fi} na mesa inferior e t_{fs} na superior), fletido em relação ao eixo de maior momento de inércia, com altura máxima de seção transversal (d) entre 200 mm e 650 mm, razão entre altura da seção transversal e largura das mesas (d/b_f) igual ou superior a 1,20, razão entre espessuras da mesa mais fina e da alma situada entre 1,19 e 1,98, razão entre espessuras da mesa mais grossa e da alma situada entre 1,51 e 3,02, razão entre as espessuras das duas mesas situada entre 0,50 e 0,84 e razão entre altura da seção transversal e espessura da mesa mais grossa entre 12,0 e 52,6.

b) Aço estrutural do perfil

O aço estrutural do perfil deve possuir resistência ao escoamento (f_y) máxima de 350 MPa.

c) Propriedades do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor

A seção transversal do perfil de aço deve possuir dimensões tais que o colapso da viga sem aberturas sob efeito do momento fletor se dê por plastificação total da seção transversal (formação de rótula plástica). Assim, para que não ocorra flambagem local da alma (FLA), deve-se ter:

- nos perfis I duplamente simétricos

$$\frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- nos perfis I monossimétricos

$$\frac{h_c}{t_w} \leq \begin{cases} \frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left(\frac{0,54 M_{pl}}{W_{x,\min} f_y} - 0,09 \right)^{-2} \\ 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

onde h_c e h_p são duas vezes a distância da face interna da mesa comprimida ao centro geométrico e à linha neutra plástica da seção transversal, respectivamente, M_{pl} é o momento de plastificação e $W_{x,\min}$ o módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

Para que não ocorra flambagem local da mesa comprimida (FLM), é necessário que:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Para que a flambagem lateral com torção (FLT) não se manifeste, é preciso que:

$$\frac{L_b}{r_{yc}} \leq 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

onde r_{yc} é o raio de giração da seção T formada pela mesa comprimida e a parte comprimida da alma anexa, em regime elástico, em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (em perfis I duplamente simétricos é igual ao raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma, representado por r_{yc}).

d) Tipo de carregamento

É admitida a atuação de qualquer tipo de carregamento, desde que produza apenas força cortante e momento fletor em torno do eixo de maior inércia, e com momento fletor e força cortante solicitantes de cálculo na seção correspondente ao centro de todas as aberturas menores ou iguais aos respectivos valores desses esforços na mesma posição, em valor absoluto, numa viga birrotulada de mesmo vão, sujeita à máxima carga uniformemente distribuída de cálculo possível. Adicionalmente, para evitar problemas localizados, as forças concentradas devem estar aplicadas a pelo menos d da borda de qualquer abertura e a alma do perfil de aço deve possuir:

$$\frac{h}{t_w} \leq 3,06 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Como opção, admite-se que forças concentradas estejam aplicadas a uma distância entre $d/2$ e d da borda de uma abertura, desde que:

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

e ainda

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 0,32 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

e) Estabilidade do tê comprimido

Nas vigas de aço com aberturas quadradas ou retangulares, quando $h_{zn} > 0,5d$, o tê comprimido deve ser verificado como uma barra axialmente comprimida. Essa verificação deve ser feita conforme a ABNT NBR 8800:2008, considerando:

- a força axial de compressão solicitante de cálculo no tê como igual ao momento fletor solicitante de cálculo no centro da abertura dividido pela distância entre os centros geométricos dos tês superior e inferior;

- a força axial de compressão resistente de cálculo obtida com base nos estados-limites últimos de instabilidade por flexão em relação ao eixo centroidal do tê perpendicular à alma e flambagem local da alma, com o comprimento de flambagem tomado simplificadaamente como igual ao comprimento da abertura (a_o)

A flambagem local da mesa comprimida não ocorre em virtude da limitação imposta para a razão entre sua largura e para FLM sob momento fletor, indicada na alínea c) precedente.

f) Espaçamento mínimo entre aberturas

Para evitar considerações complexas sobre interação entre aberturas, o espaçamento livre (s) mínimo entre bordas de duas aberturas adjacentes deve satisfazer às seguintes relações:

- em aberturas quadradas e retangulares

$$s \geq \begin{cases} h_o \\ a_o \frac{1,1V_{sd}/V_{pl}}{1 - 1,1V_{sd}/V_{pl}} \end{cases}$$

- em aberturas circulares:

$$s \geq \begin{cases} 1,5 D_o \\ D_o \frac{1,1V_{sd}/V_{pl}}{1 - 1,1V_{sd}/V_{pl}} \end{cases}$$

onde V_{sd} é a maior força cortante solicitante de cálculo no trecho entre os centros de duas aberturas adjacentes e V_{pl} é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento na viga sem aberturas, determinada de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

g) Cantos das aberturas

Os cantos das aberturas quadradas e retangulares devem ter um raio mínimo de duas vezes a espessura da alma do perfil I ($2t_w$) ou 16 mm, o que for maior, para evitar problemas de fadiga, em função de concentração de tensões.

1.8.2.3 Vigas mistas

Nas vigas mistas, para uso dos ábacos, devem ser obedecidas as mesmas condições das vigas de aço, exceto aquela relacionada à estabilidade do tê comprimido, mencionada na alínea e) anterior.

Além disso, para que o colapso das vigas mistas sem aberturas sob efeito do momento fletor se dê por plastificação total da seção transversal, as condições relacionadas à FLM e à FLT, mencionadas na alínea c) precedente não são necessárias e a condição relacionada à FLA, também mencionada na alínea c) precedente, fica restrita à equação dos perfis I duplamente simétricos.

Adicionalmente, o espaçamento entre bordas de duas aberturas adjacentes numa viga mista deve satisfazer também à relação:

$$s \geq 2d$$

Por fim, as vigas mistas, que podem possuir interação completa ou parcial, devem ter:

- concreto da laje de densidade normal, com resistência característica à compressão (f_{ck}) menor ou igual a 45 MPa;

- espessura total da laje (que pode ser maciça ou com fôrma de aço incorporada) igual ou inferior a 160 mm;

- largura efetiva da laje igual ou inferior a 3000 mm.

As vigas mistas devem ainda atender aos requisitos dispostos em 1.8.3.

1.8.3 Requisitos adicionais para vigas mistas

Além das condições descritas em 1.8.2.3, vigas mistas com aberturas na alma devem atender também aos requisitos a seguir.

a) Armadura de reforço

As lajes tendem a apresentar fissuras nas vizinhanças de uma abertura na alma de uma viga. Essas fissuras devem ser controladas por armaduras adicionais, longitudinal e transversal ao eixo da viga, dispostas em um quadrado centrado na abertura, com lados de comprimento igual a L_{cc} (comprimento de cisalhamento da laje - ver Figura 1.13), com:

$$L_{cc} \geq \begin{cases} 2d + L_o \\ 3L_o \end{cases}$$

onde L_o é o comprimento da abertura, ou seja, igual a a_o nas aberturas quadradas e retangulares e D_o nas aberturas circulares.

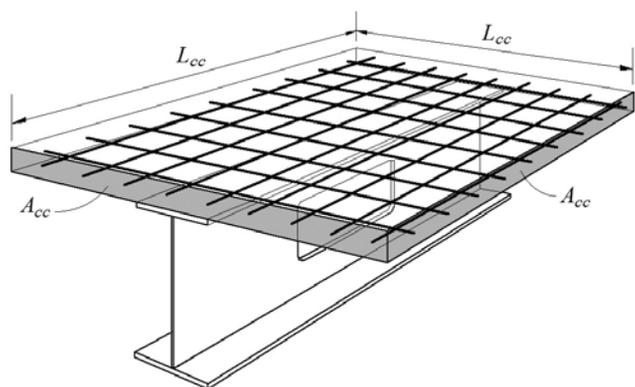


Figura 1.13 – Armadura de reforço sobre uma abertura em viga mista.

A taxa geométrica das armaduras longitudinal e transversal deve ser de 0,25% da área de cisa-lhamento da laje, dada por:

$$A_{cc} = L_{cc} t_c$$

onde t_c é a espessura total da laje, no caso de laje maciça, ou a espessura acima das nervuras, no caso de laje com forma de aço incorporada.

Para vigas com fôrma de aço incorporada e nervuras longitudinais, a armadura transversal deve ser disposta abaixo da cabeça dos conectores, como indicado na Figura 1.15.

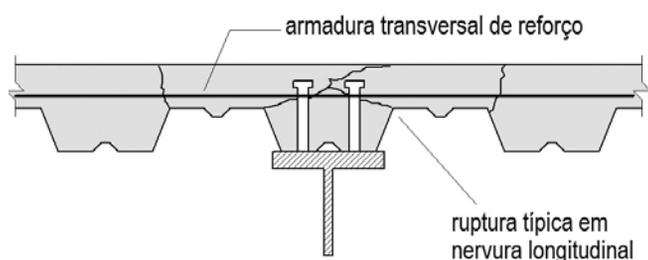


Figura 1.15 – Detalhe da armadura transversal de reforço em viga mista com nervuras longitudinais.

b) Conectores de cisalhamento

Além dos conectores de cisalhamento previstos no projeto da viga mista, para evitar que a laje se separe do perfil de aço, deve-se colocar pelo menos dois conectores a cada 300 mm dentro de uma distância d ou a_o , a que for maior, a partir da extremidade de maior

momento da abertura no sentido em que o momento cresce (ver Figura 1.16). Esse requisito aplica-se apenas a aberturas quadradas e retangulares.

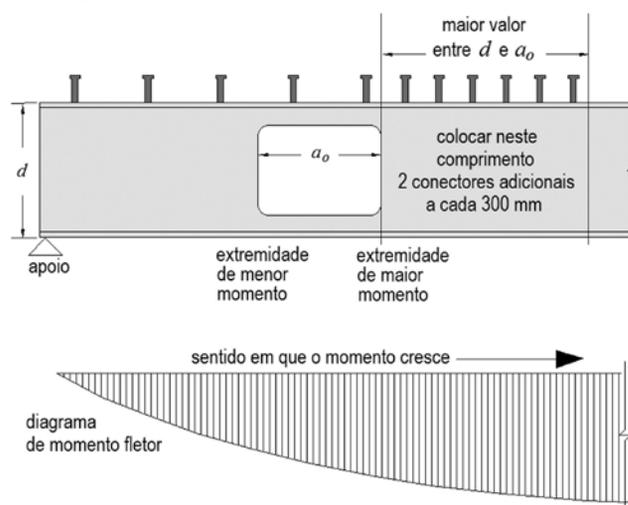


Figura 1.16 – Conectores de cisalhamento adicionais próximos a abertura quadrada ou retangular.

c) Construção não escorada

No caso de abertura em alma de viga mista com construção não escorada, devem ser feitas duas verificações: uma para a viga de aço sujeita ao carregamento atuante antes da cura do concreto e outra para a viga mista sujeita ao carregamento total.

1.8.4 Ábacos gerados

Os ábacos produzidos neste trabalho encontram-se nos Capítulos 2 a 7, conforme discriminado no quadro a seguir:

Capítulo	Situação Tratada
2	Aberturas em vigas de aço com perfil I laminado
3	Aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico
4	Aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida
5	Aberturas em vigas mistas com perfil I laminado
6	Aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico
7	Aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com a mesa de menor espessura ligada à laje

1.9 - Cálculo da flecha em vigas com aberturas na alma

A presença de aberturas na alma de um perfil de aço, de uma viga de aço ou mista, causa redução da sua rigidez, aumentando o valor da flecha. De acordo com Veríssimo e Ribeiro (2012), o acréscimo da flecha depende do número de aberturas, do tamanho e da posição das aberturas e da relação L/d .

Simplificadamente, considerando a posição das aberturas como a mais desfavorável, a flecha de uma viga com aberturas ($\delta_{tot,ab}$) pode ser estimada pela equação:

$$\delta_{tot,ab} = \delta_{tot} \left[1 + 5167 \left(\frac{d}{L} \right)^{3,19} \left(\frac{H_o}{d} \right)^{6,48} \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{1,42} \right]$$

onde δ_{tot} é a flecha da viga sem aberturas, causada pela combinação de ações de serviço aplicável, calculada conforme a ABNT NBR 8800:2008, n o número de aberturas e α um coeficiente de ajuste, igual a 1 para aberturas retangulares com razão de aspecto máxima de 2:1, 2 para aberturas quadradas e 3 para aberturas circulares.

Capítulo 2

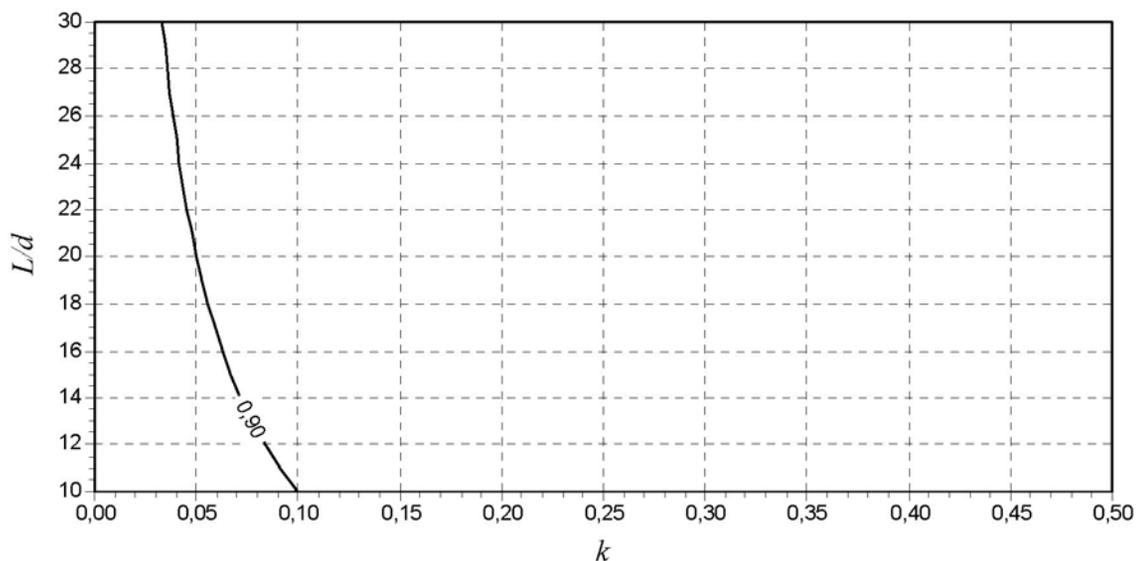
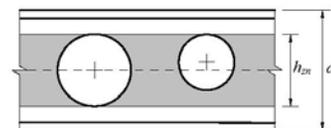
Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado

Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado

ÁBACO 1

abertura circular

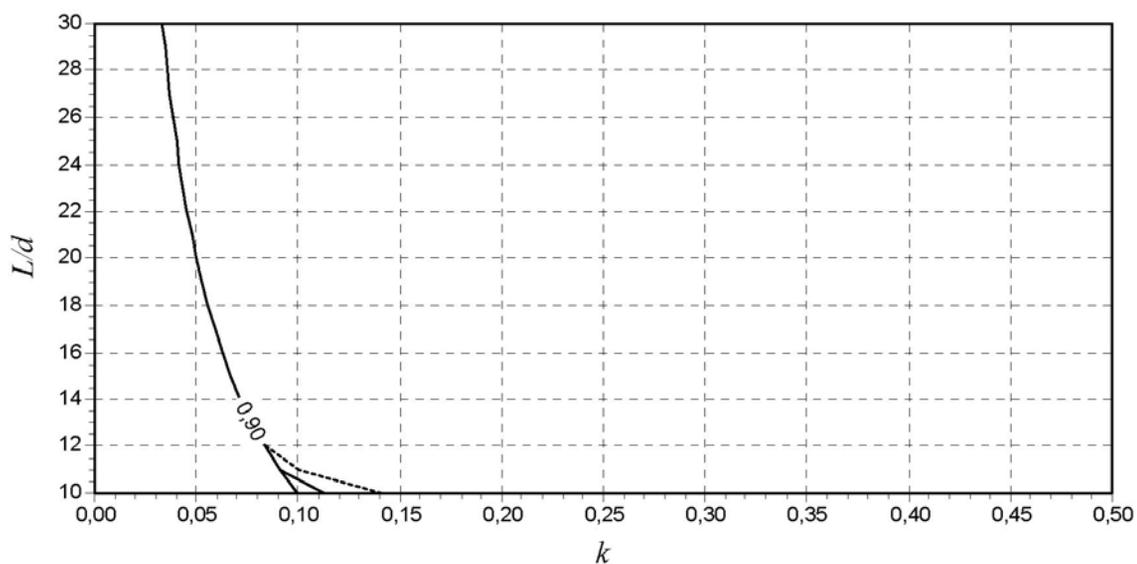
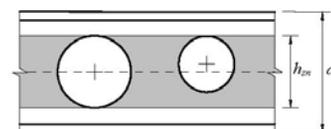
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 2

abertura circular

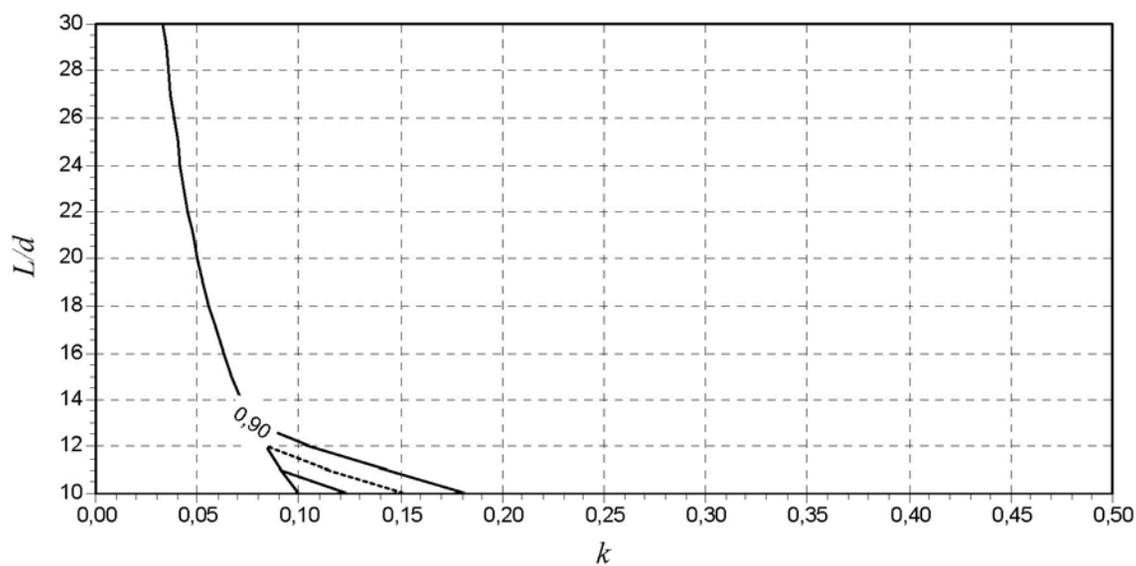
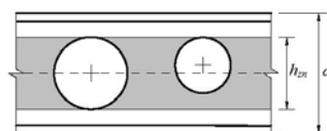
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO 3

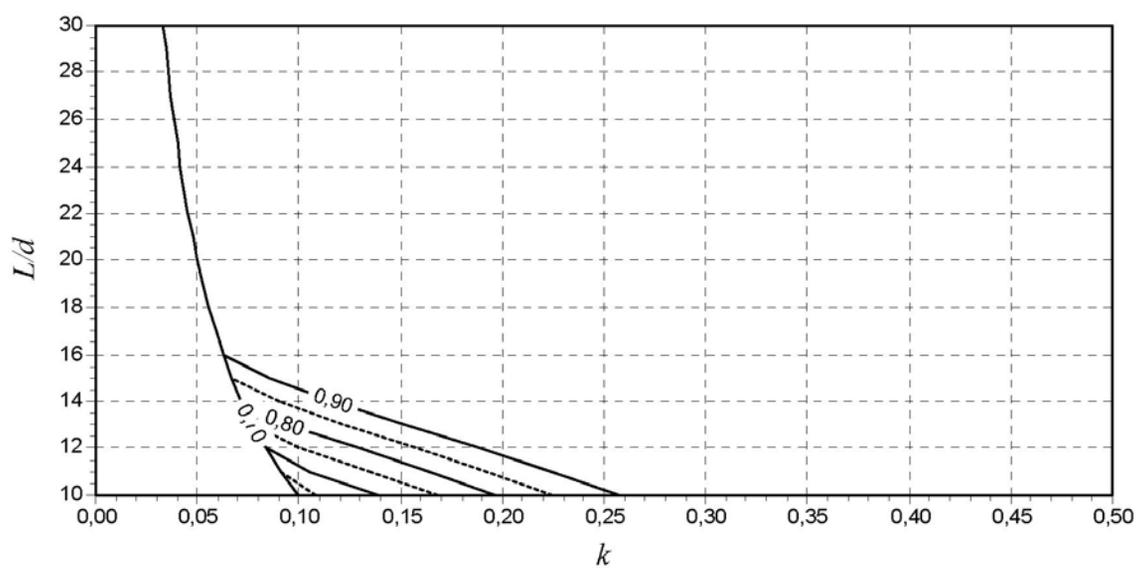
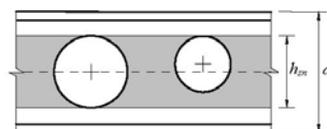
abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,4d$$

**ÁBACO 4**

abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

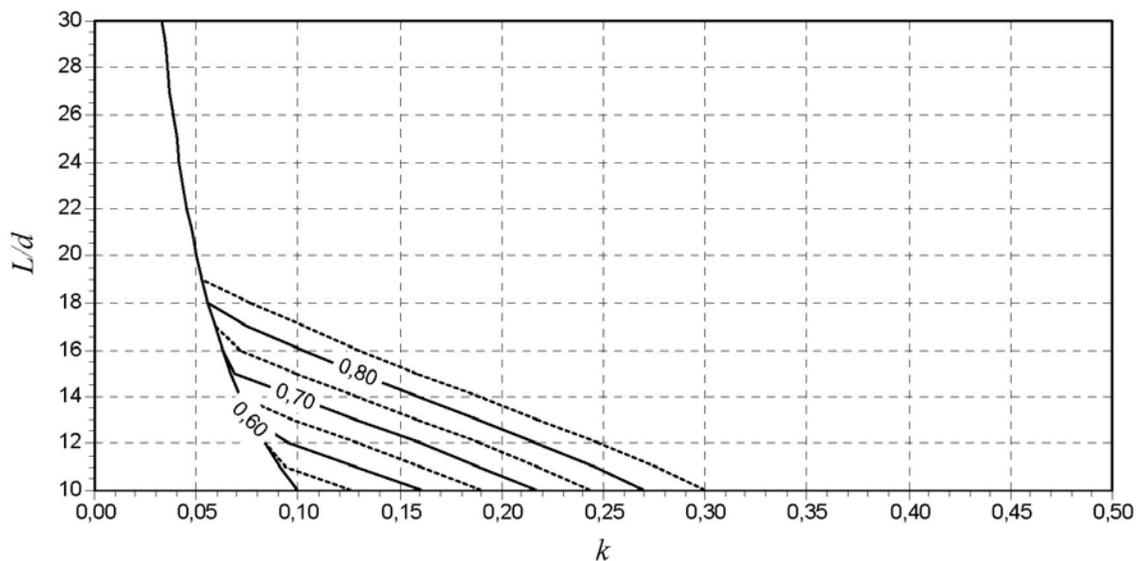
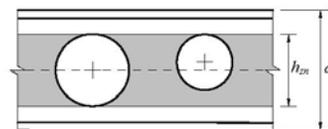


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado

ÁBACO 5

abertura circular

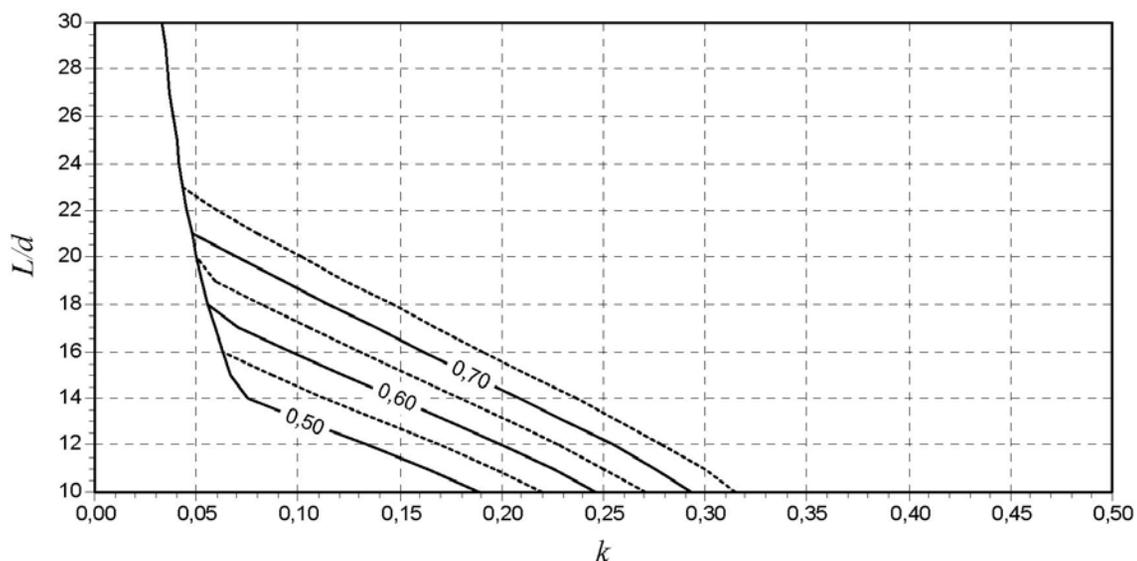
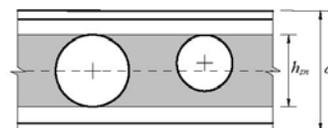
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 6

abertura circular

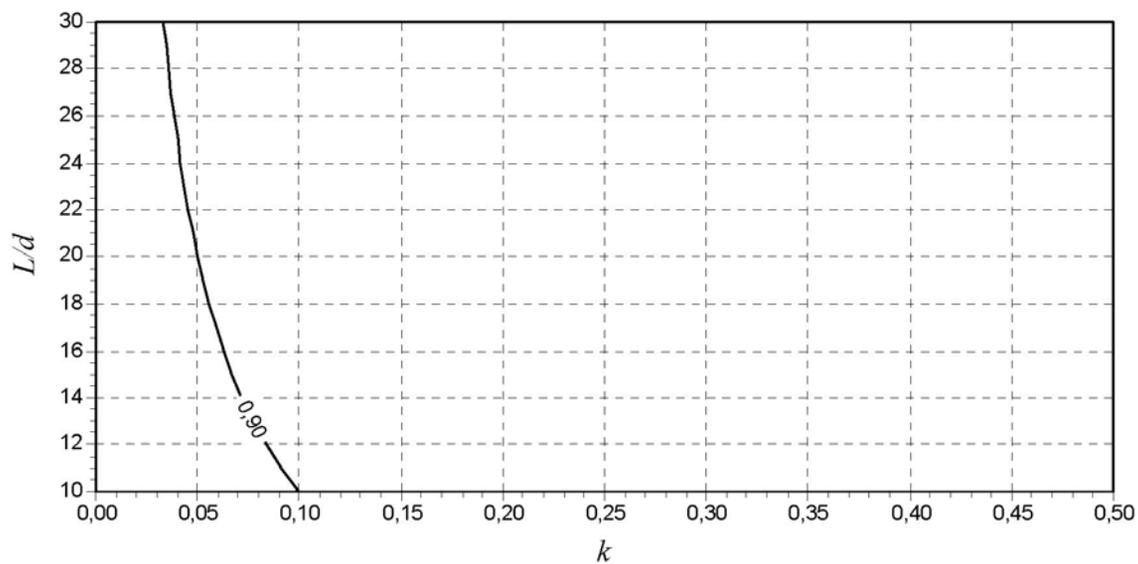
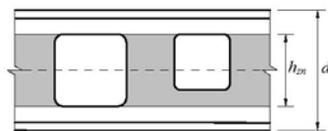
$$h_{zn} \leq 0,7d$$



ÁBACO 7

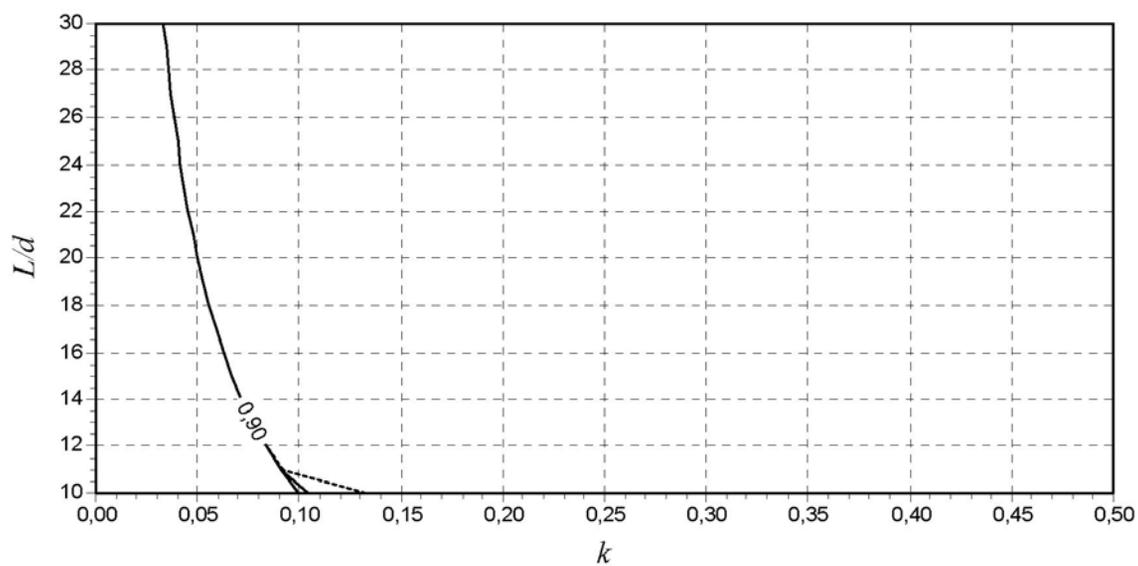
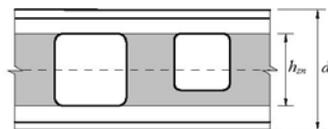
abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,2d$$

**ÁBACO 8**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,3d$$

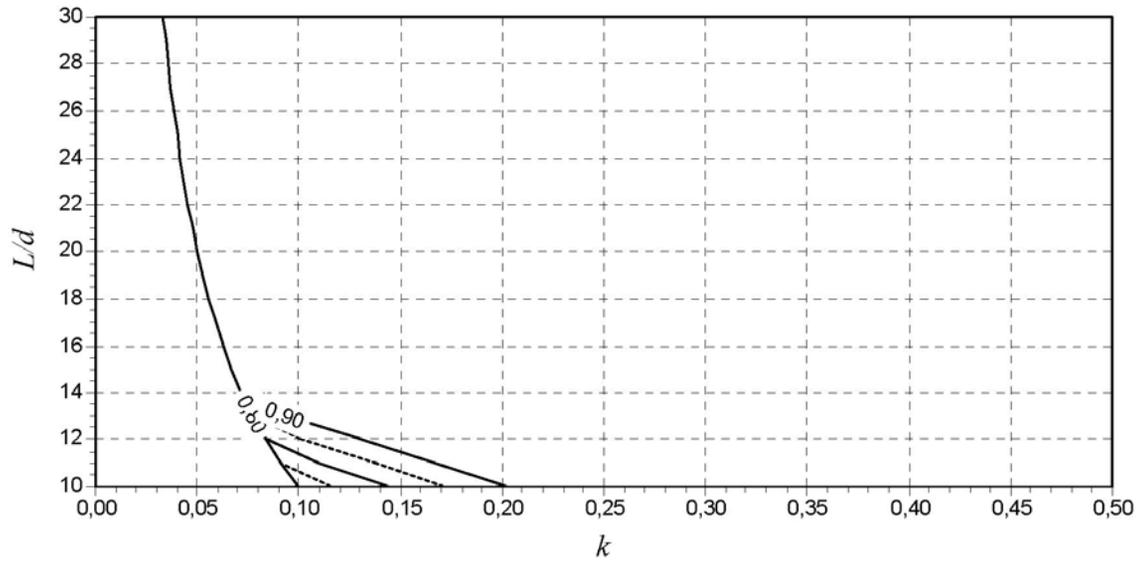
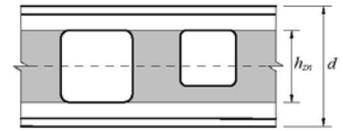


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado

ÁBACO 9

abertura quadrada

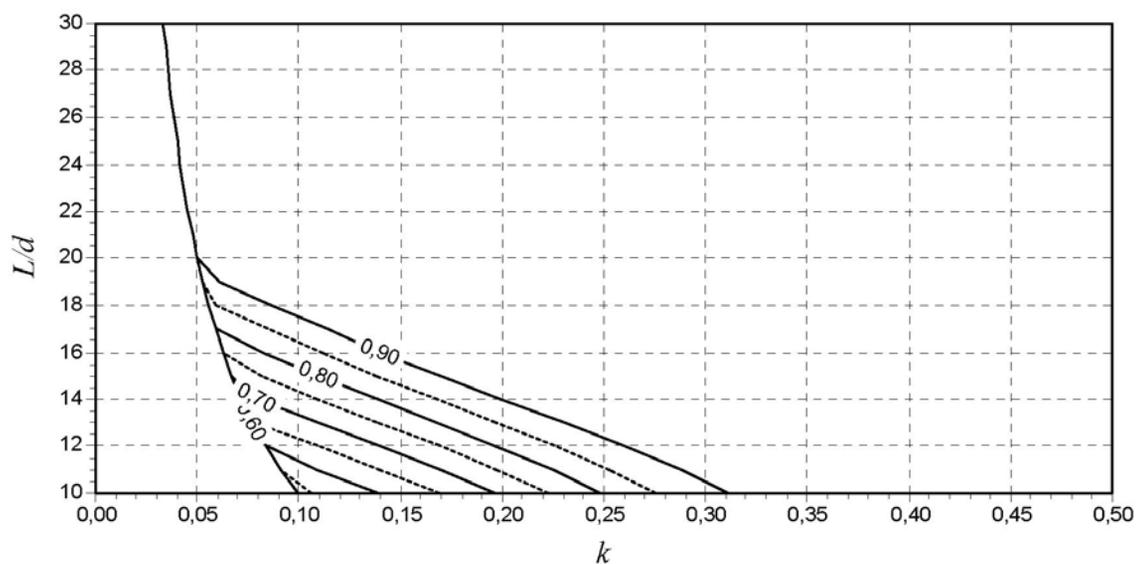
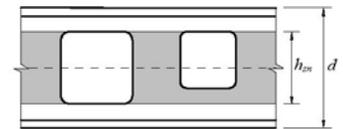
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO 10

abertura quadrada

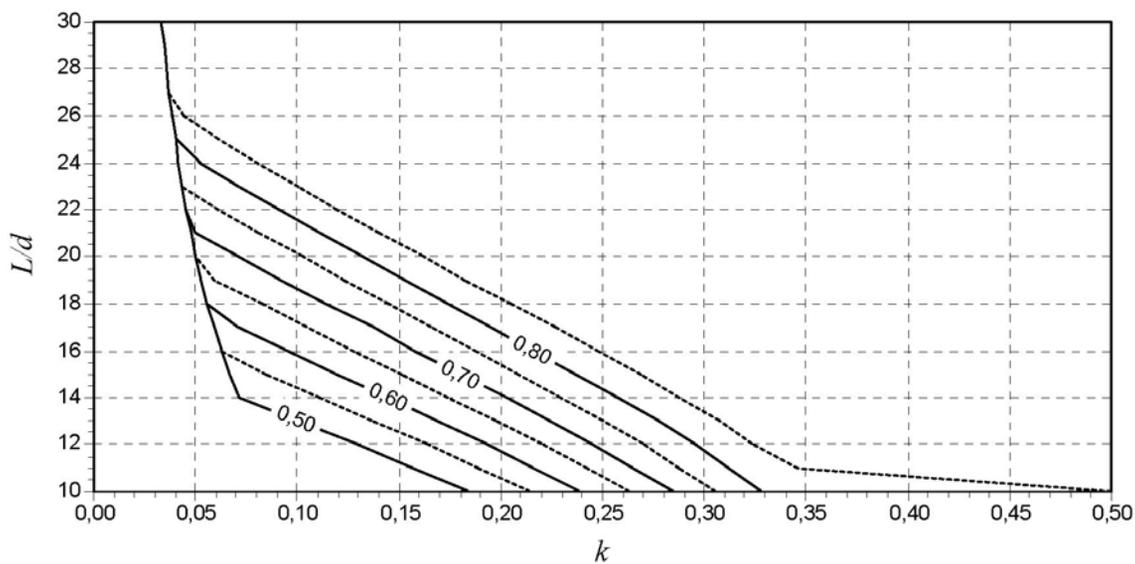
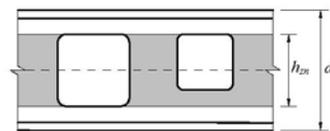
$$h_{zn} \leq 0,5d$$



**ÁBACO
11**

abertura quadrada

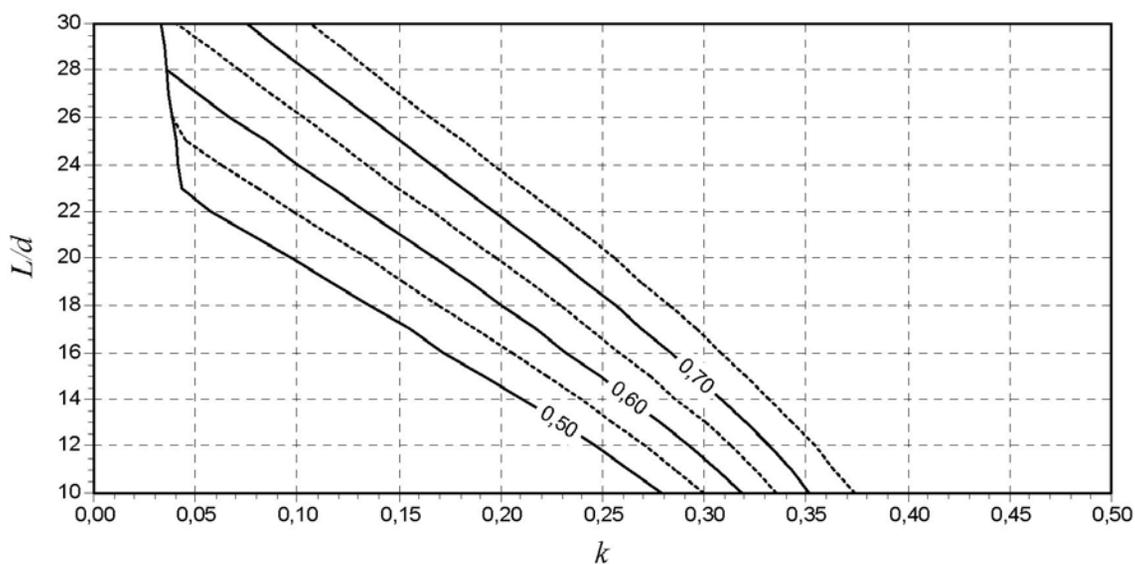
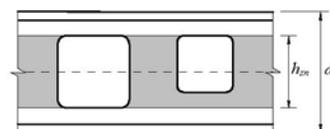
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
12**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,7d$$

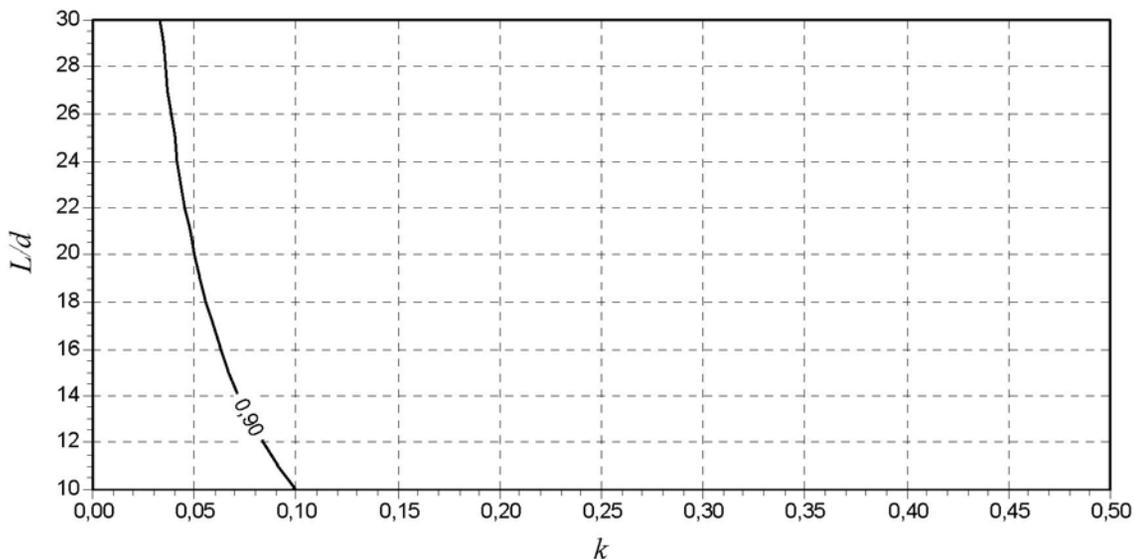
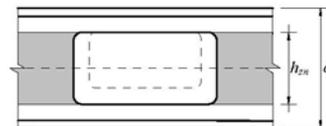


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado

ÁBACO 13

abertura retangular
2:1

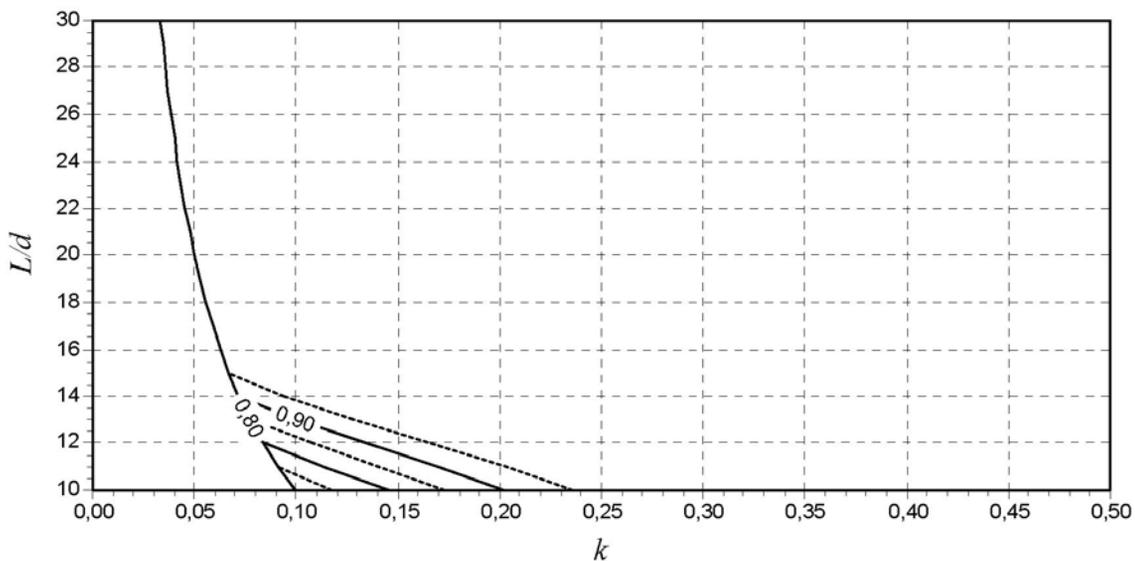
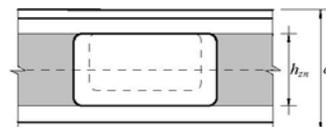
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 14

abertura retangular
2:1

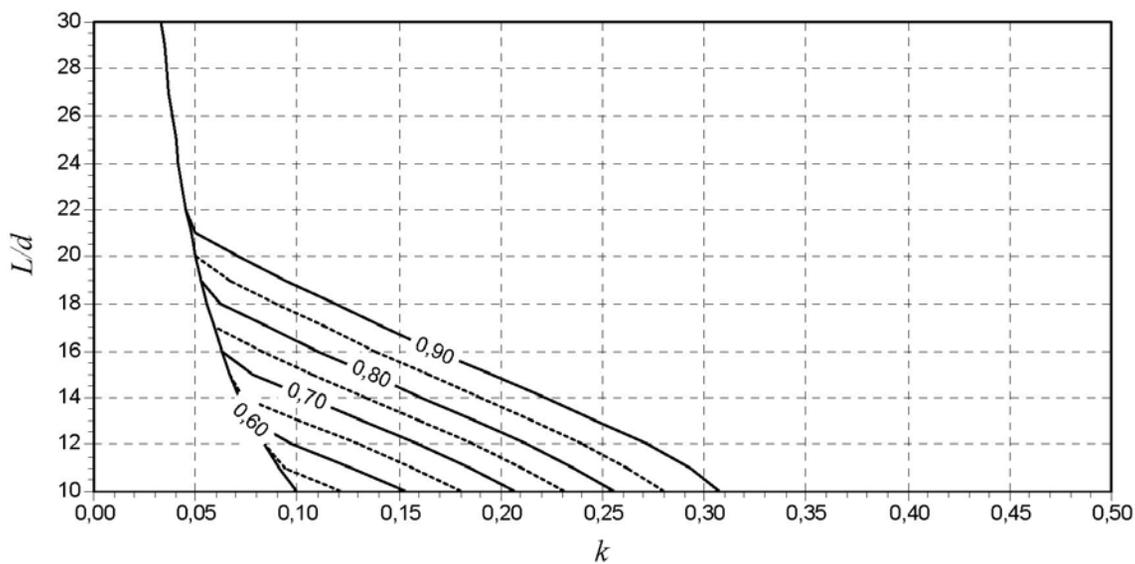
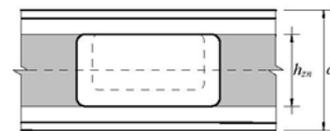
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
15

abertura retangular
2:1

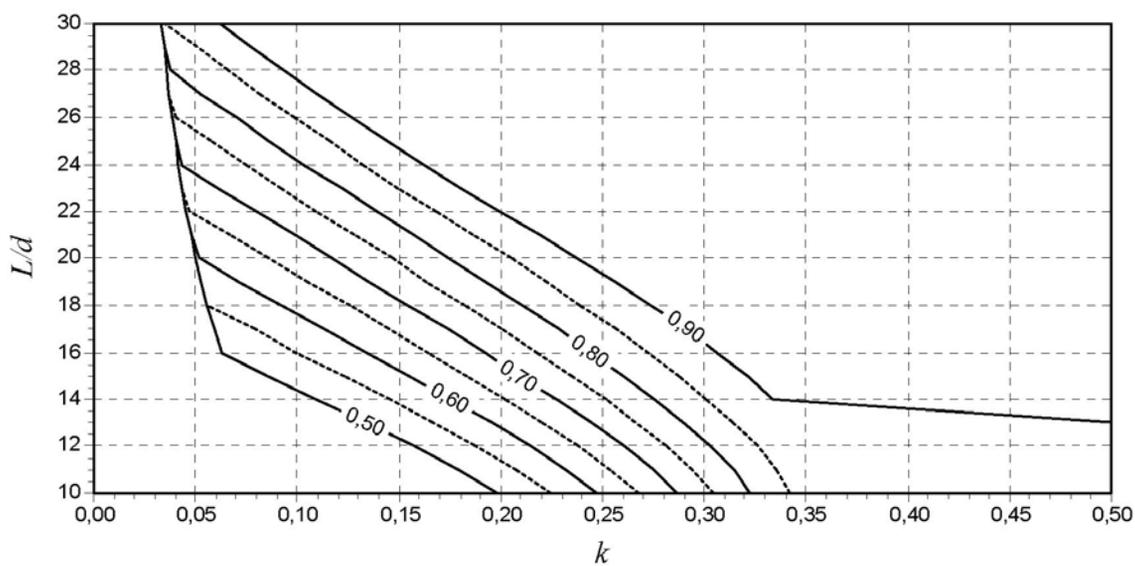
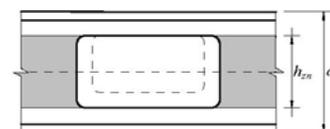
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
16

abertura retangular
2:1

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

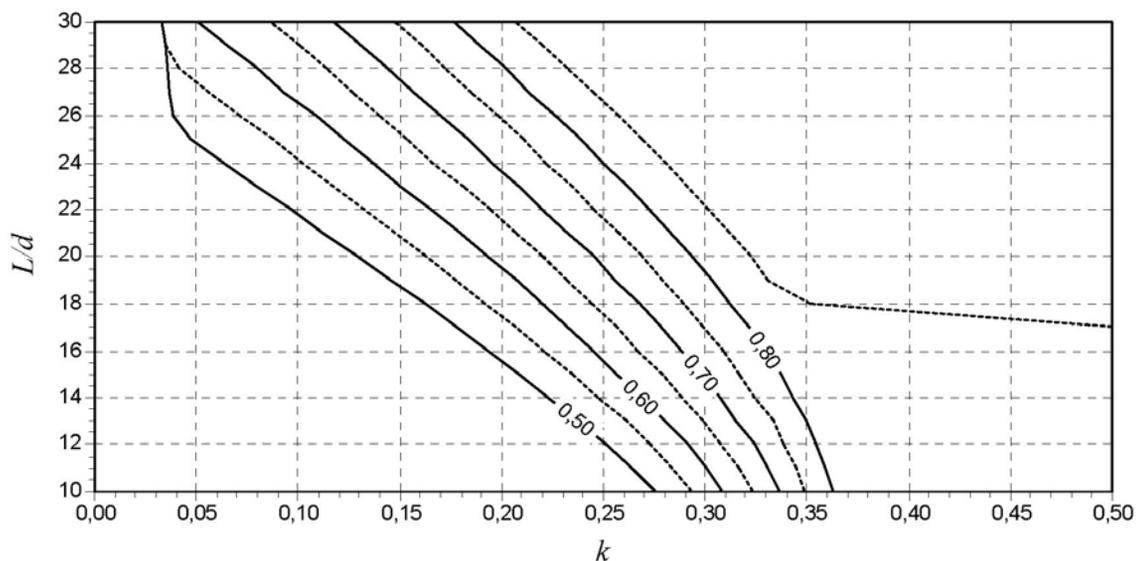
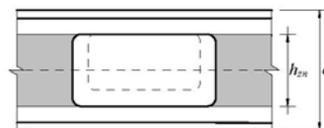


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I laminado

ÁBACO 17

abertura retangular
2 : 1

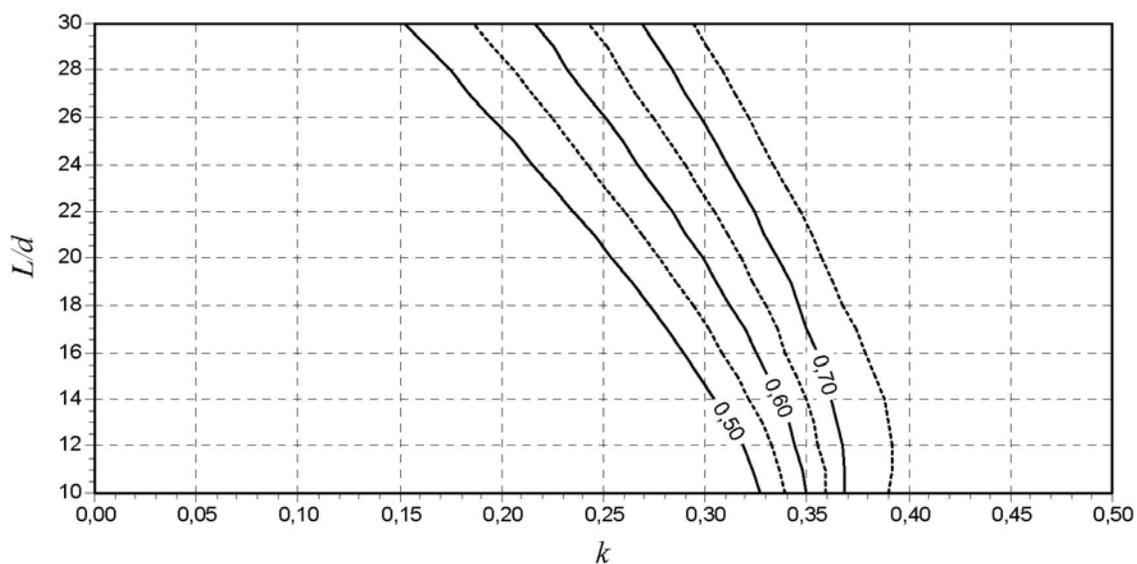
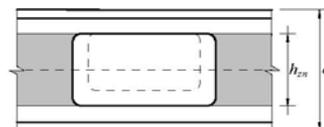
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 18

abertura retangular
1,4 : 1

$$h_{zn} \leq 0,7d$$



Capítulo 3

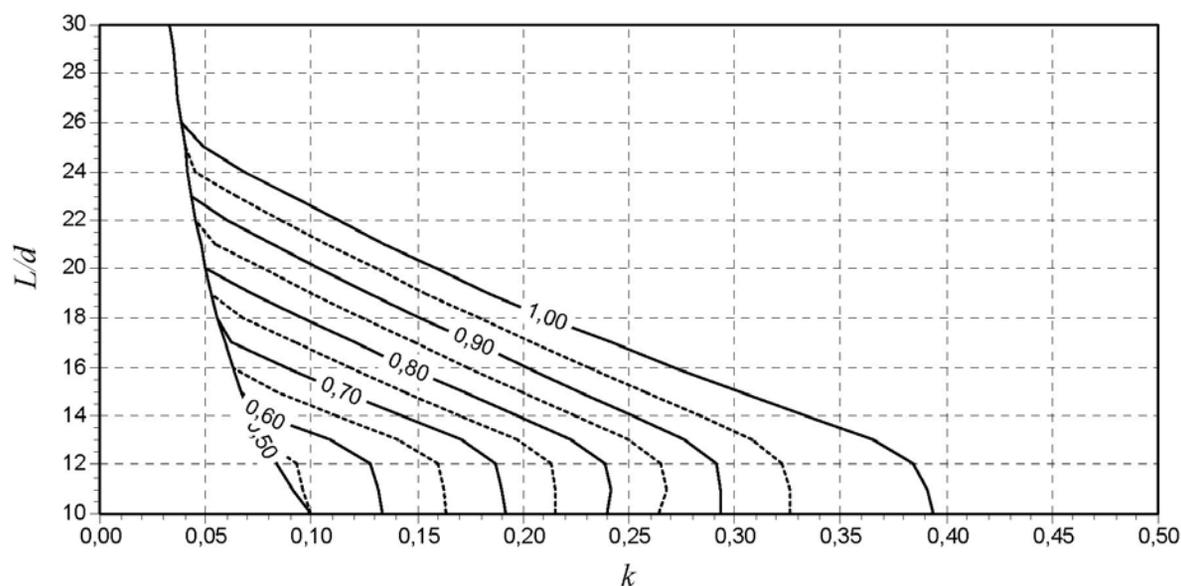
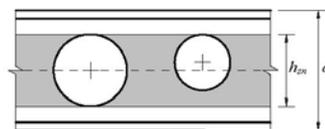
Ábacos para aberturas em
vigas de aço com perfil I soldado
duplamente simétrico

Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 19

abertura circular

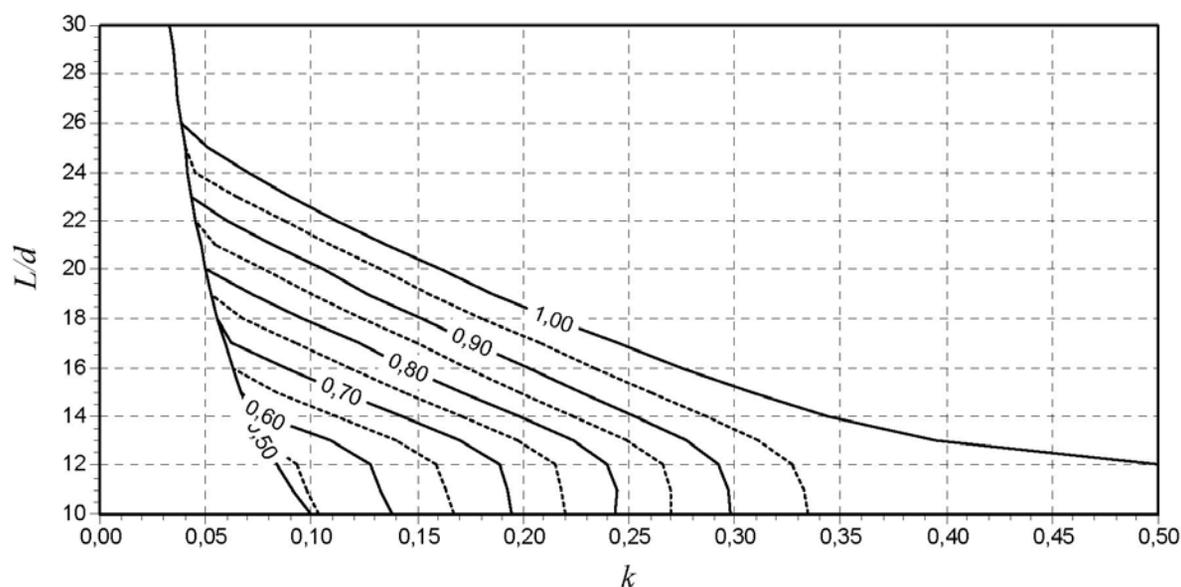
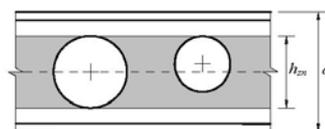
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 20

abertura circular

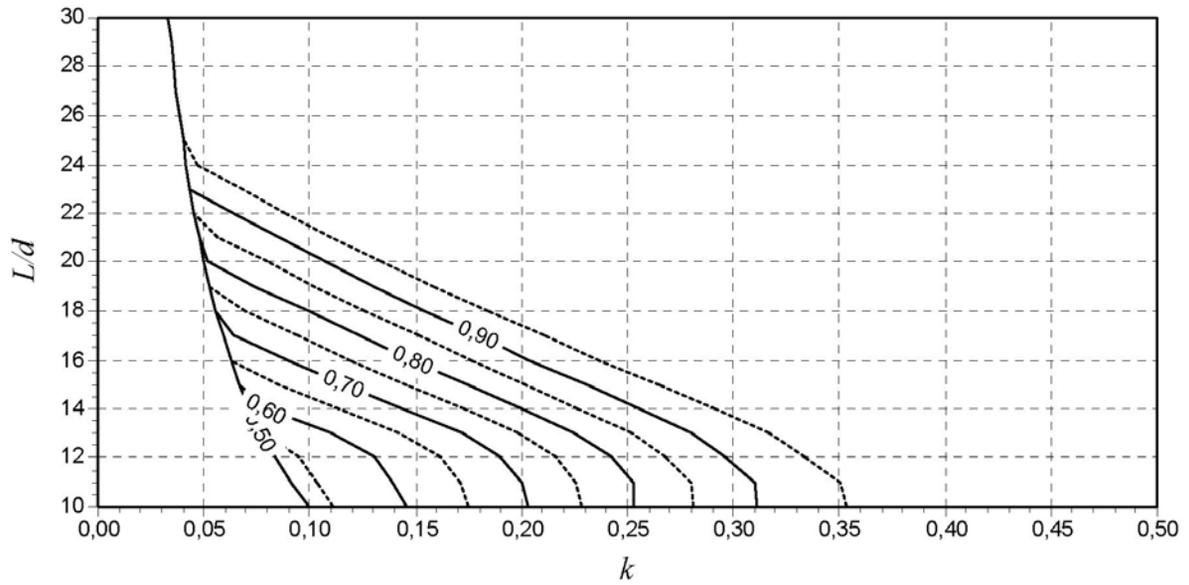
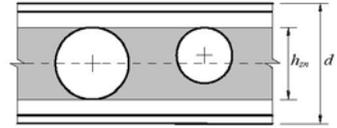
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



**ÁBACO
21**

abertura circular

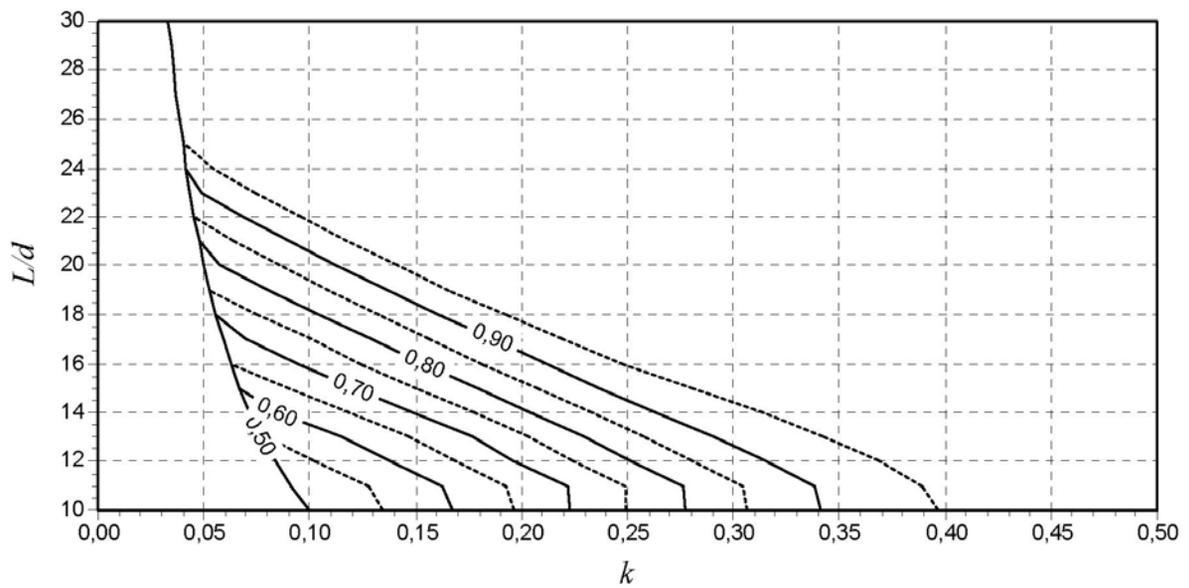
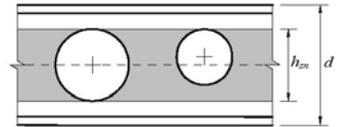
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



**ÁBACO
22**

abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

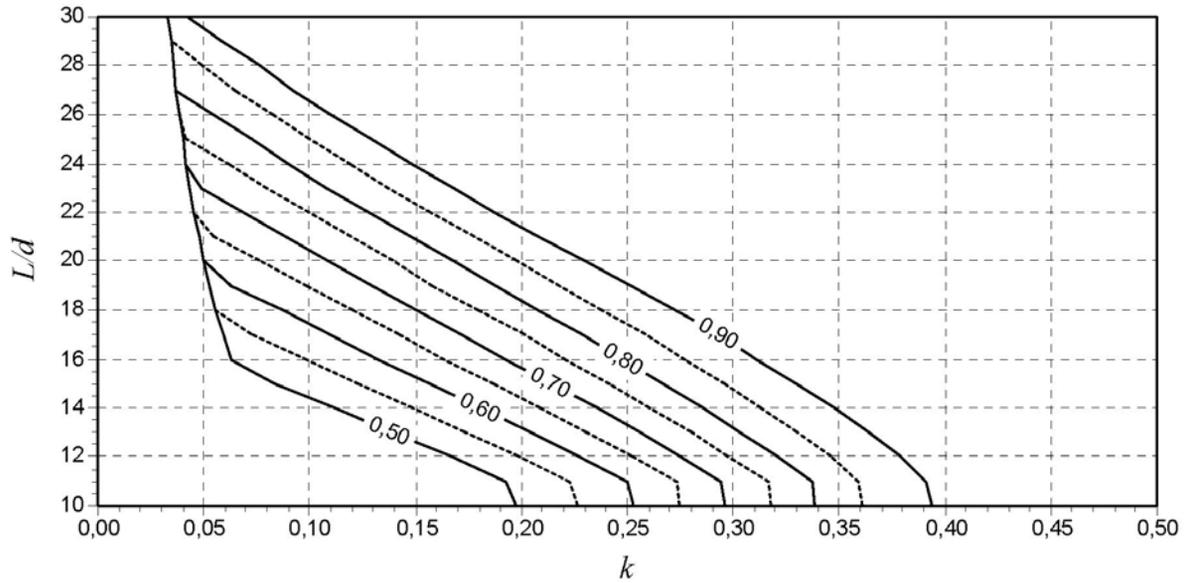
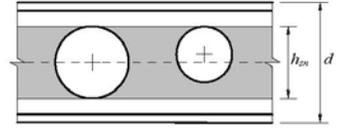


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 23

abertura circular

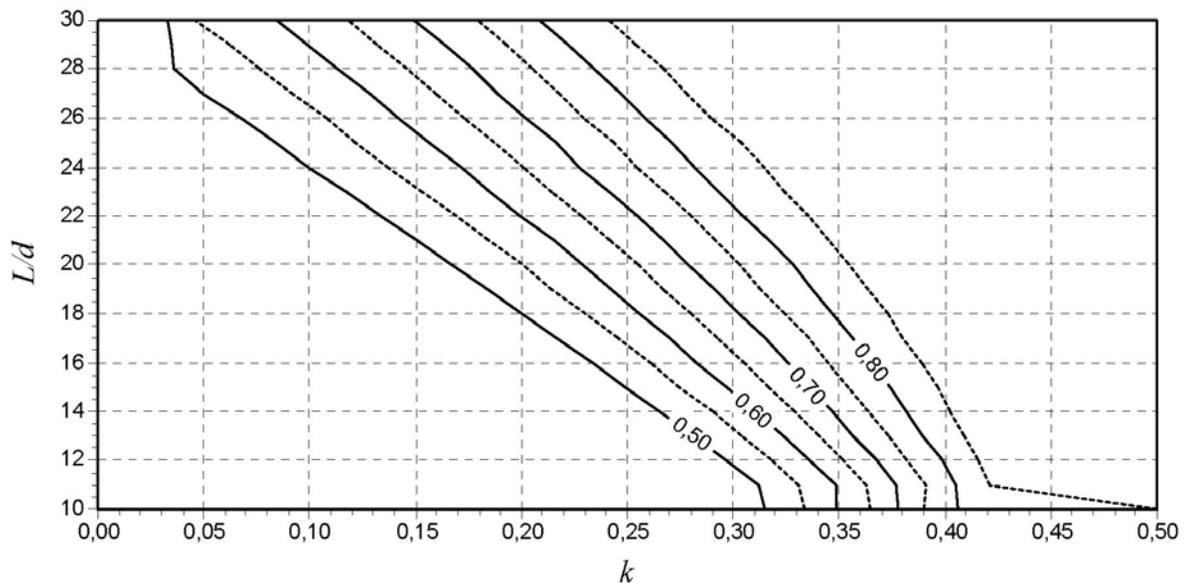
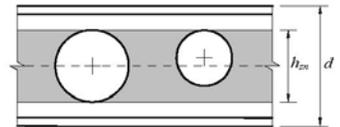
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 24

abertura circular

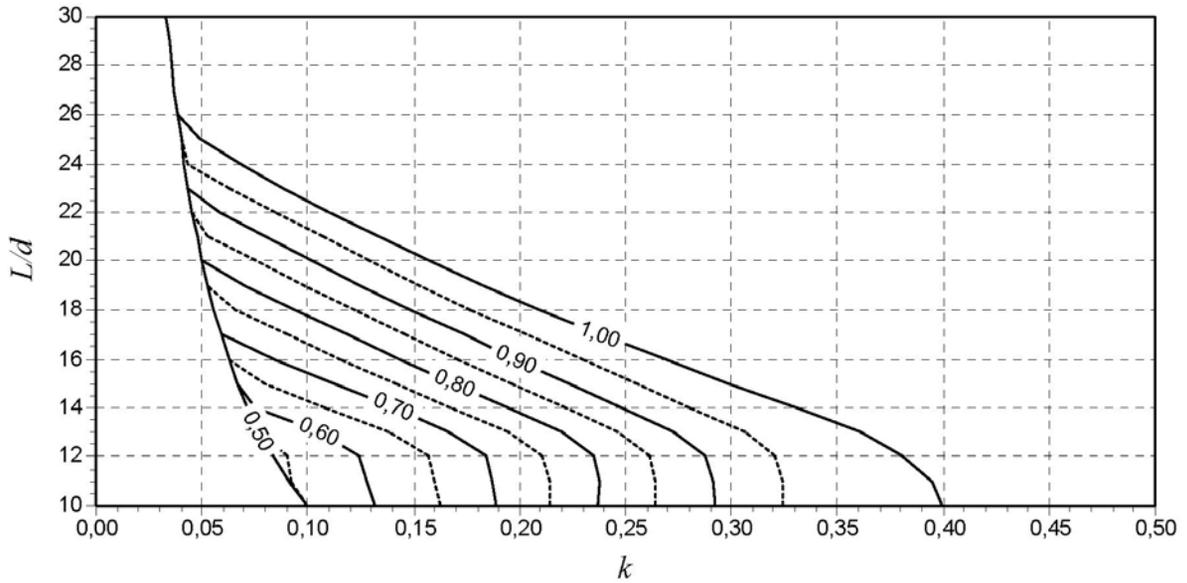
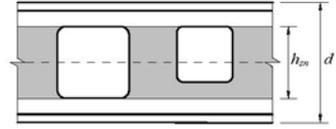
$$h_{zn} \leq 0,7d$$



**ÁBACO
25**

abertura quadrada

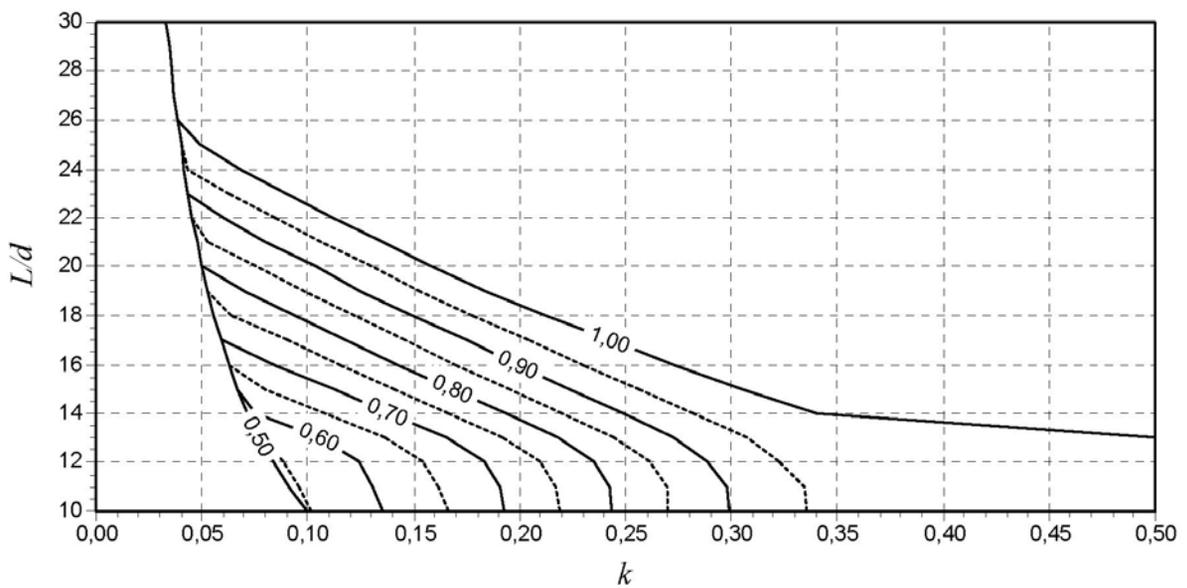
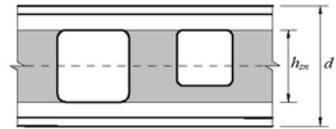
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
26**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,3d$$

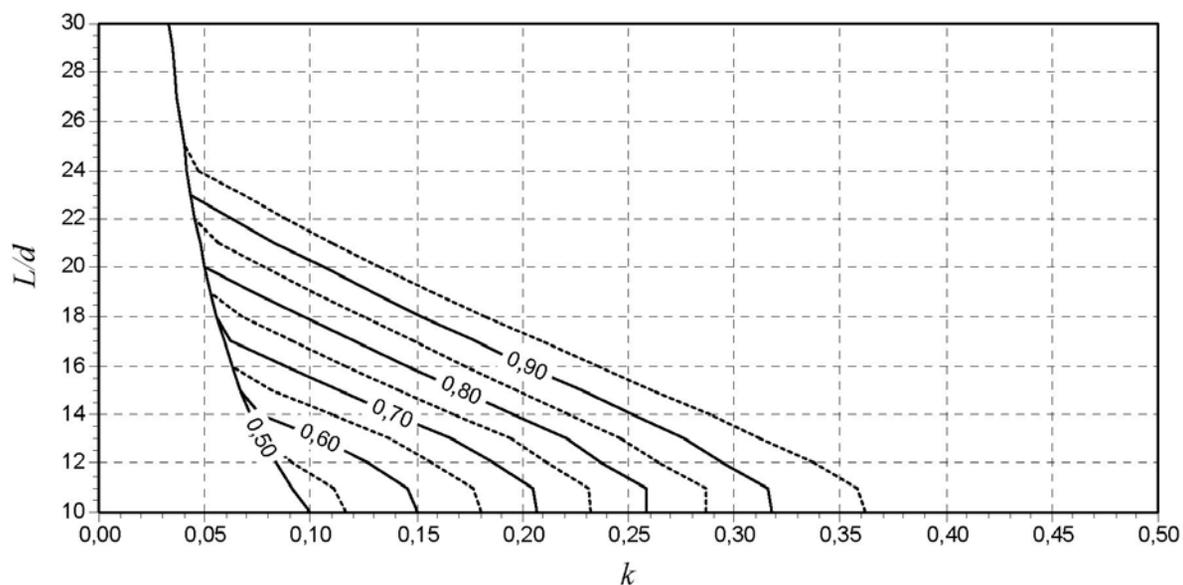
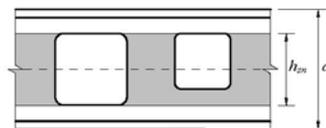


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 27

abertura quadrada

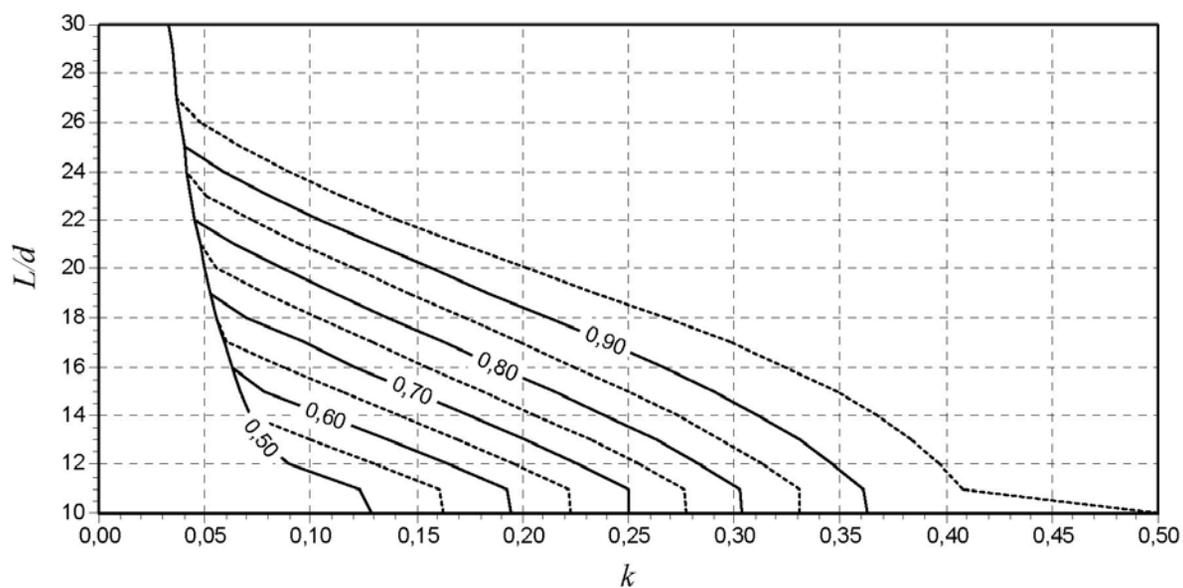
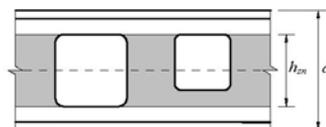
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO 28

abertura quadrada

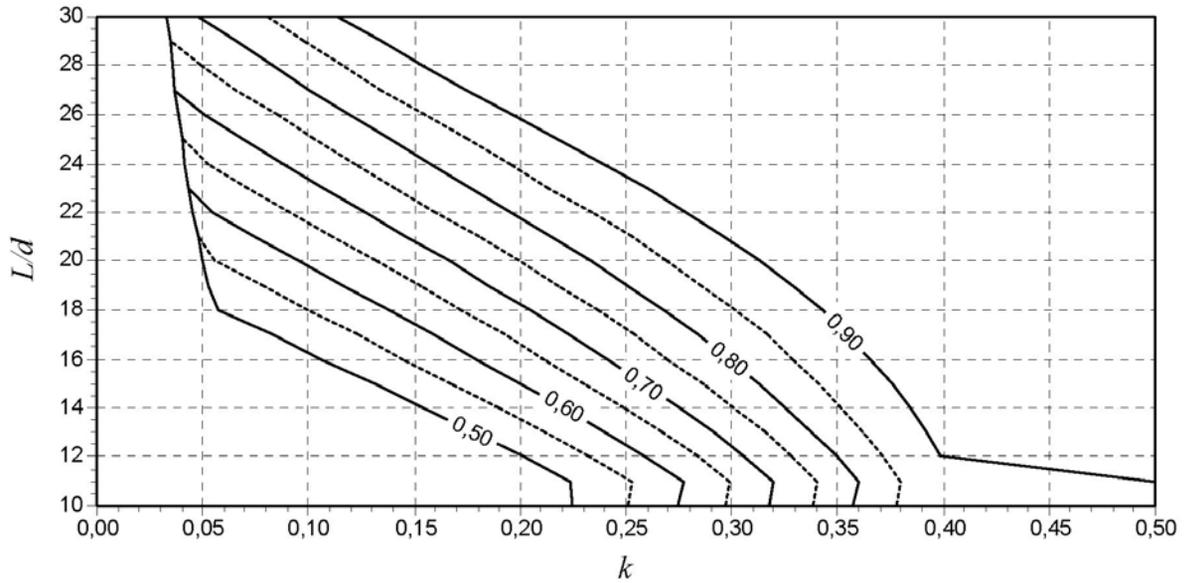
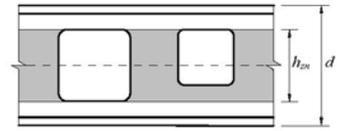
$$h_{zn} \leq 0,5d$$



**ÁBACO
29**

abertura quadrada

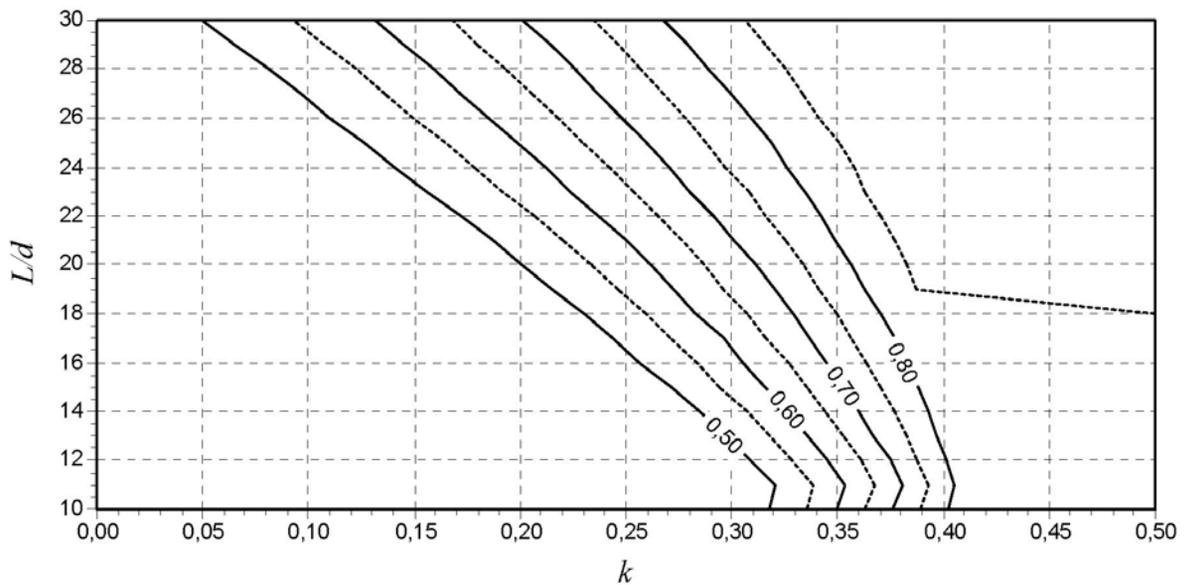
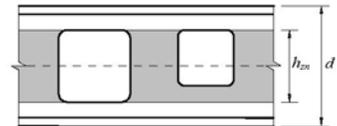
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
30**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,7d$$

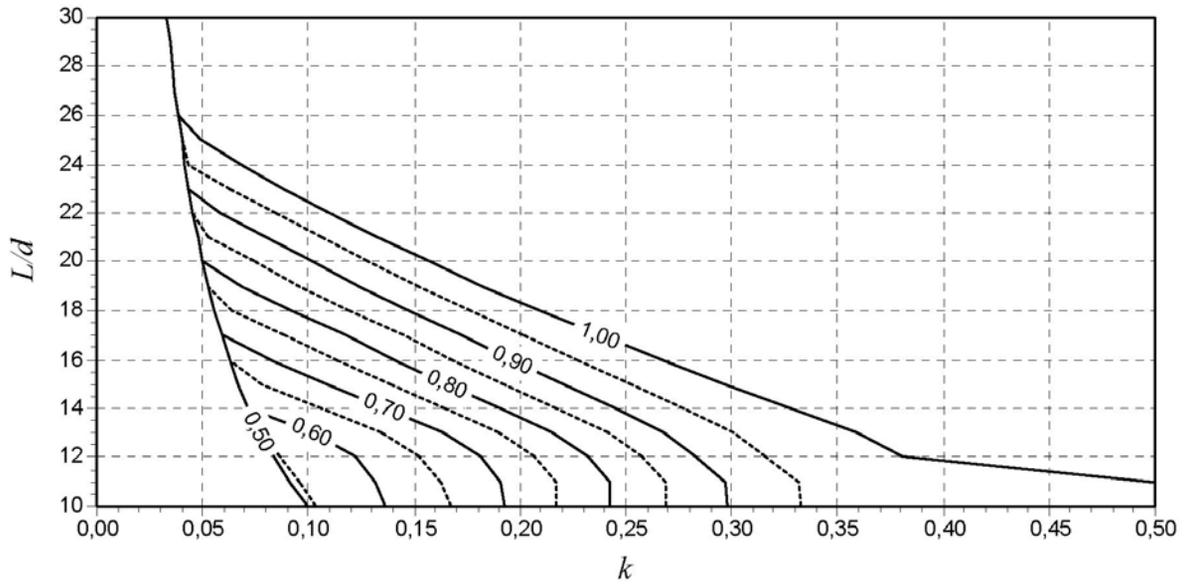
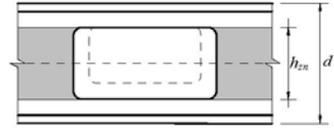


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 31

abertura retangular
2:1

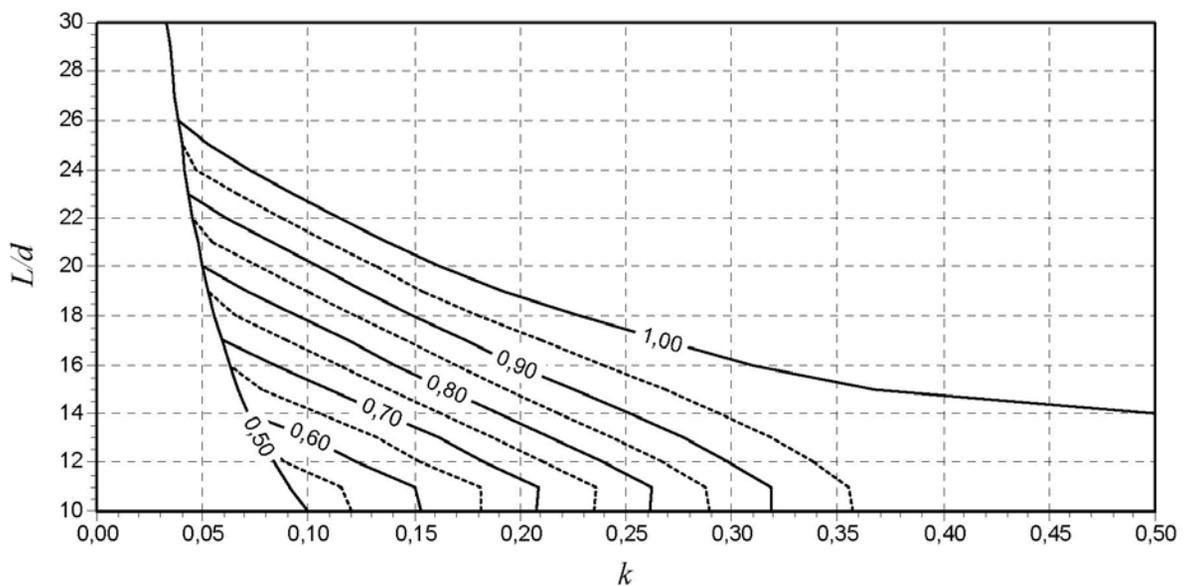
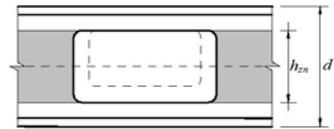
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 32

abertura retangular
2:1

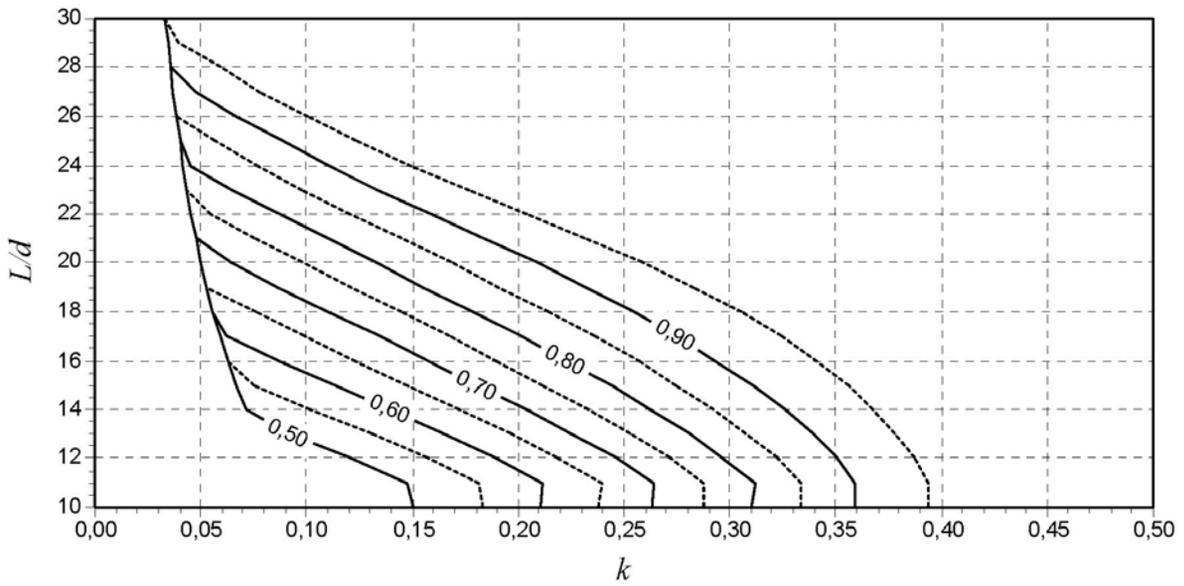
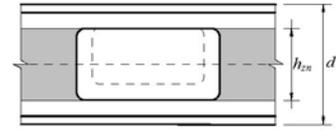
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
33

abertura retangular
2:1

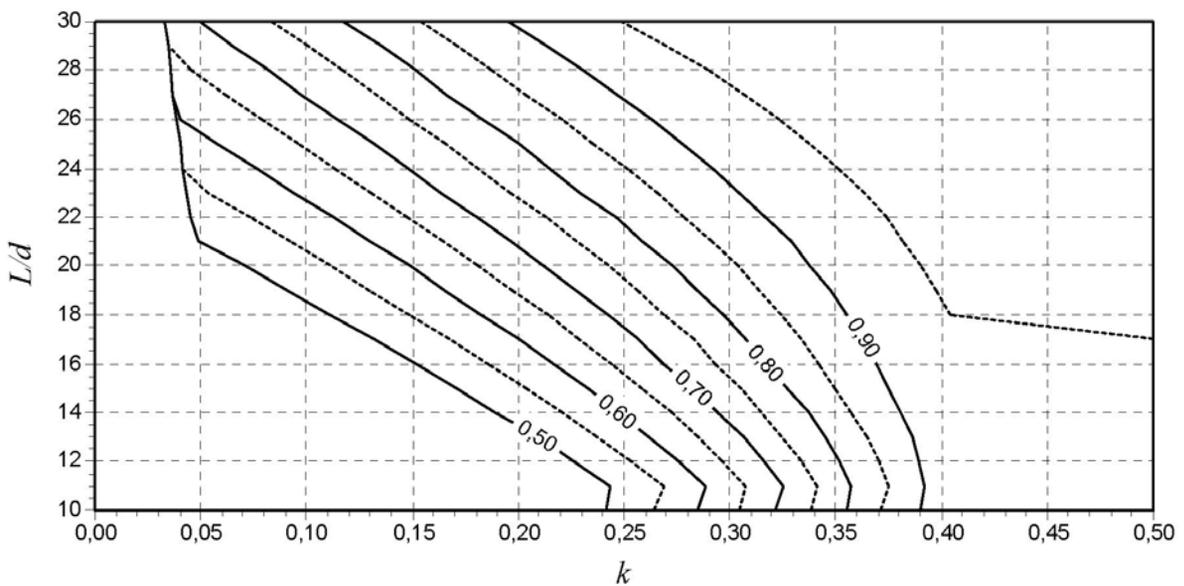
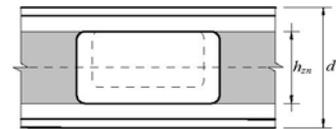
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
34

abertura retangular
2:1

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

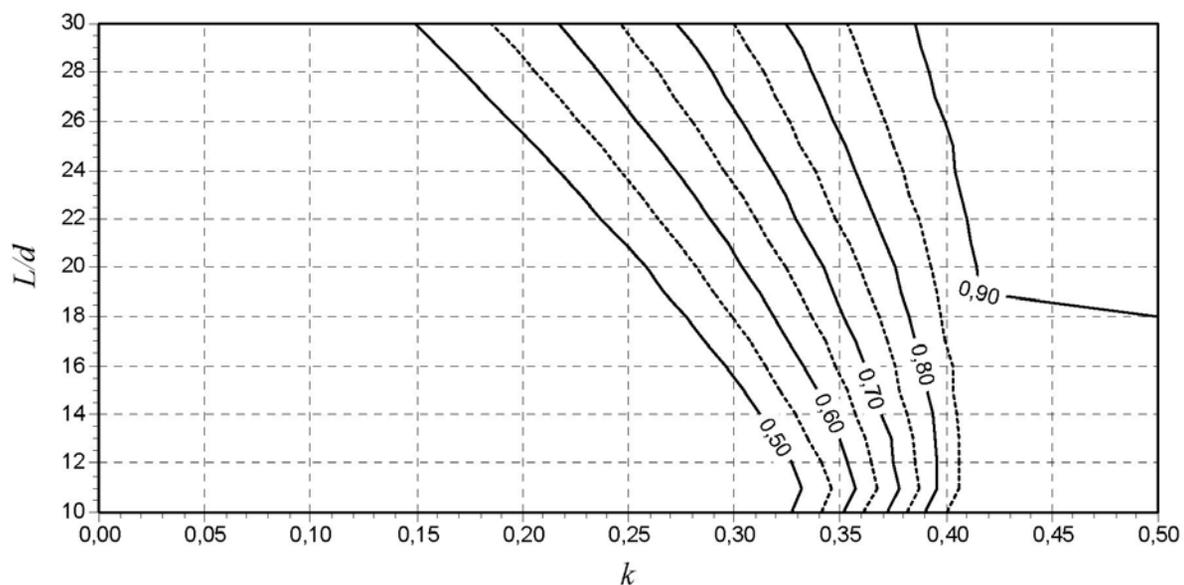
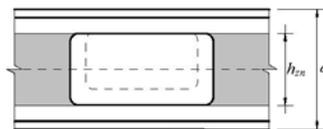


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 35

abertura retangular
2 : 1

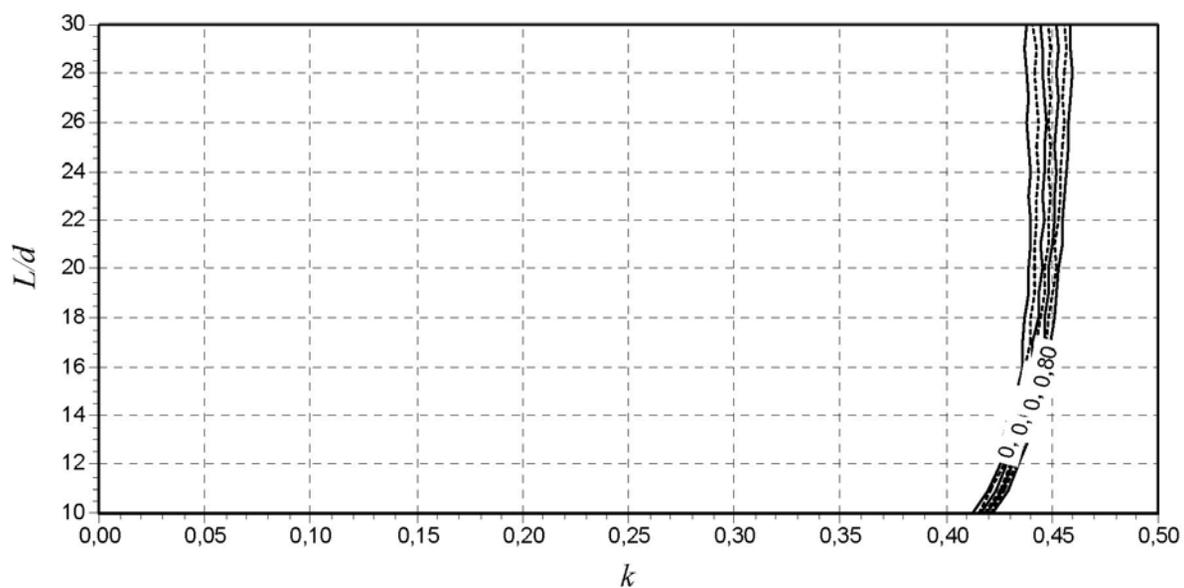
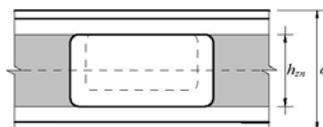
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 36

abertura retangular
1,4 : 1

$$h_{zn} \leq 0,7d$$



Capítulo 4

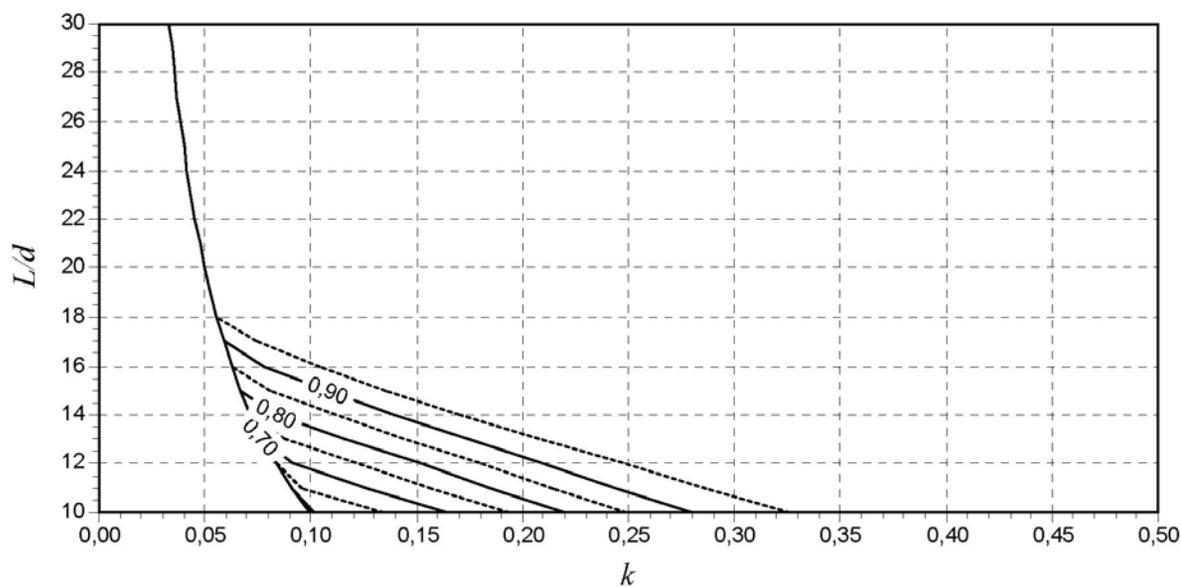
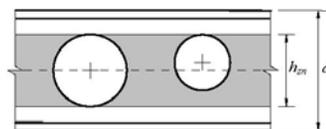
Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida

Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida

ÁBACO 37

abertura circular

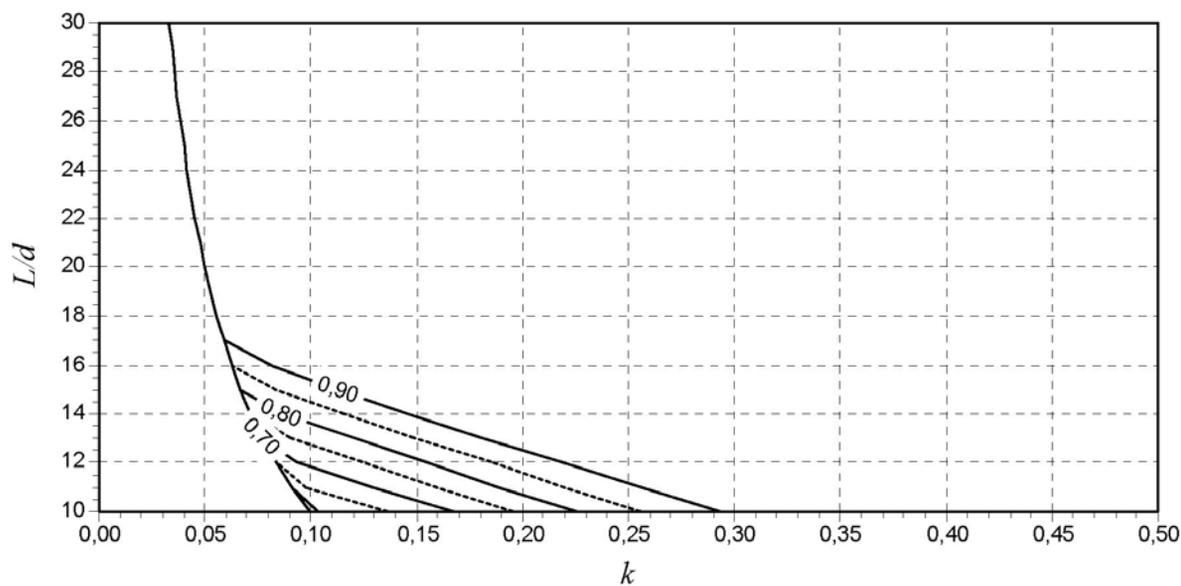
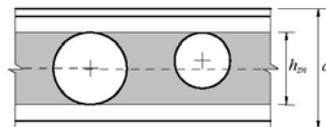
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 38

abertura circular

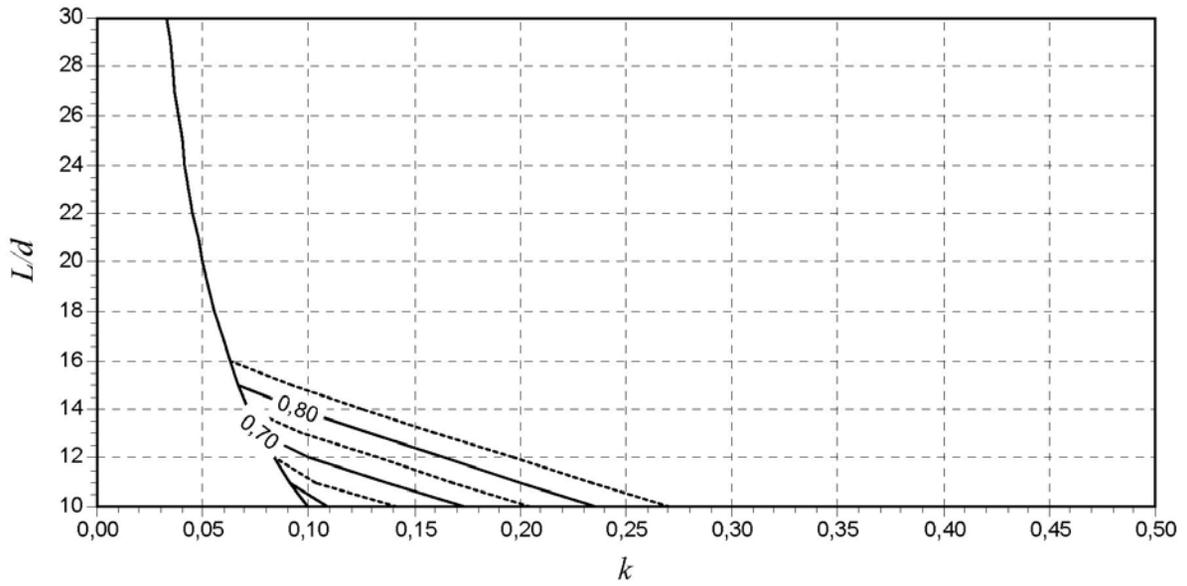
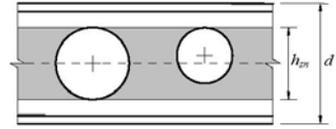
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



**ÁBACO
39**

abertura circular

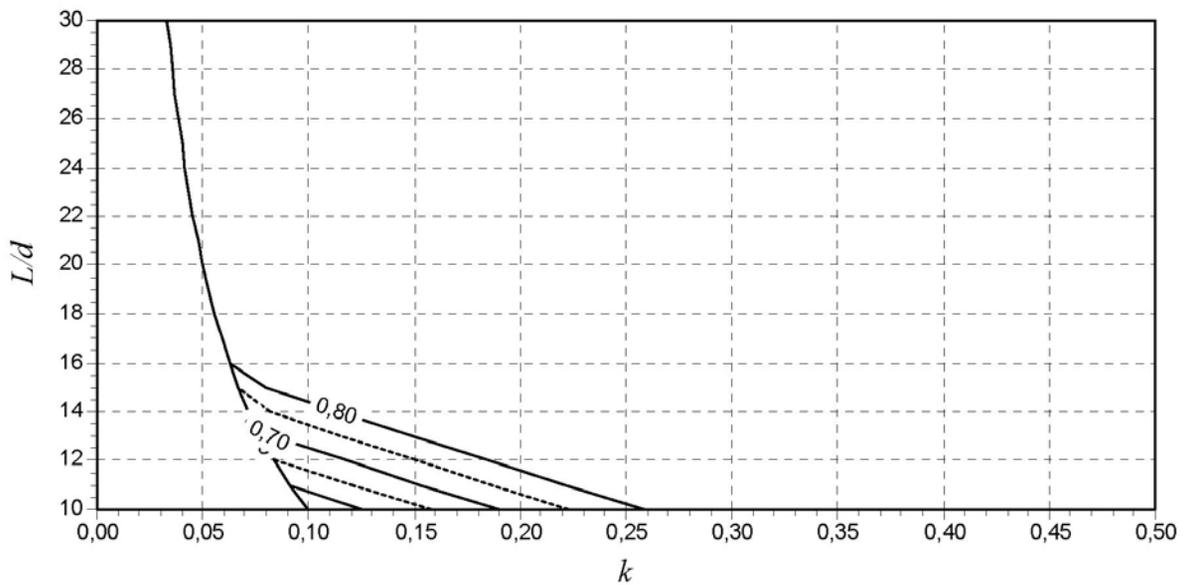
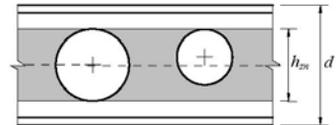
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



**ÁBACO
40**

abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

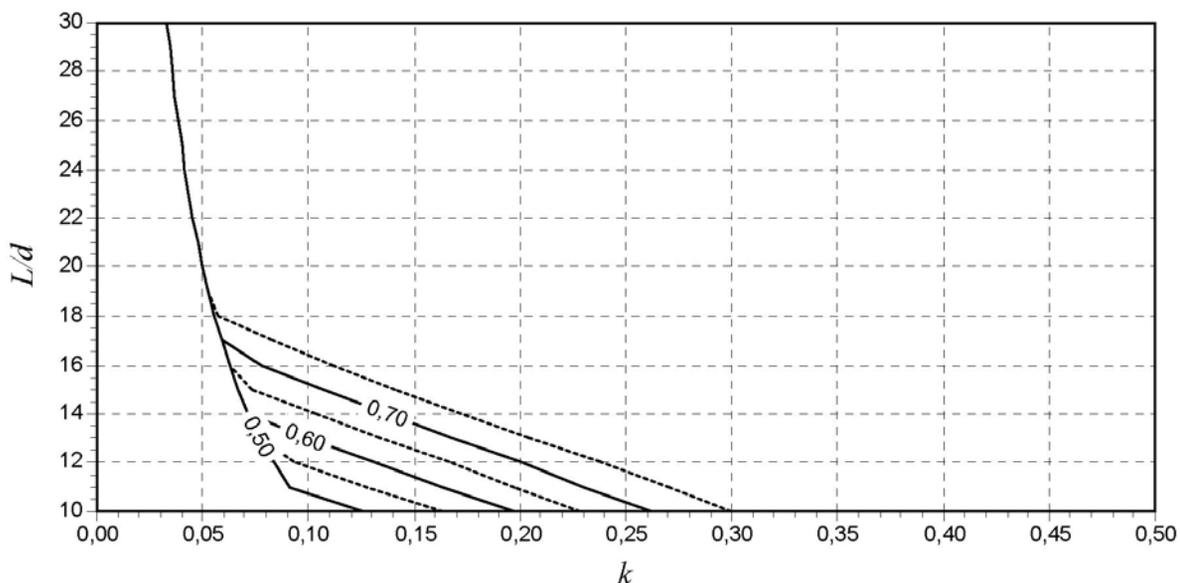
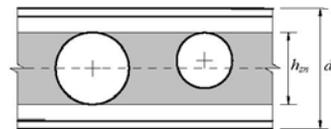


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida

ÁBACO 41

abertura circular

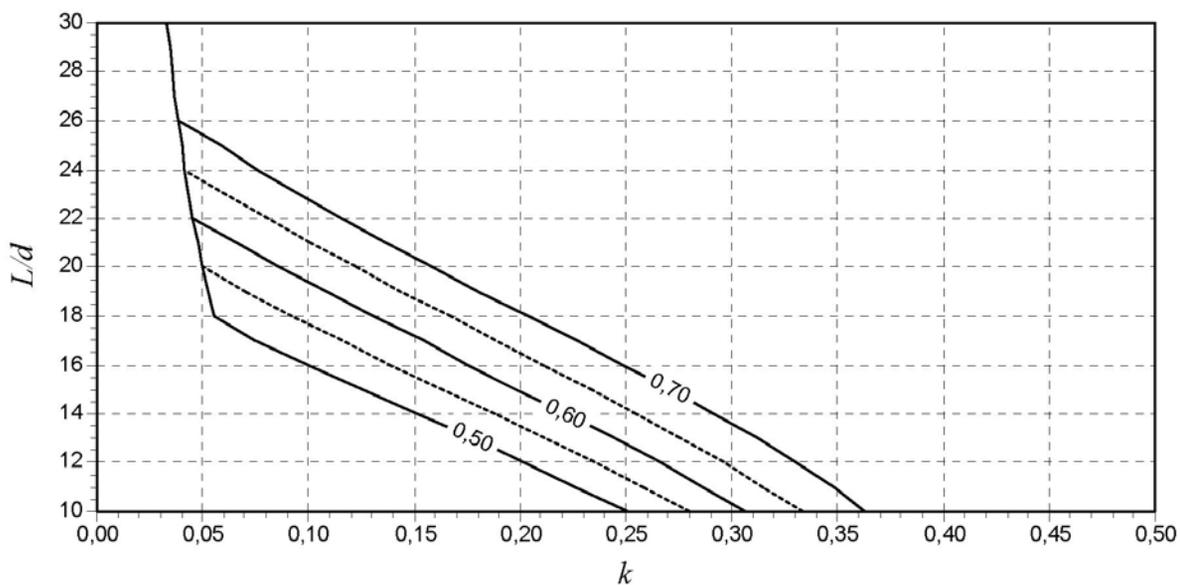
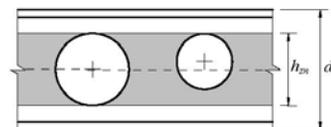
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 42

abertura circular

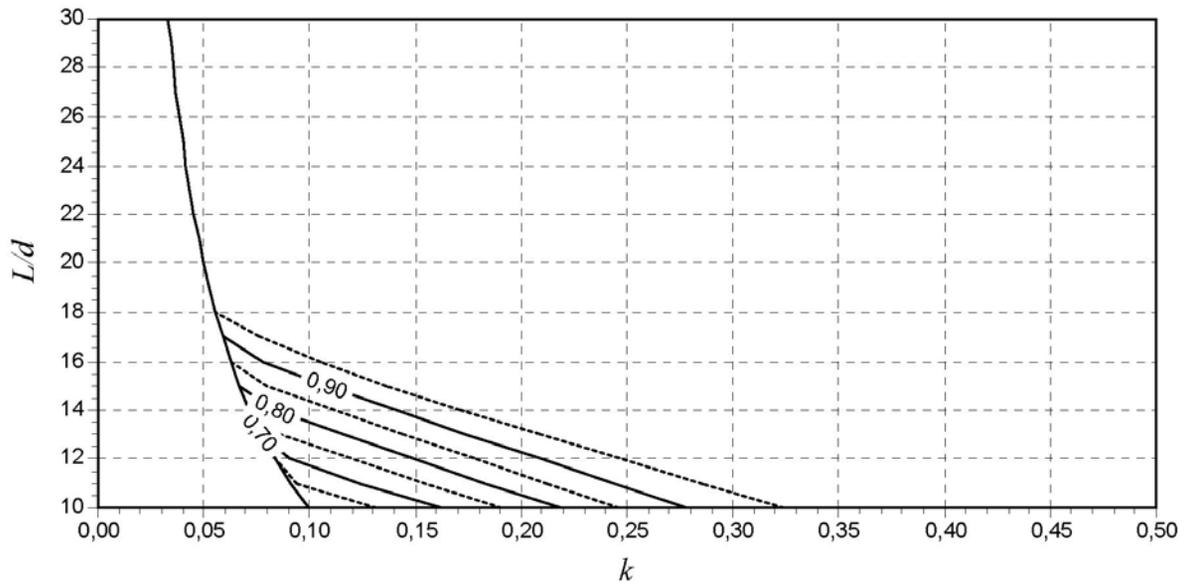
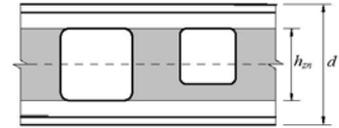
$$h_{zn} \leq 0,7d$$



ÁBACO
43

abertura quadrada

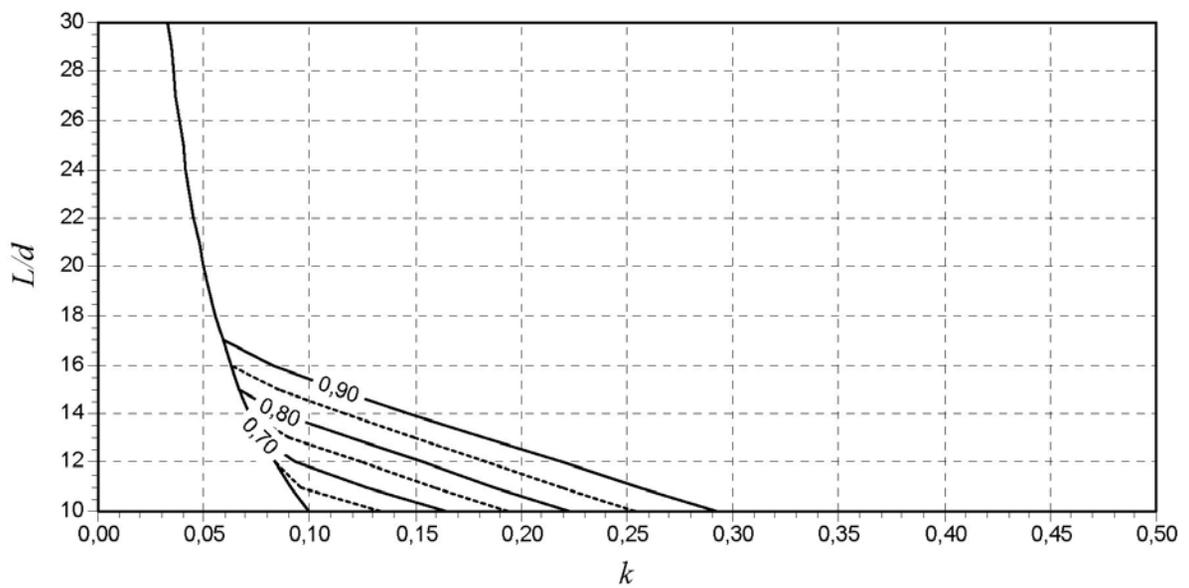
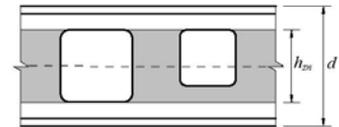
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO
44

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,3d$$

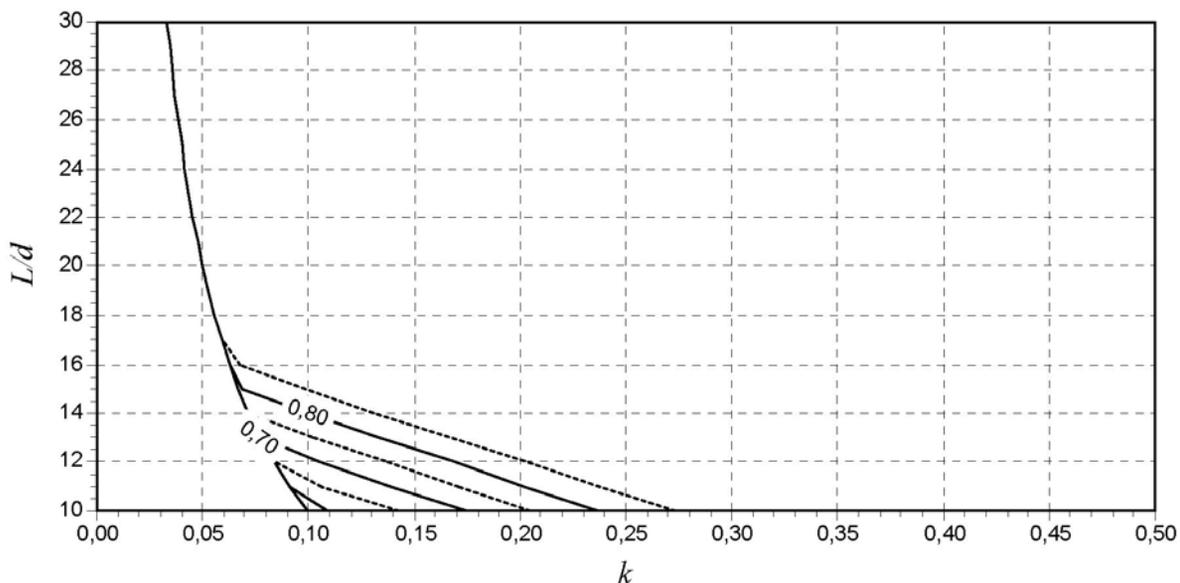
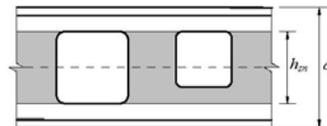


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida

ÁBACO 45

abertura quadrada

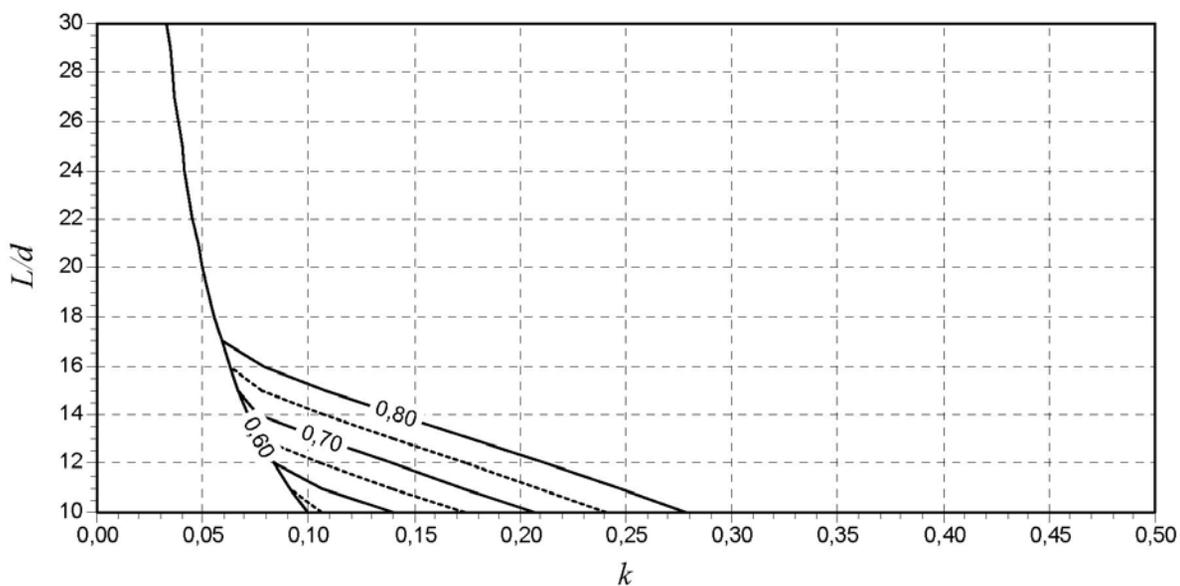
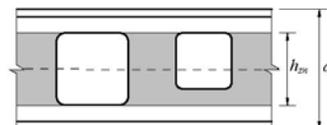
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO 46

abertura quadrada

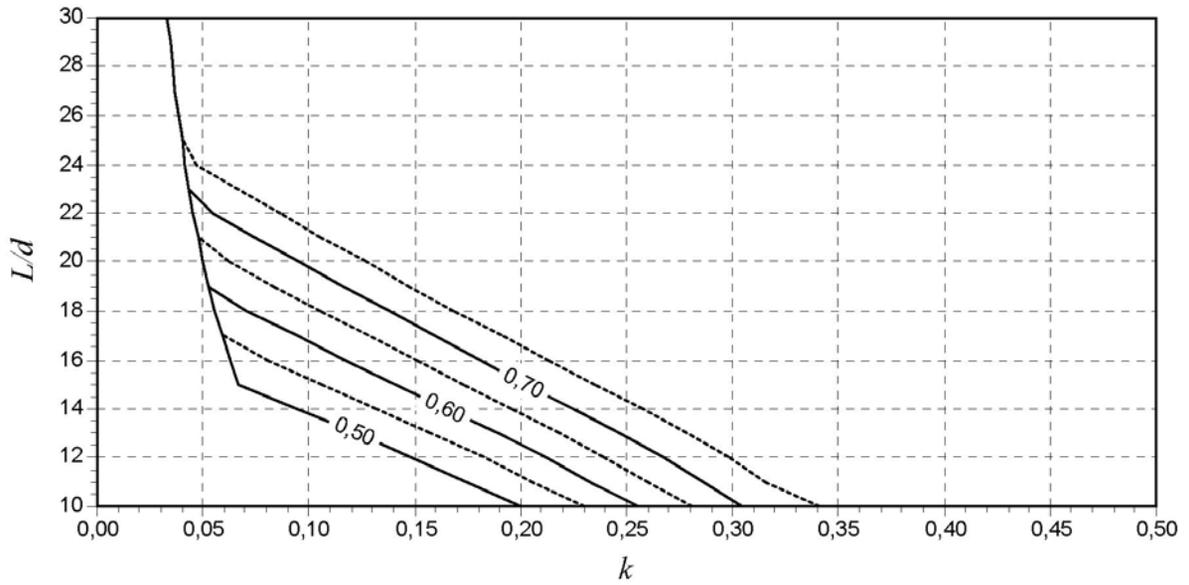
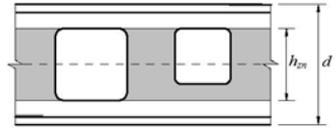
$$h_{zn} \leq 0,5d$$



**ÁBACO
47**

abertura quadrada

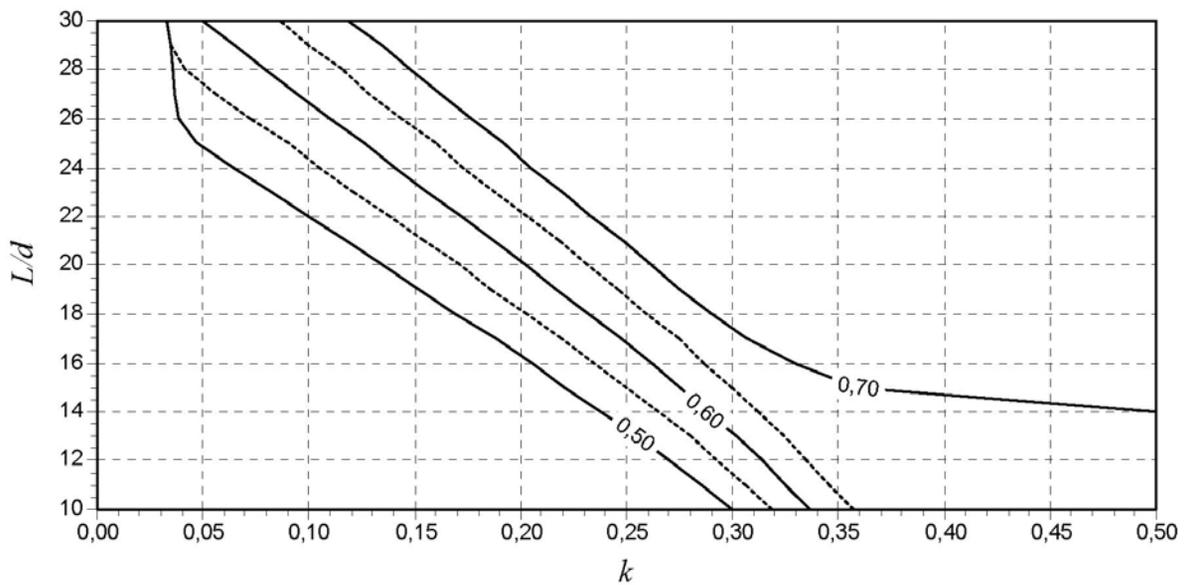
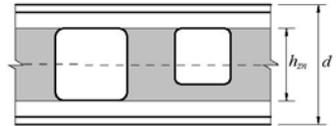
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
48**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,7d$$

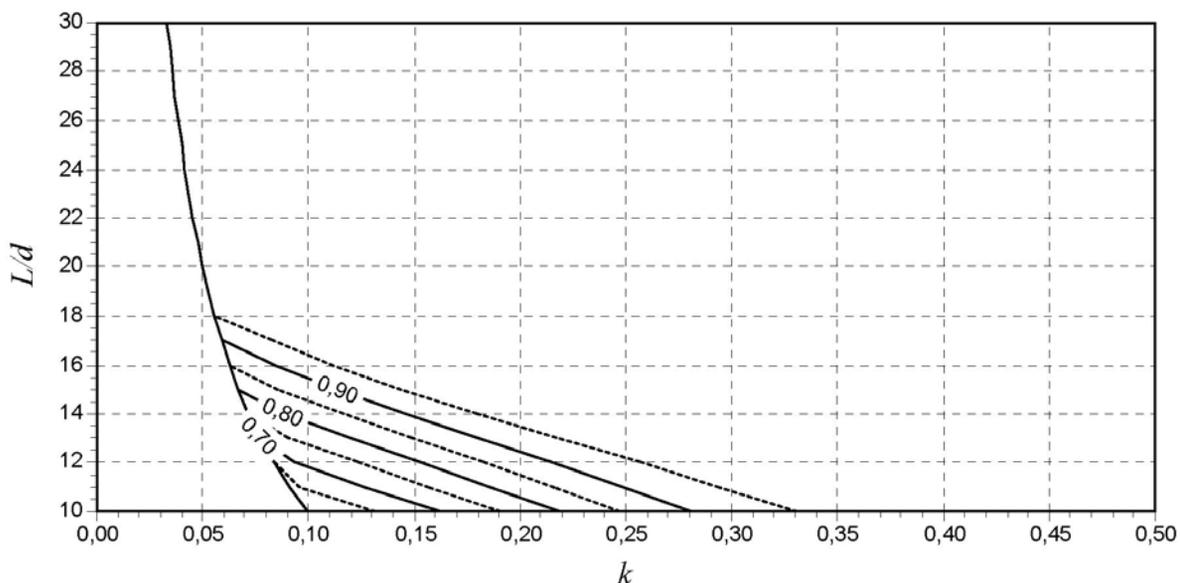
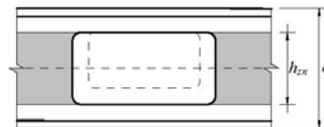


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida

**ÁBACO
49**

abertura retangular
2:1

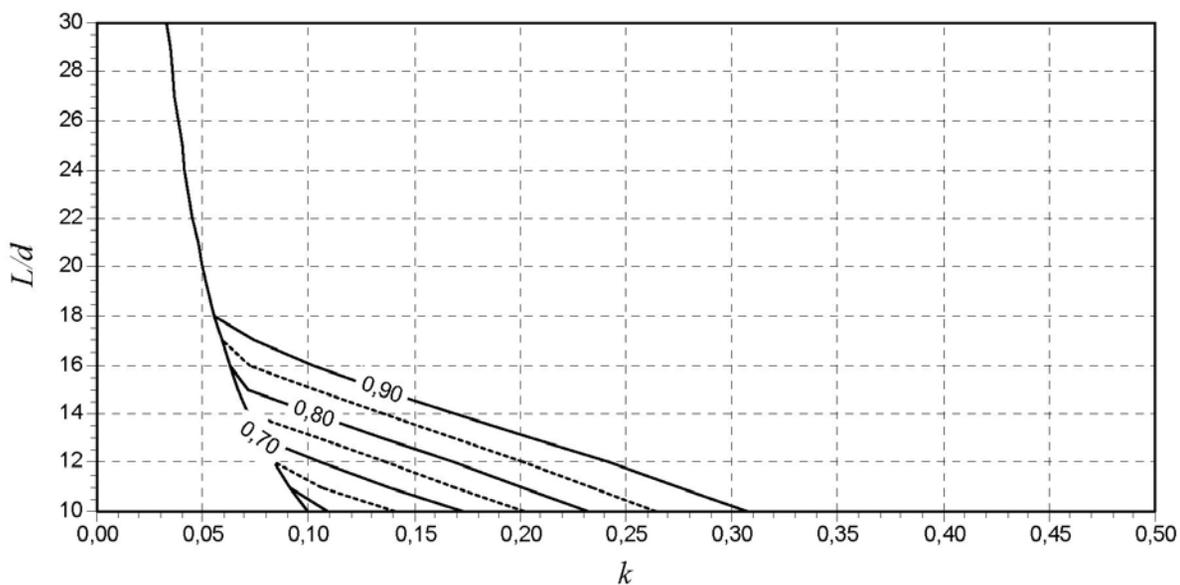
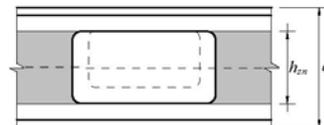
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
50**

abertura retangular
2:1

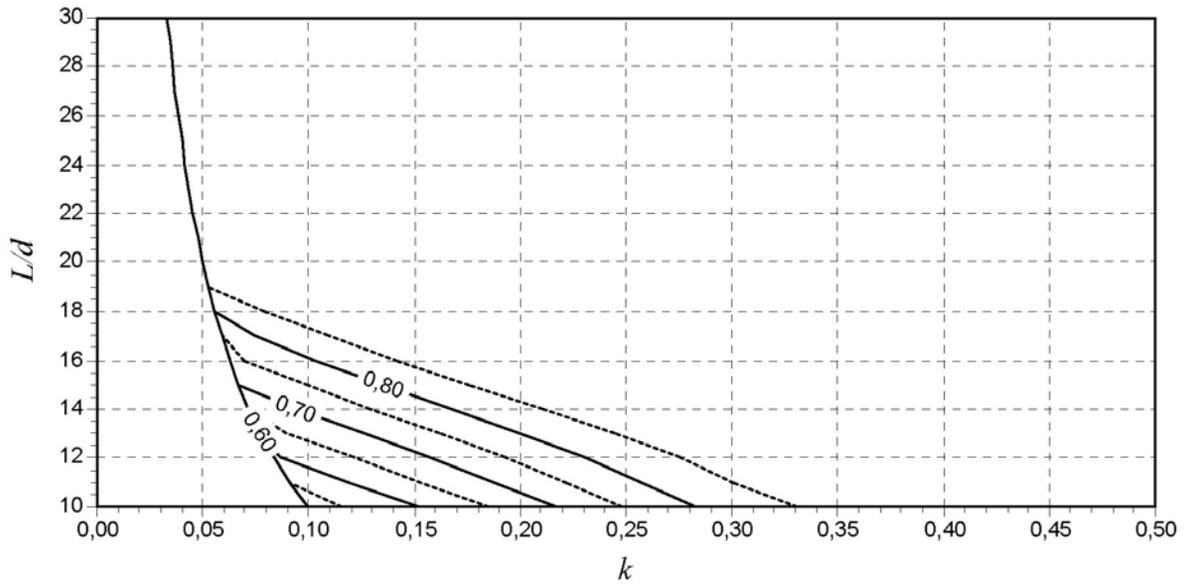
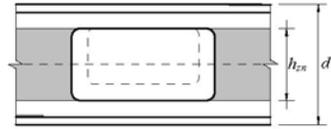
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
51

abertura retangular
2:1

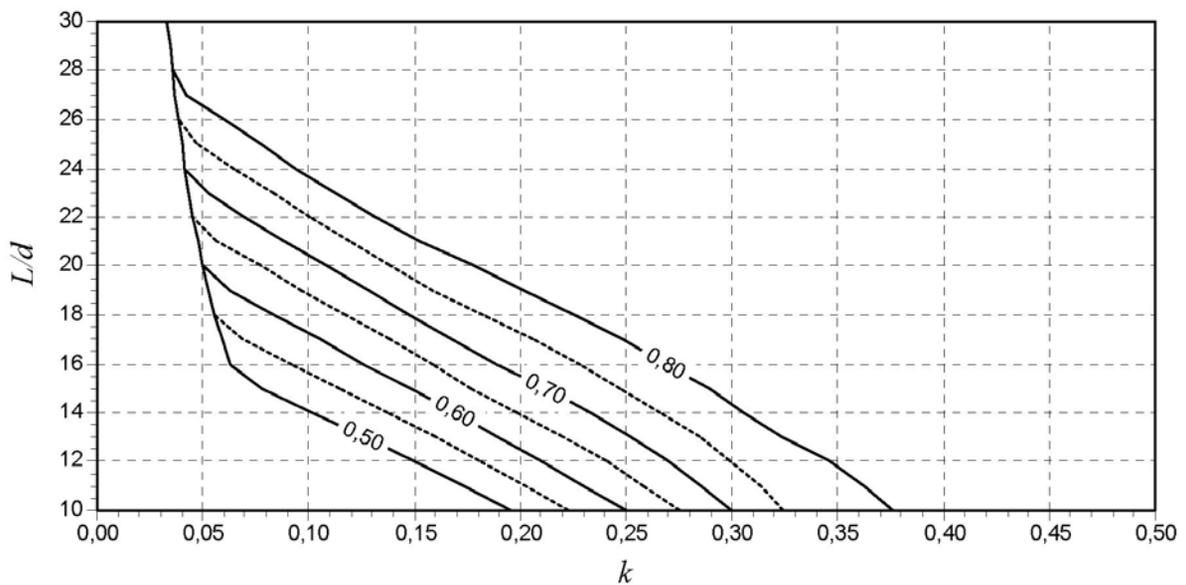
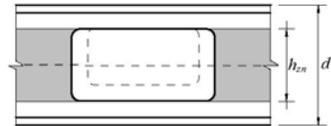
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
52

abertura retangular
2:1

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

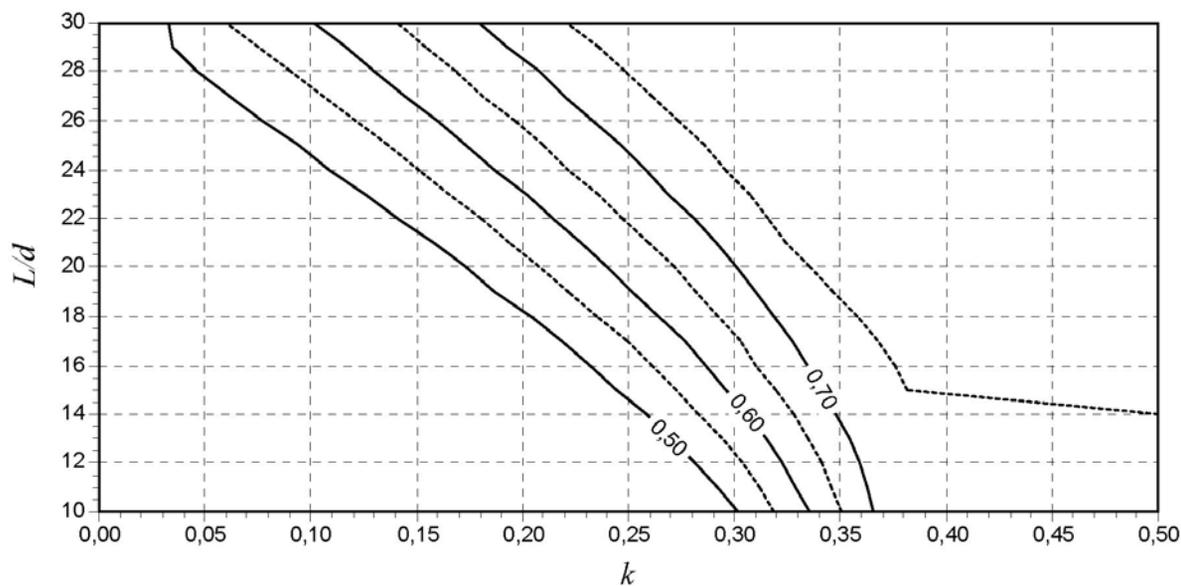
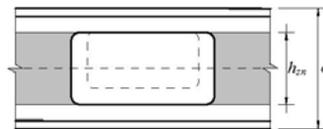


Ábacos para aberturas em vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida

**ÁBACO
53**

abertura retangular
2 : 1

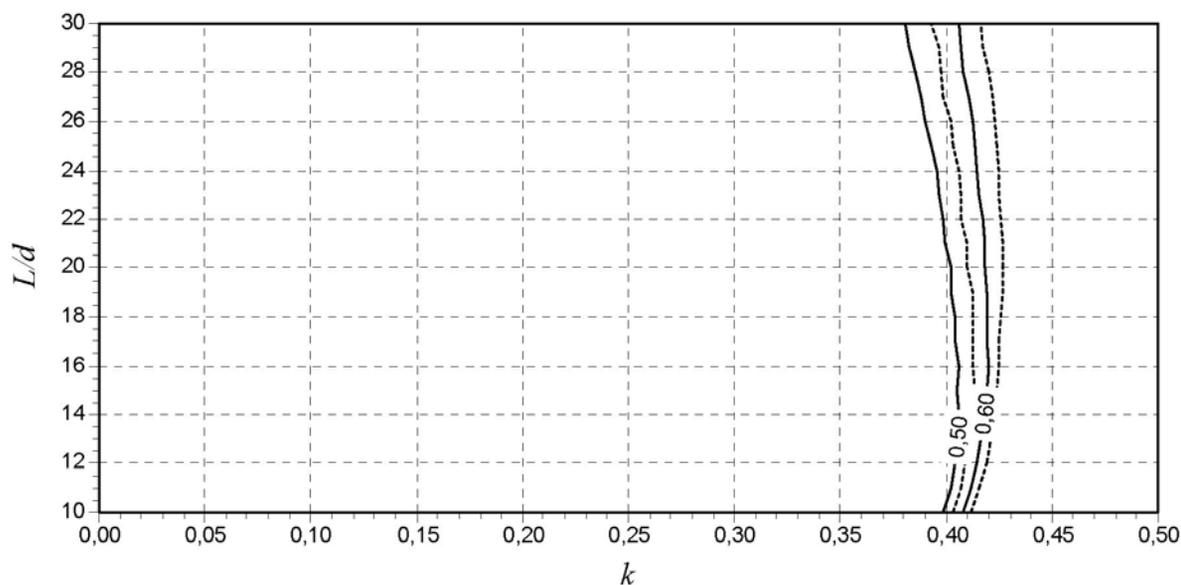
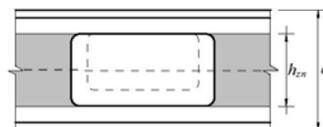
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
54**

abertura retangular
1,4 : 1

$$h_{zn} \leq 0,7d$$



Capítulo 5

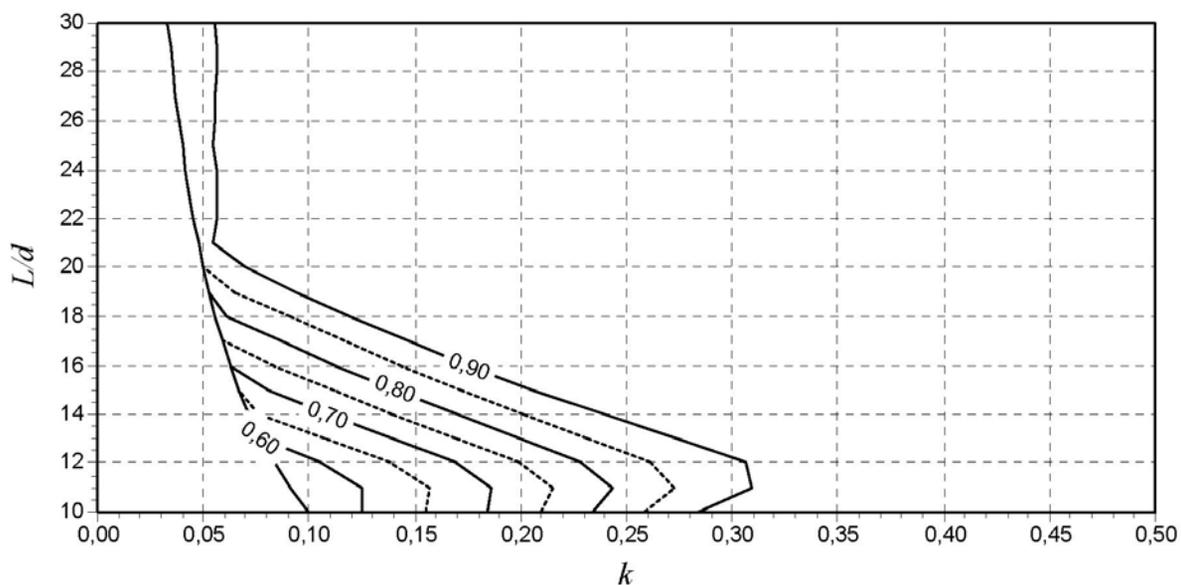
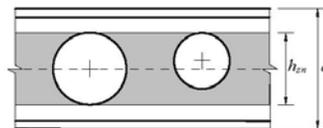
Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado

Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado

ÁBACO 55

abertura circular

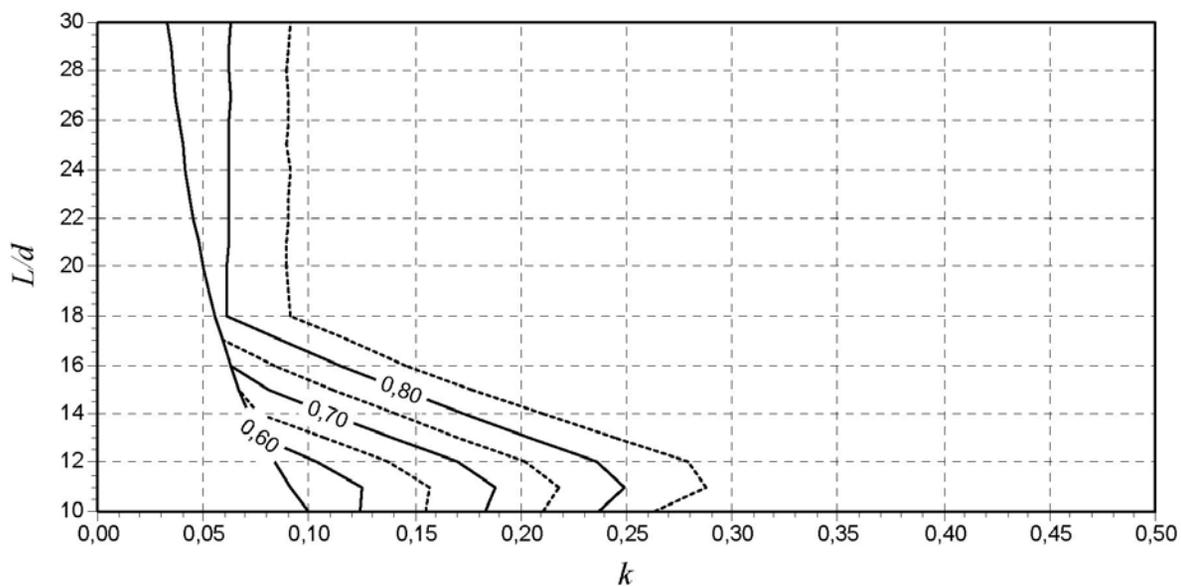
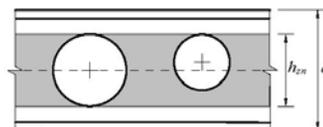
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 56

abertura circular

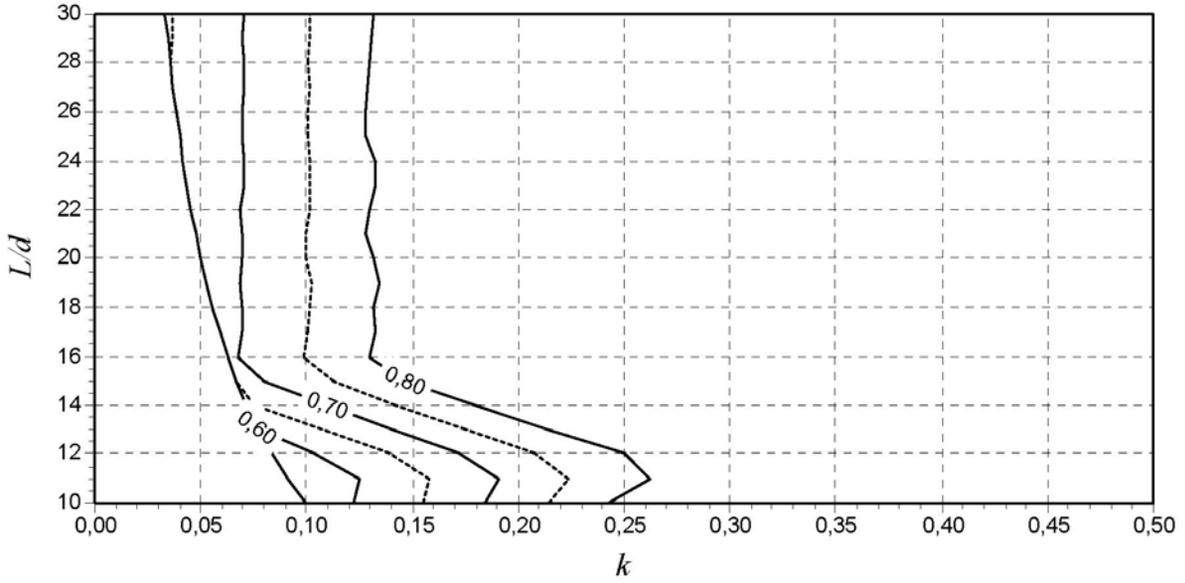
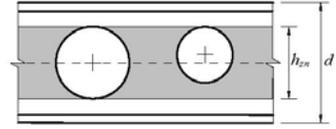
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



**ÁBACO
57**

abertura circular

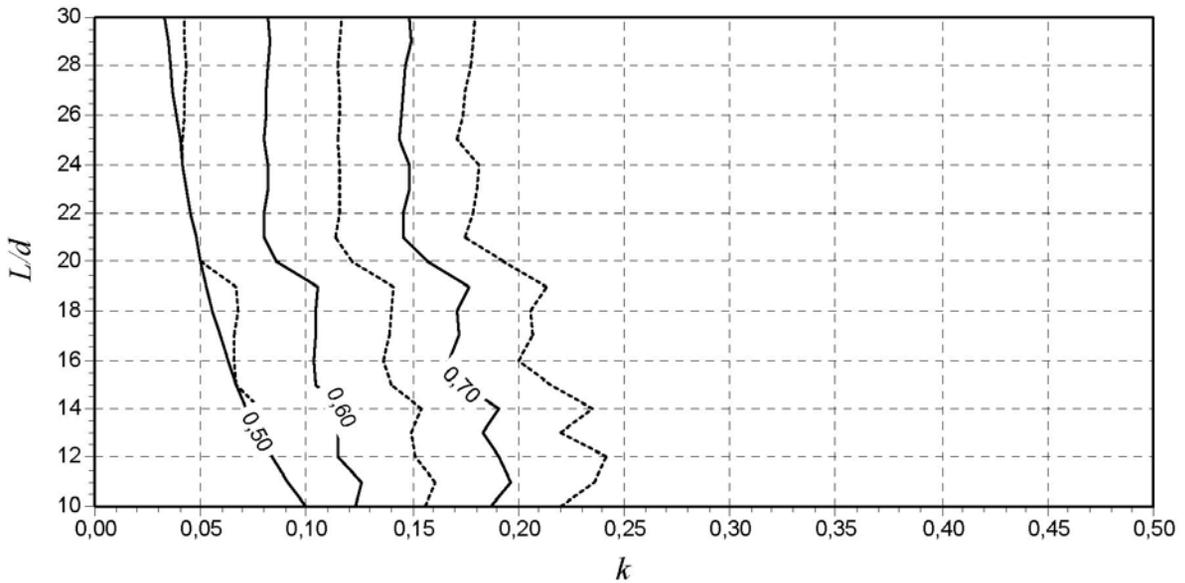
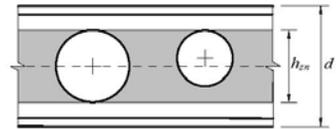
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



**ÁBACO
58**

abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

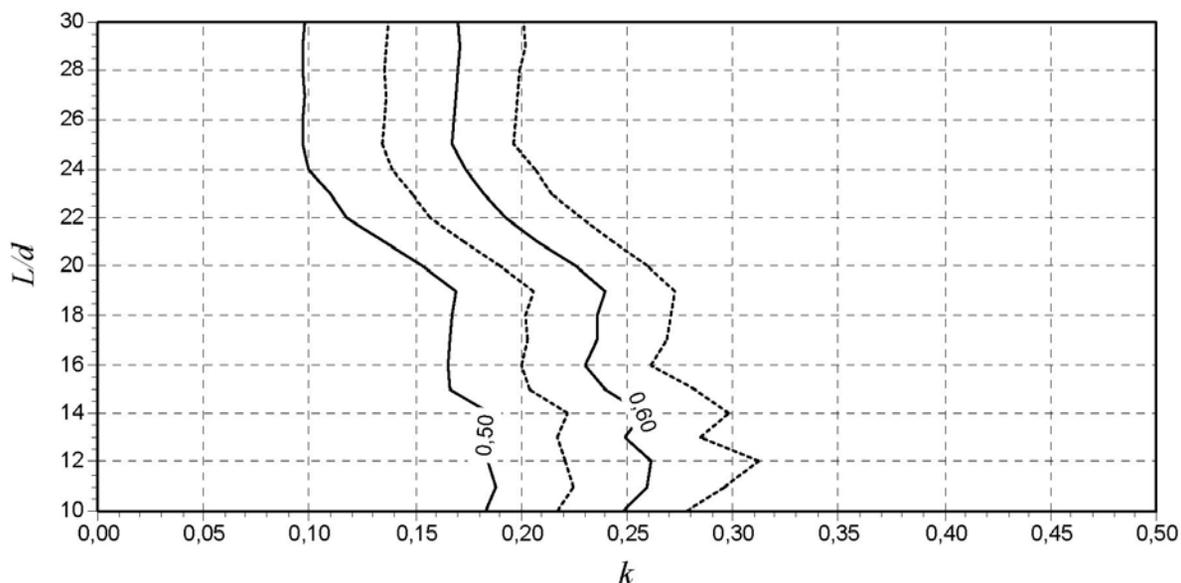
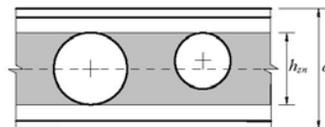


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado

ÁBACO 59

abertura circular

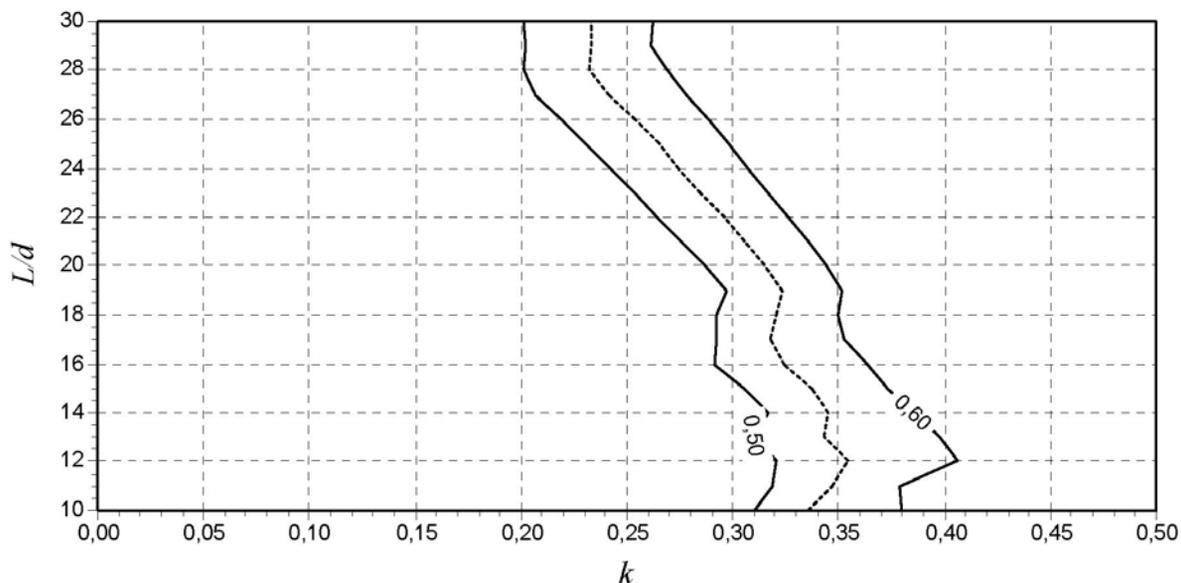
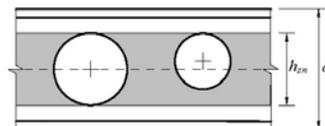
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 60

abertura circular

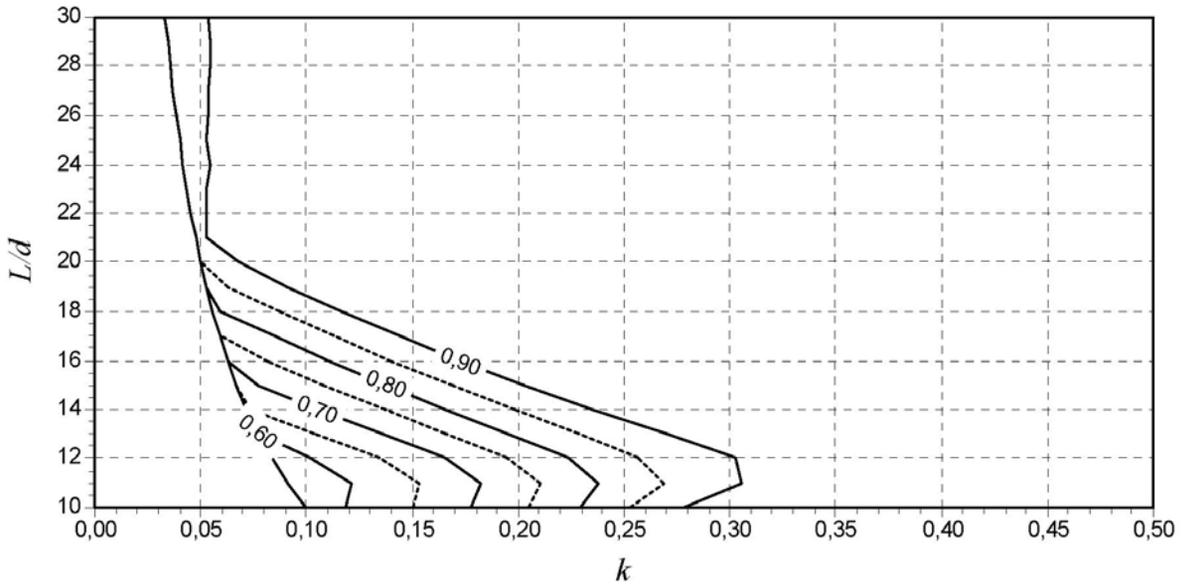
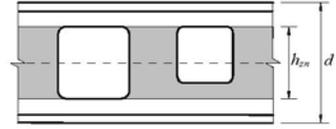
$$h_{zn} \leq 0,7d$$



**ÁBACO
61**

abertura quadrada

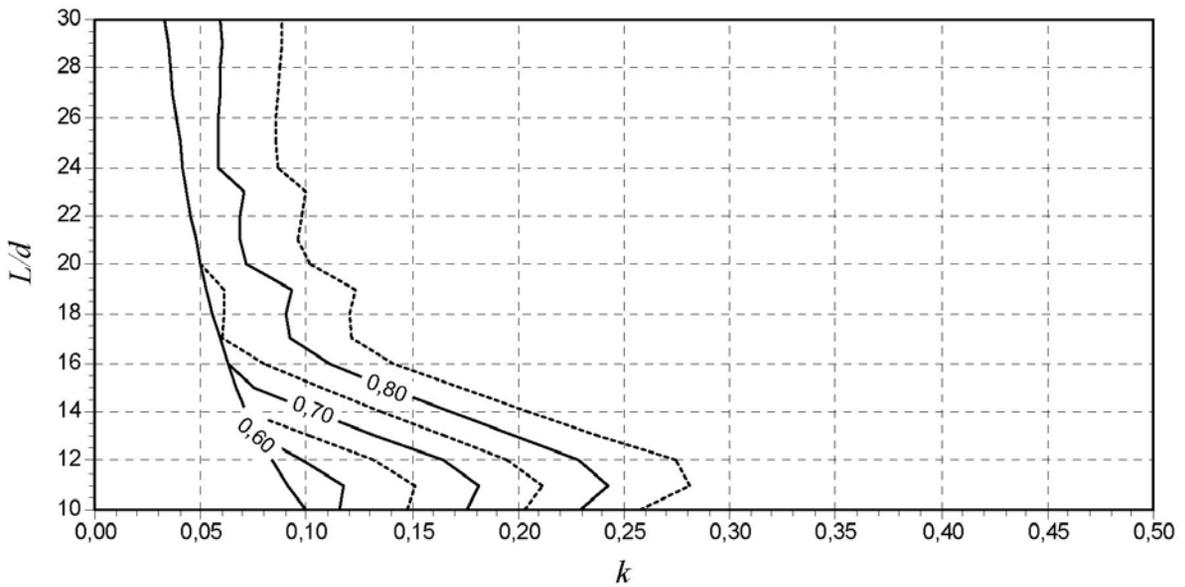
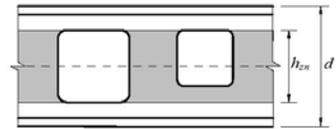
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
62**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,3d$$

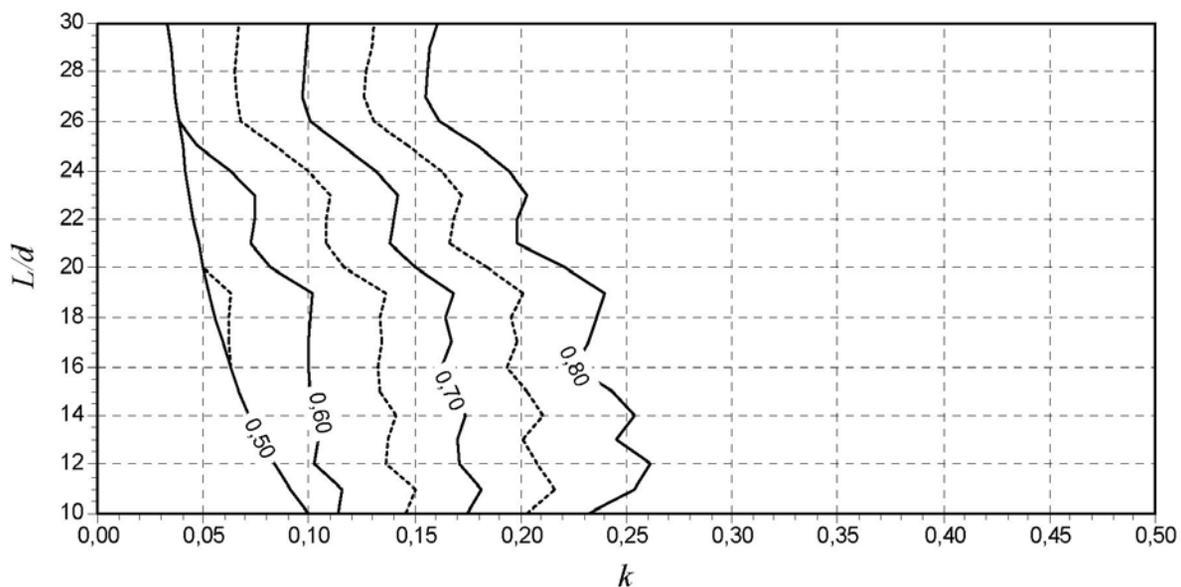
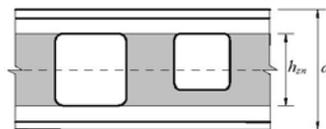


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado

ÁBACO 63

abertura quadrada

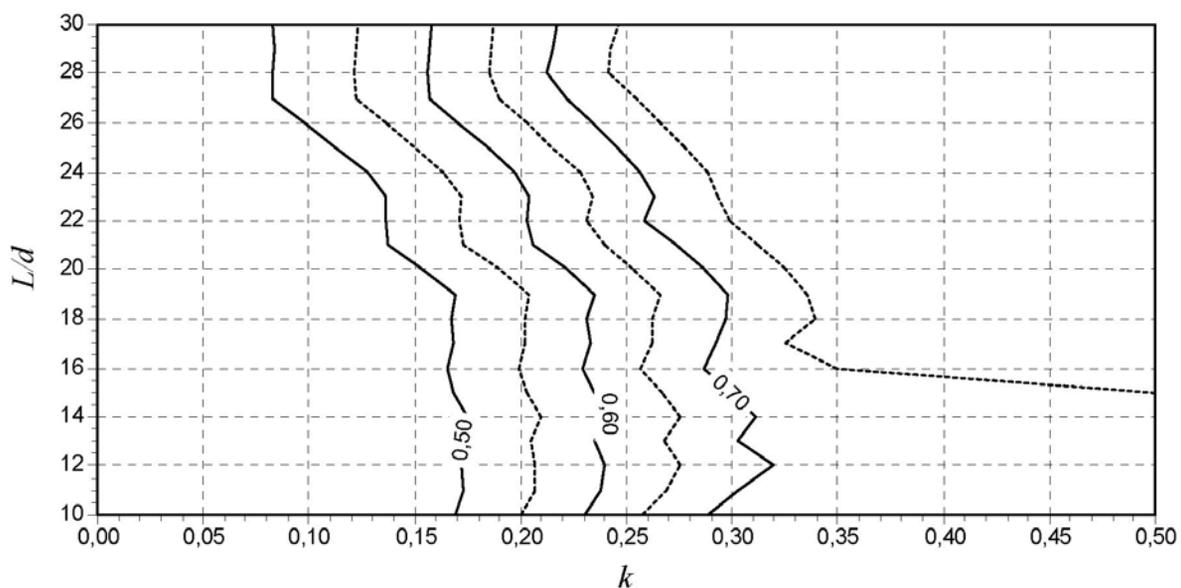
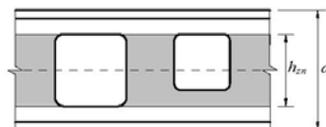
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO 64

abertura quadrada

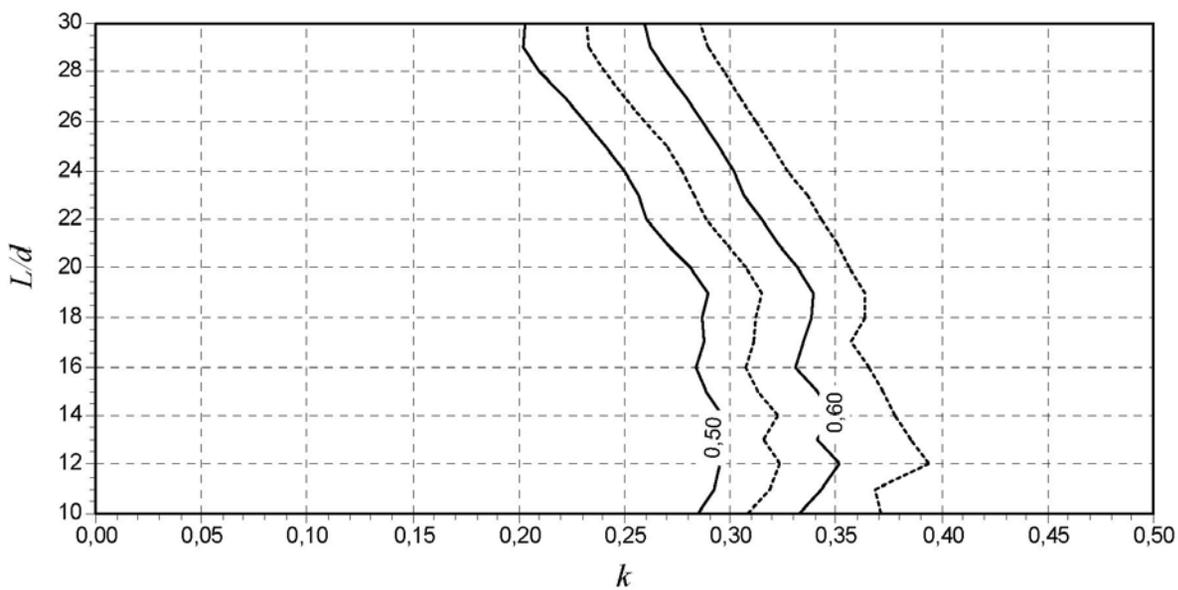
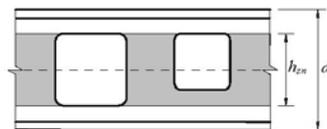
$$h_{zn} \leq 0,5d$$



**ÁBACO
65**

abertura quadrada

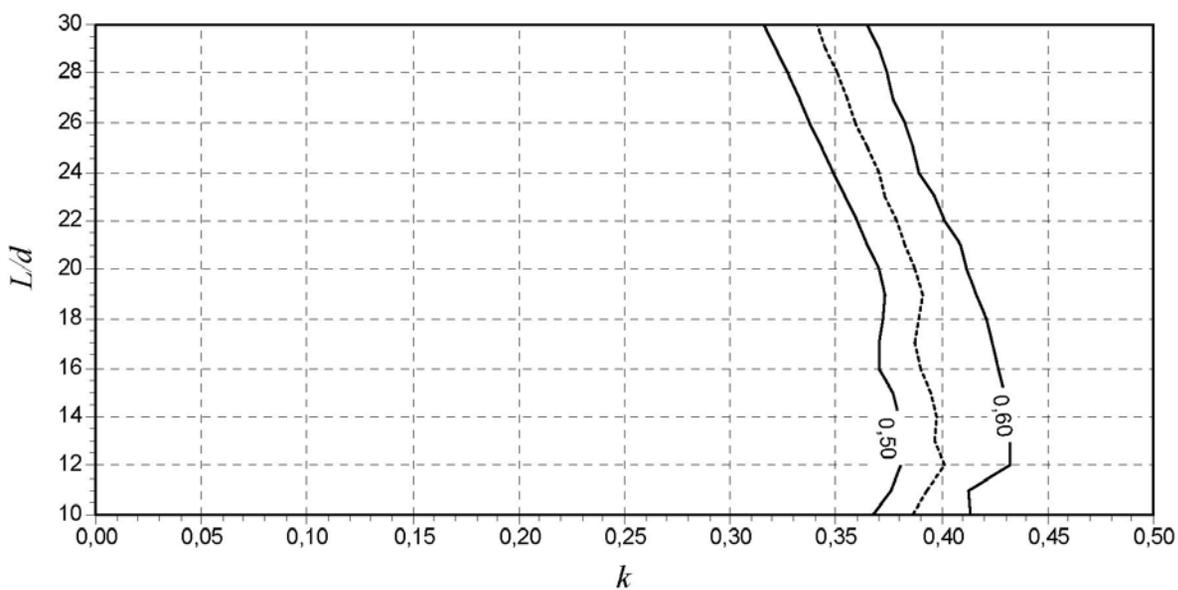
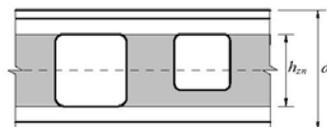
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
66**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,7d$$

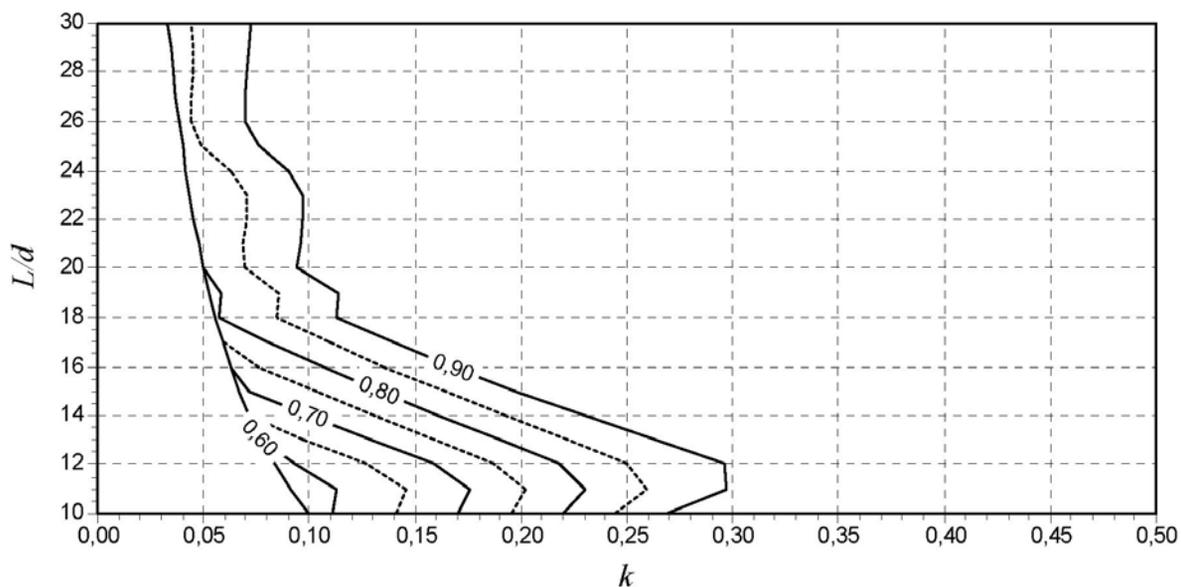
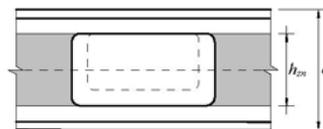


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado

**ÁBACO
67**

abertura retangular
2:1

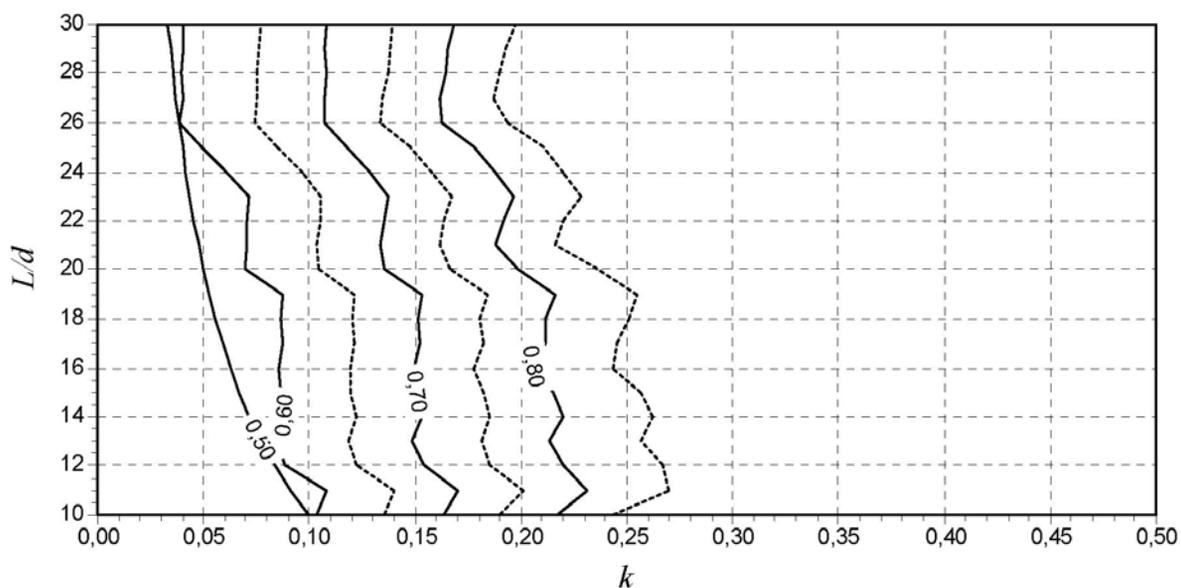
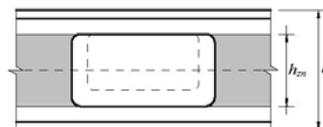
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
68**

abertura retangular
2:1

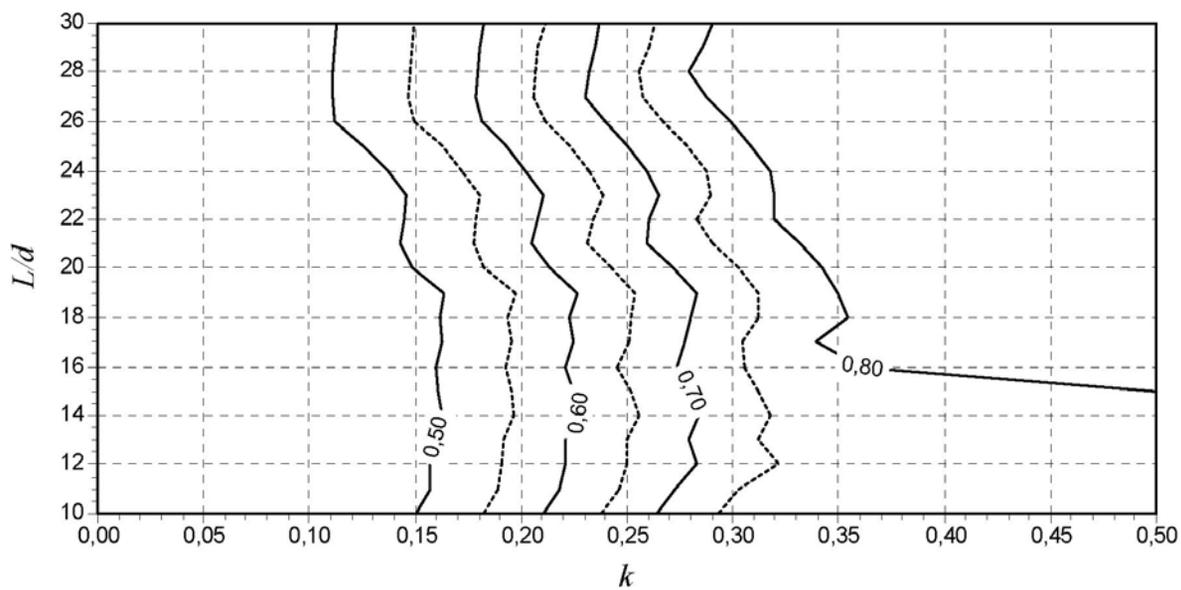
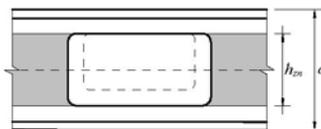
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
69

abertura retangular
2:1

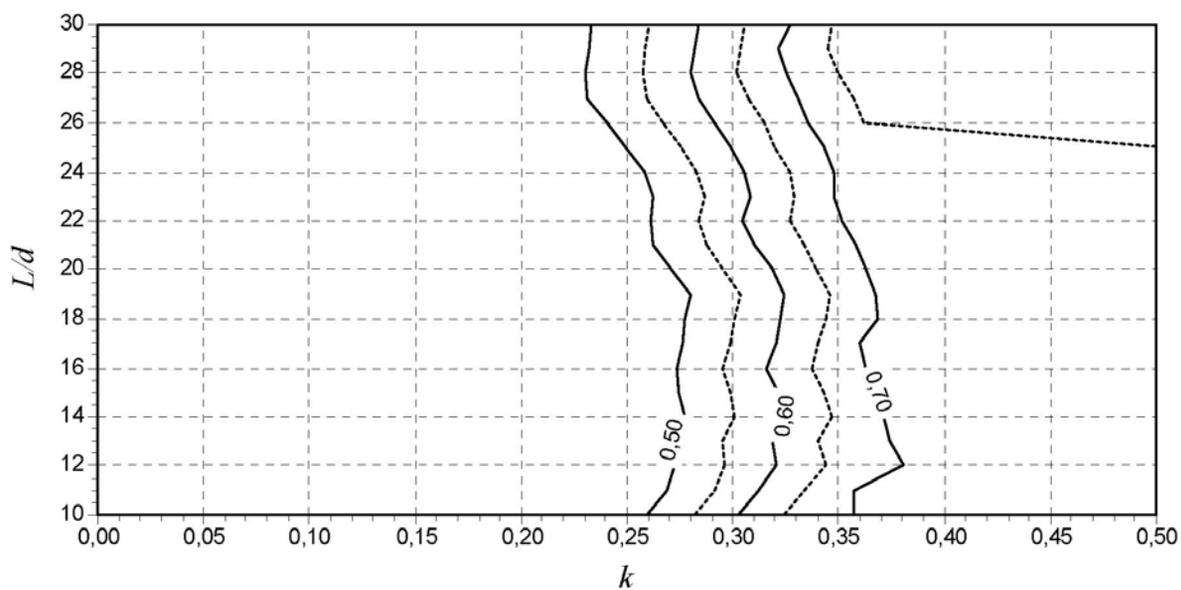
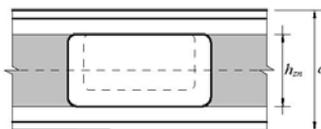
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
70

abertura retangular
2:1

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

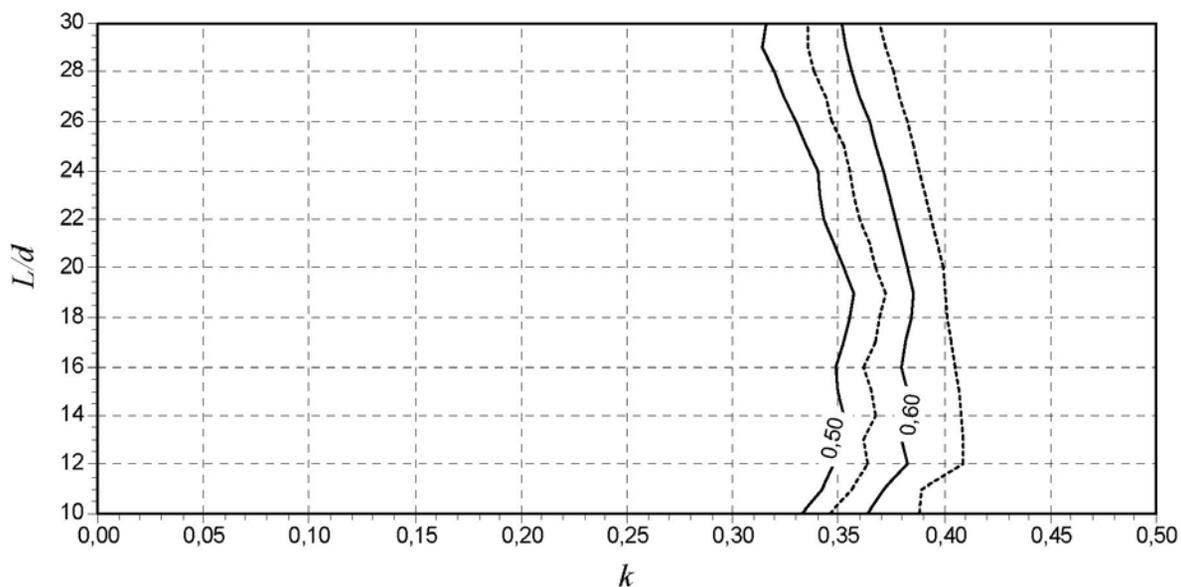
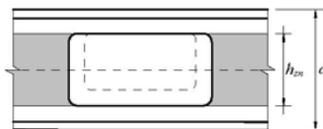


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I laminado

**ÁBACO
71**

abertura retangular
2:1

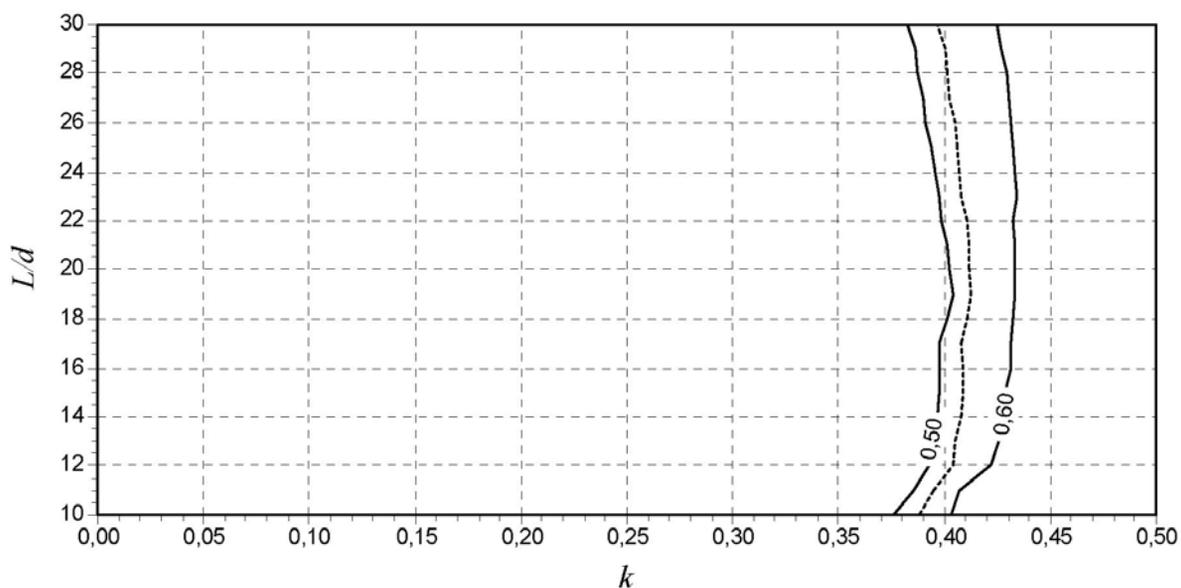
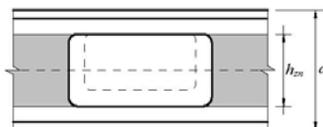
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
72**

abertura retangular
1,8 : 1

$$h_{zn} \leq 0,7d$$



Capítulo 6

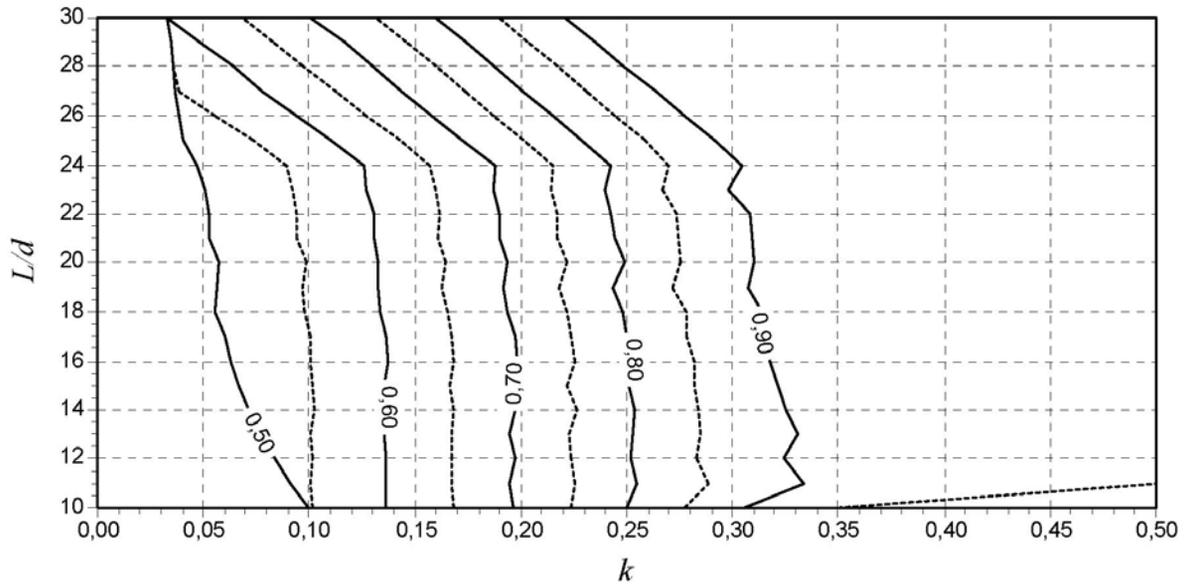
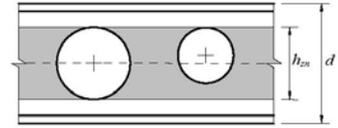
Ábacos para aberturas em vigas mistas
com perfil I soldado duplamente simétrico

Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 73

abertura circular

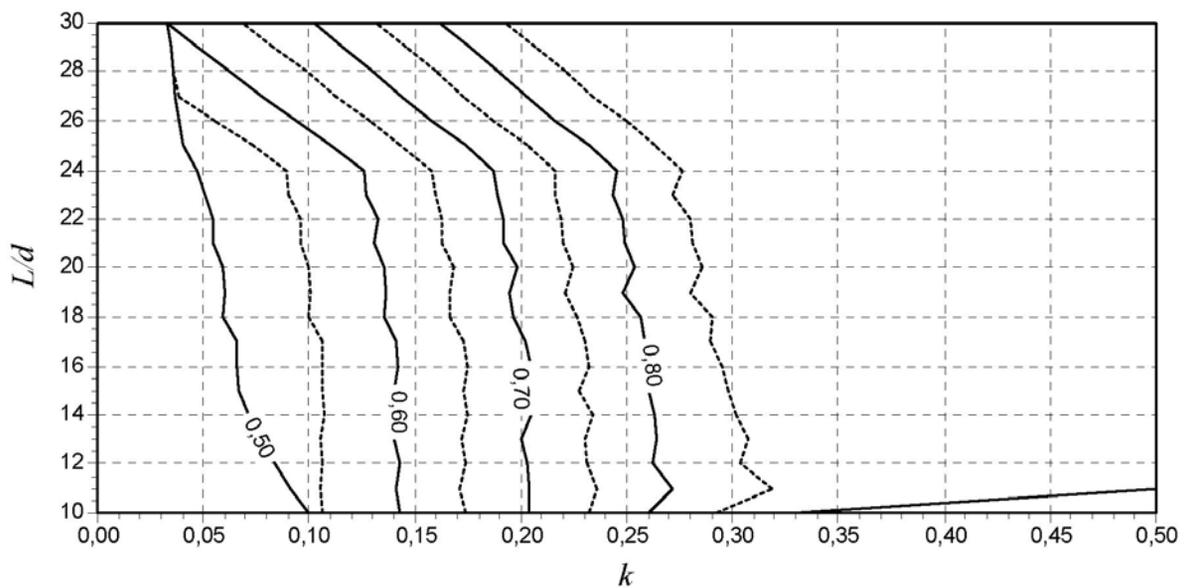
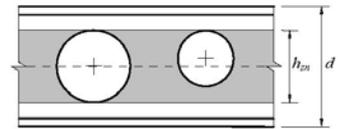
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 74

abertura circular

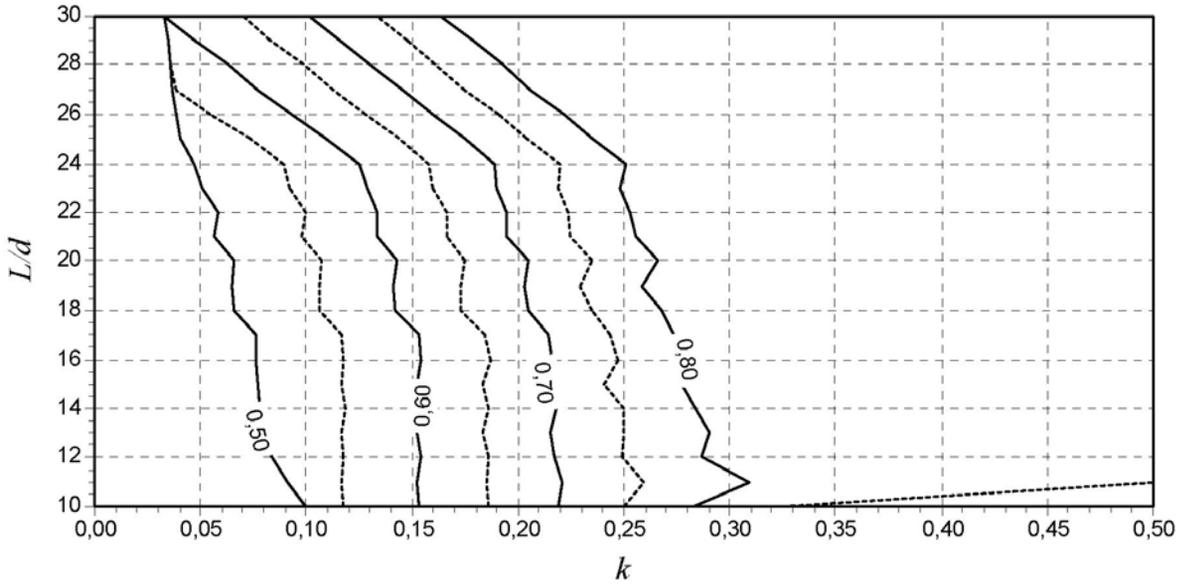
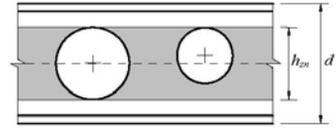
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



**ÁBACO
75**

abertura circular

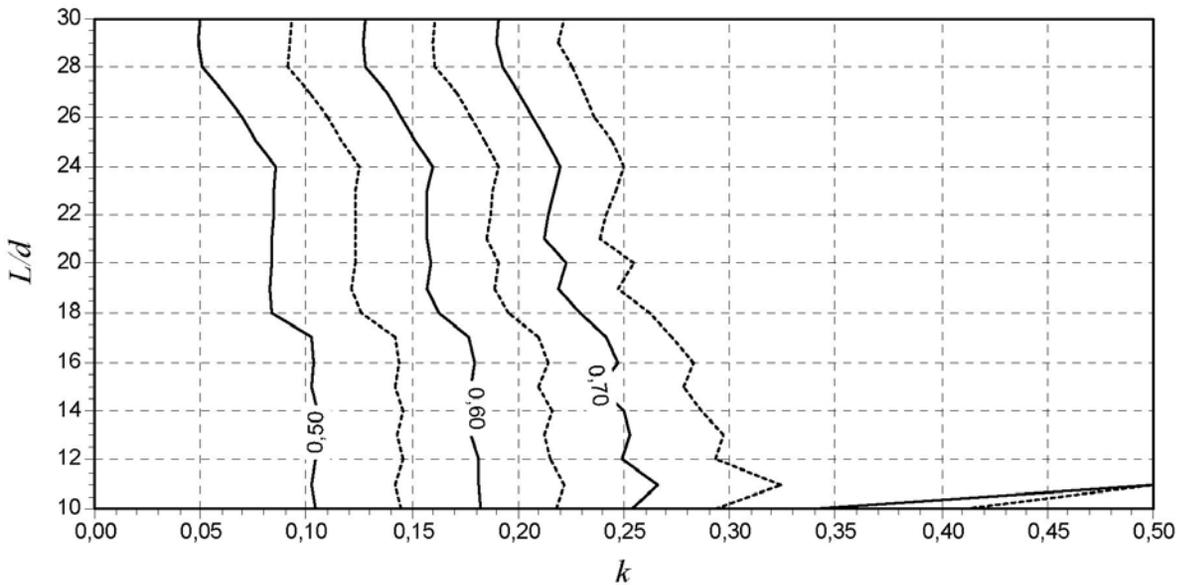
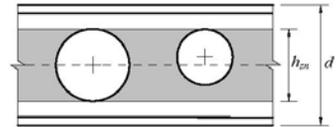
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



**ÁBACO
76**

abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

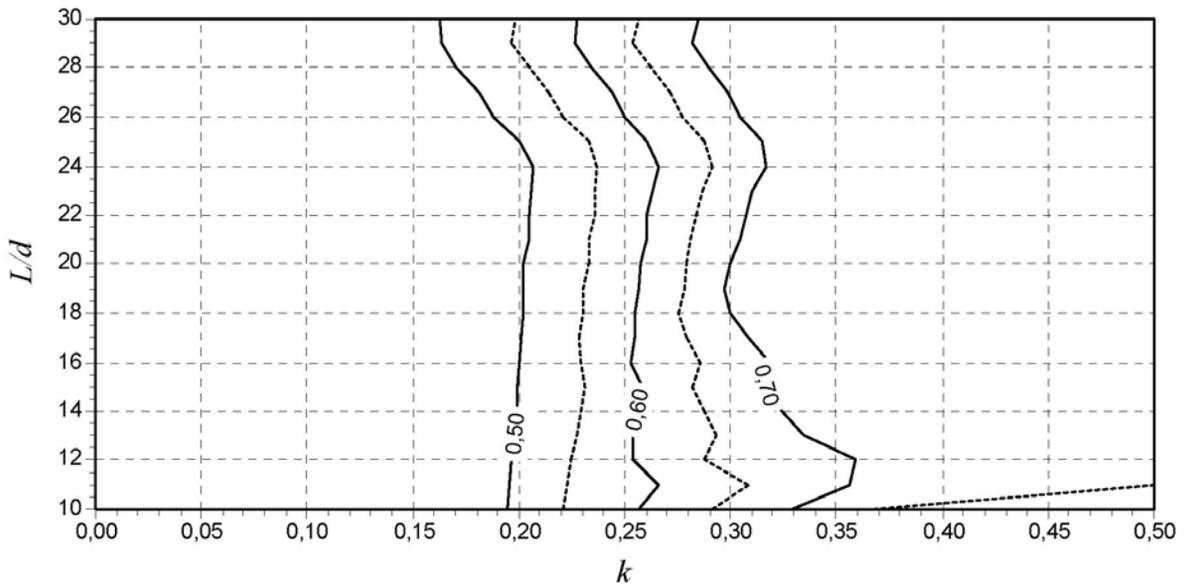
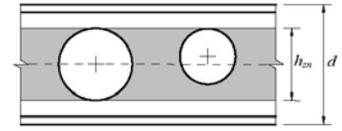


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 77

abertura circular

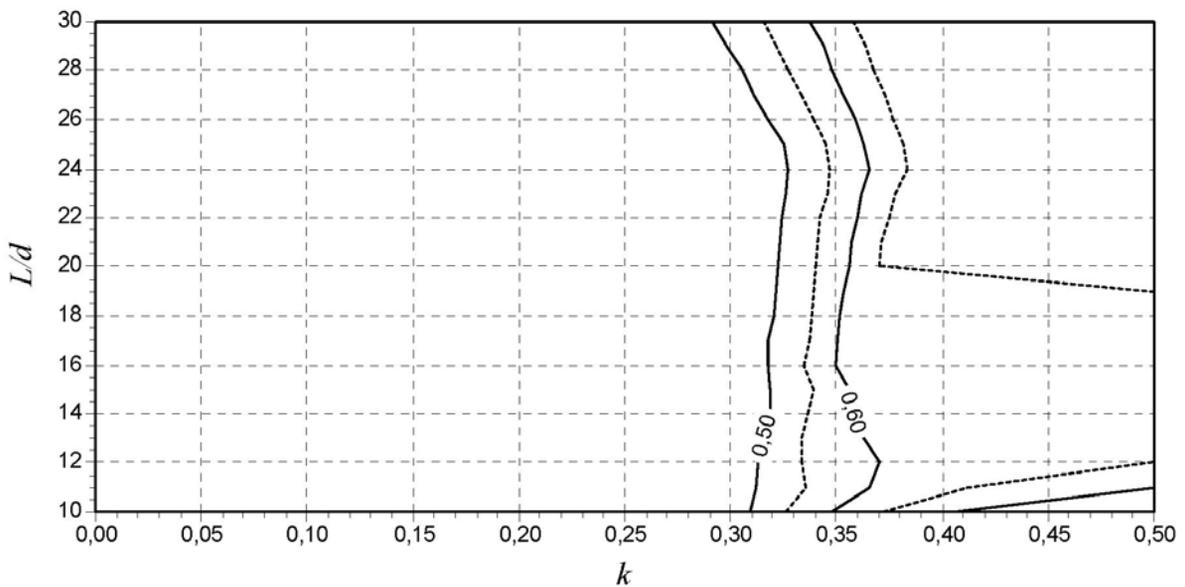
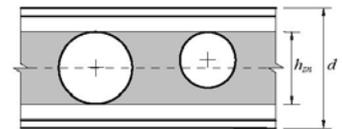
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 78

abertura circular

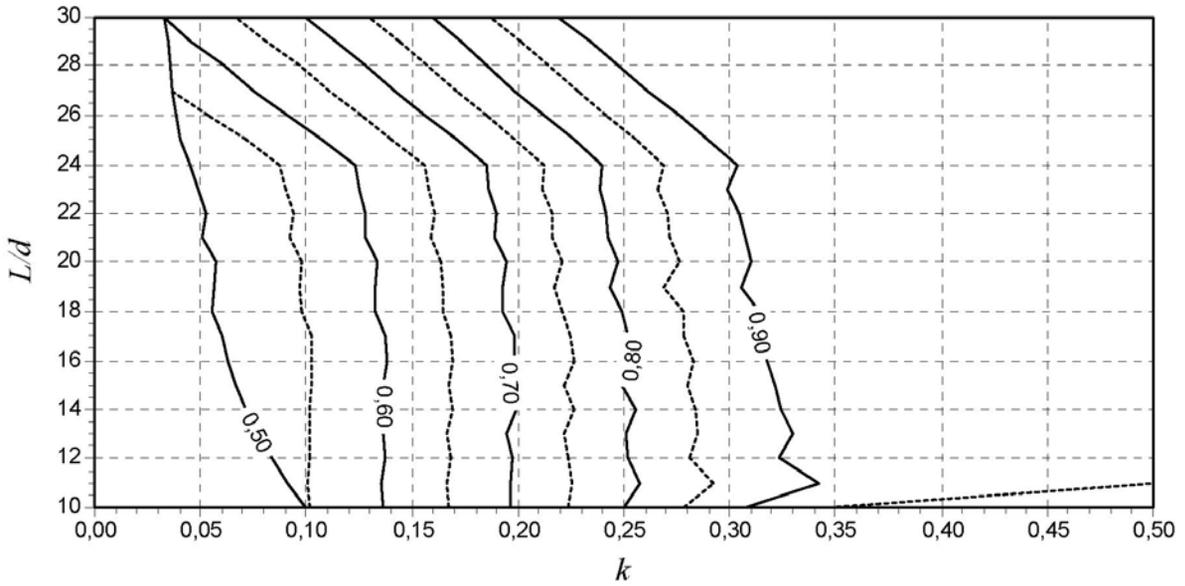
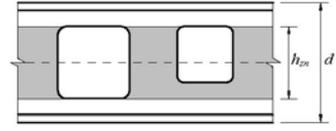
$$h_{zn} \leq 0,7d$$



**ÁBACO
79**

abertura quadrada

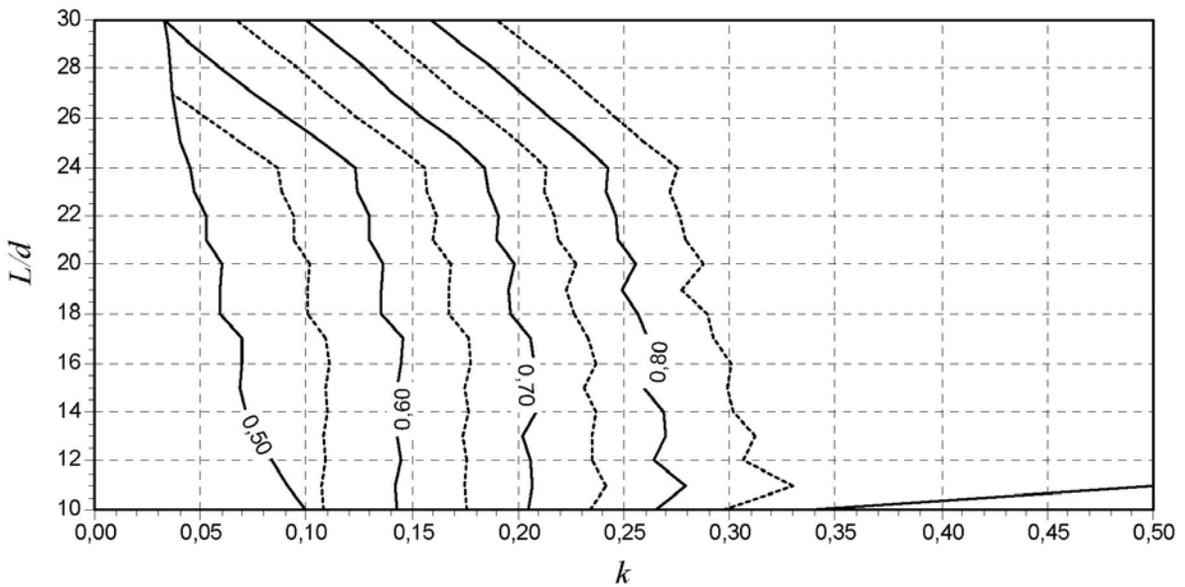
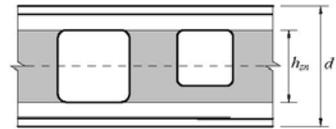
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
80**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,3d$$

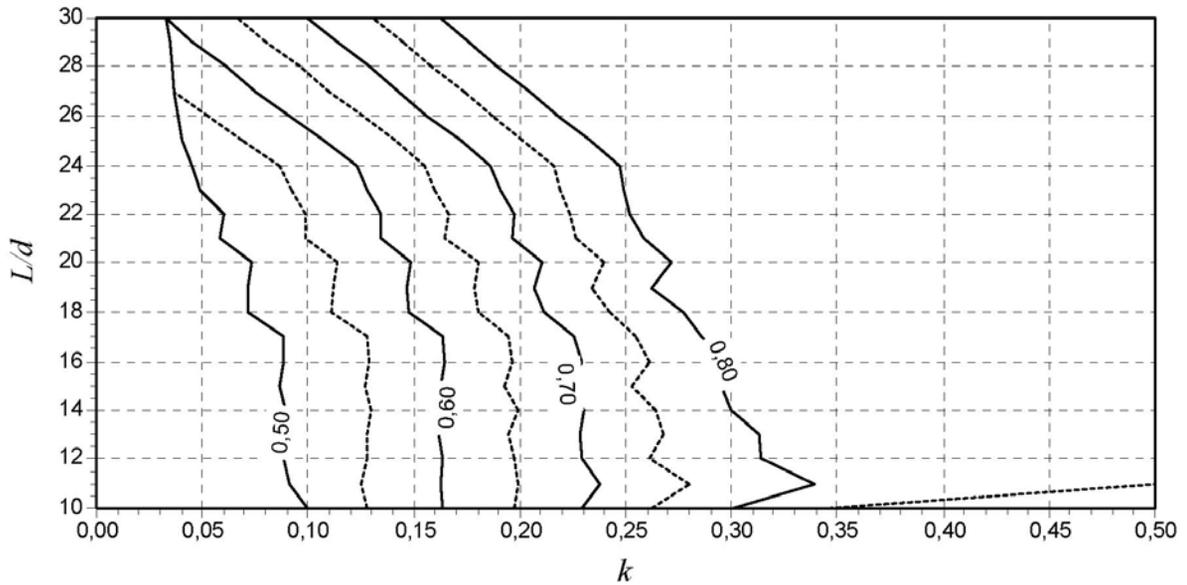
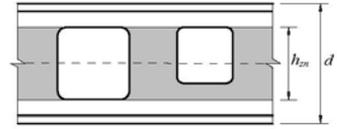


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 81

abertura quadrada

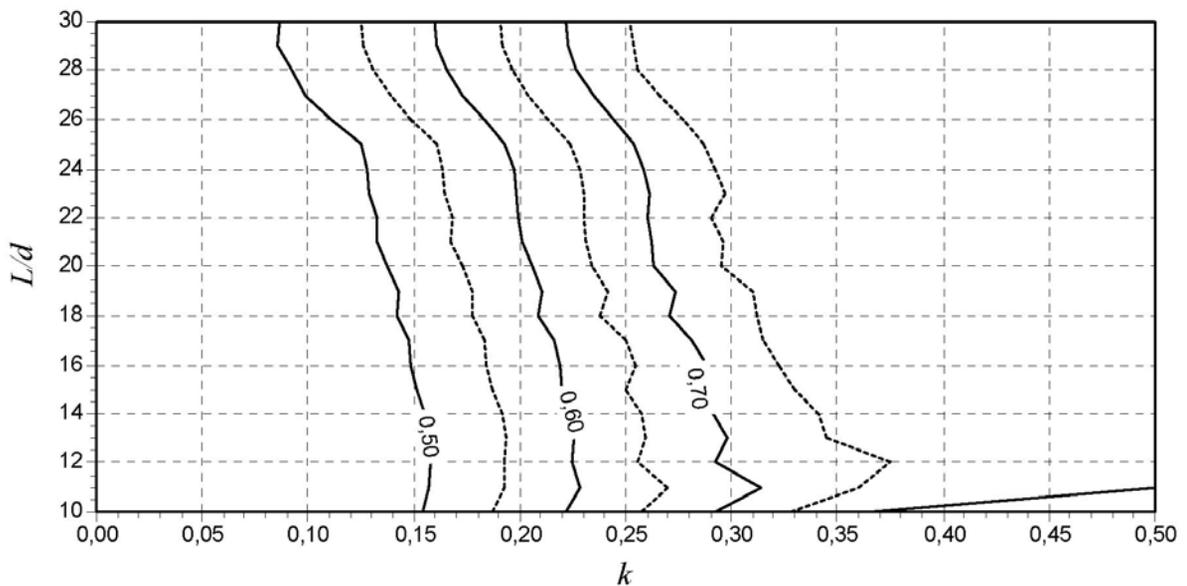
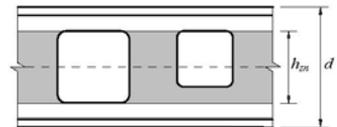
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO 82

abertura quadrada

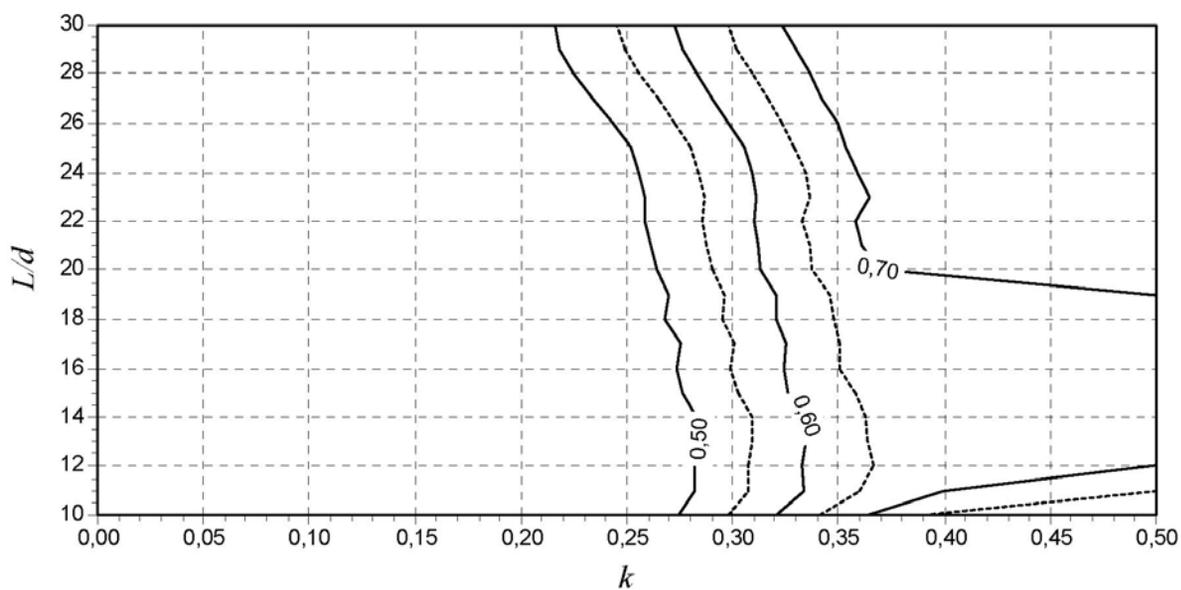
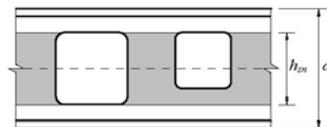
$$h_{zn} \leq 0,5d$$



**ÁBACO
83**

abertura quadrada

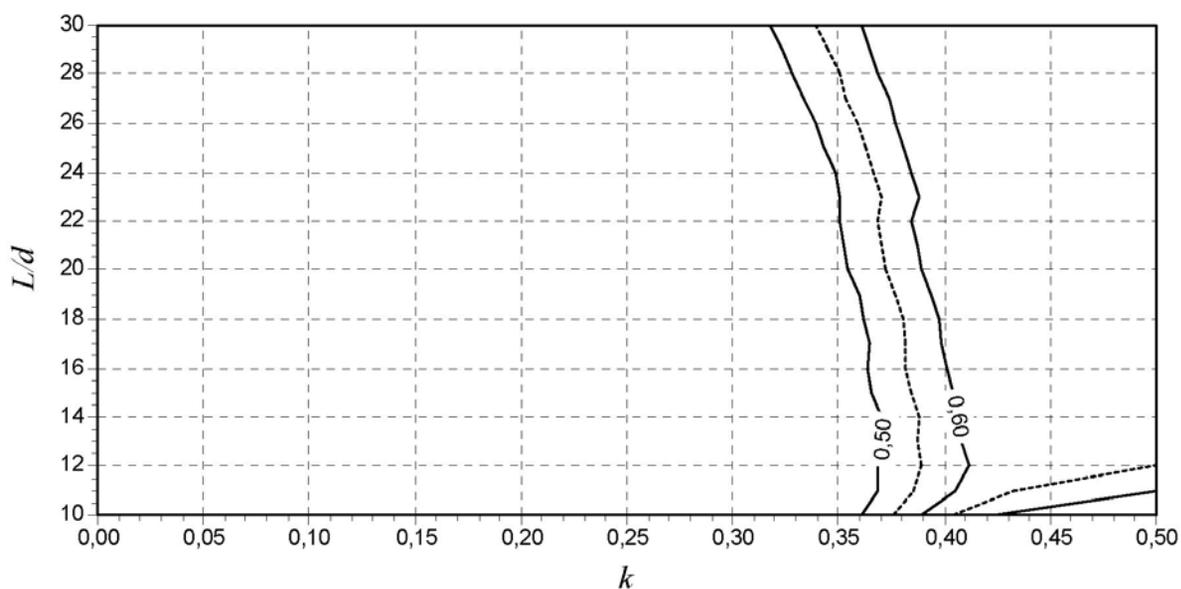
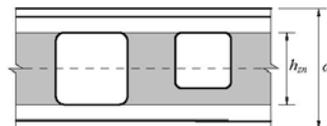
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
84**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,7d$$

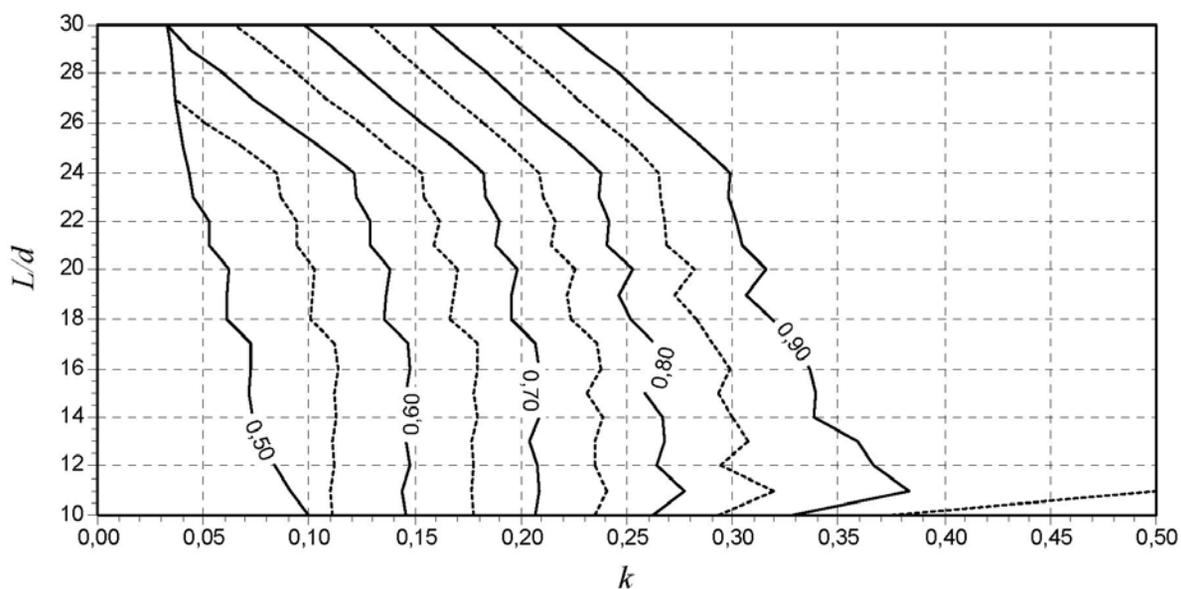
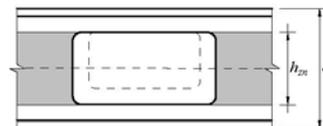


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 85

abertura retangular 2:1

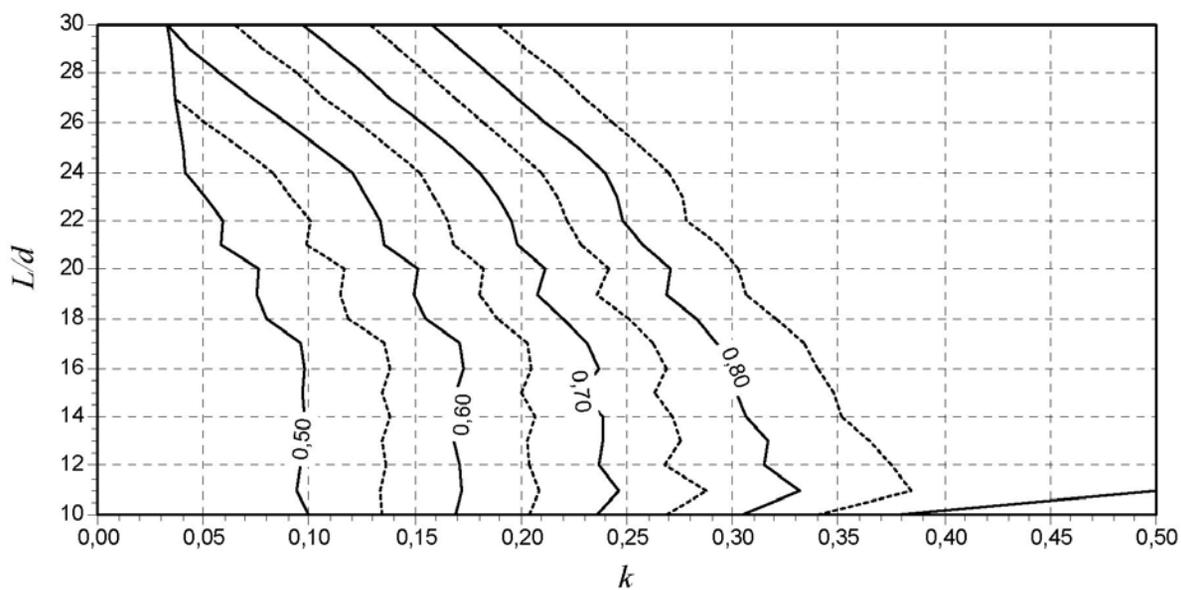
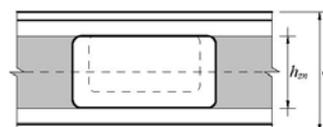
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 86

abertura retangular 2:1

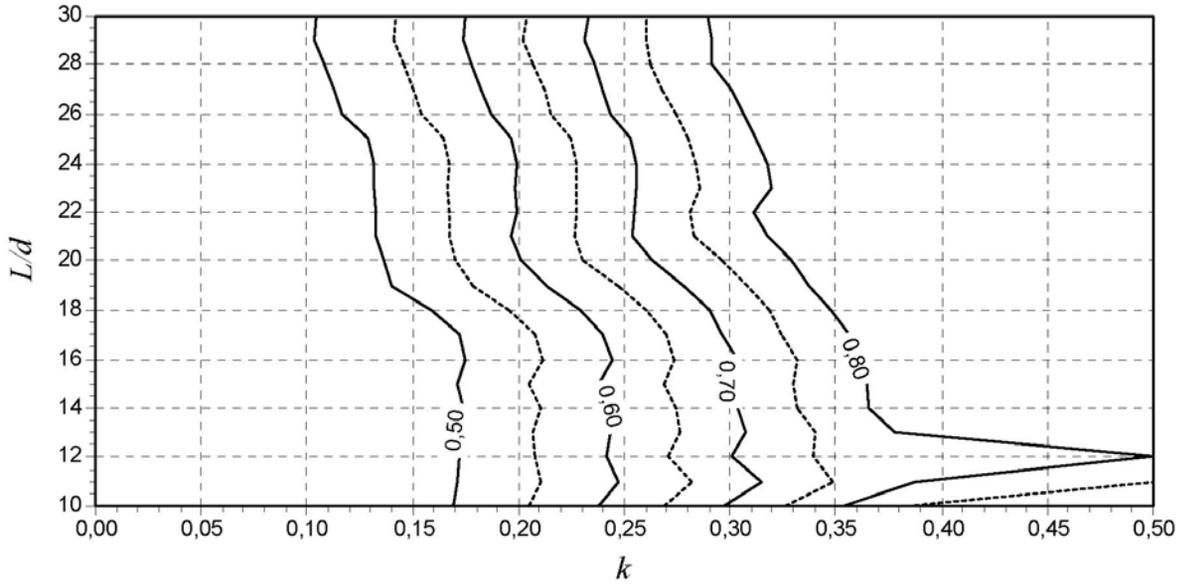
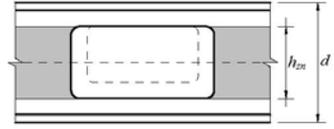
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
87

abertura retangular
2:1

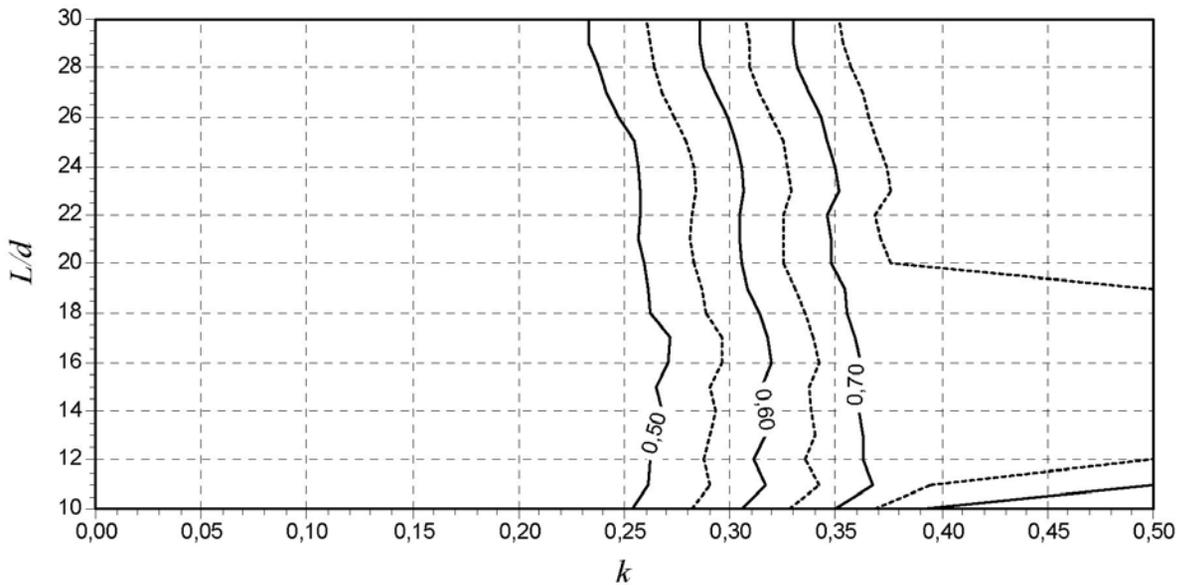
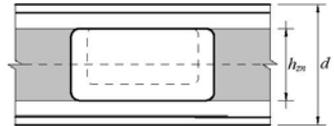
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
88

abertura retangular
2:1

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

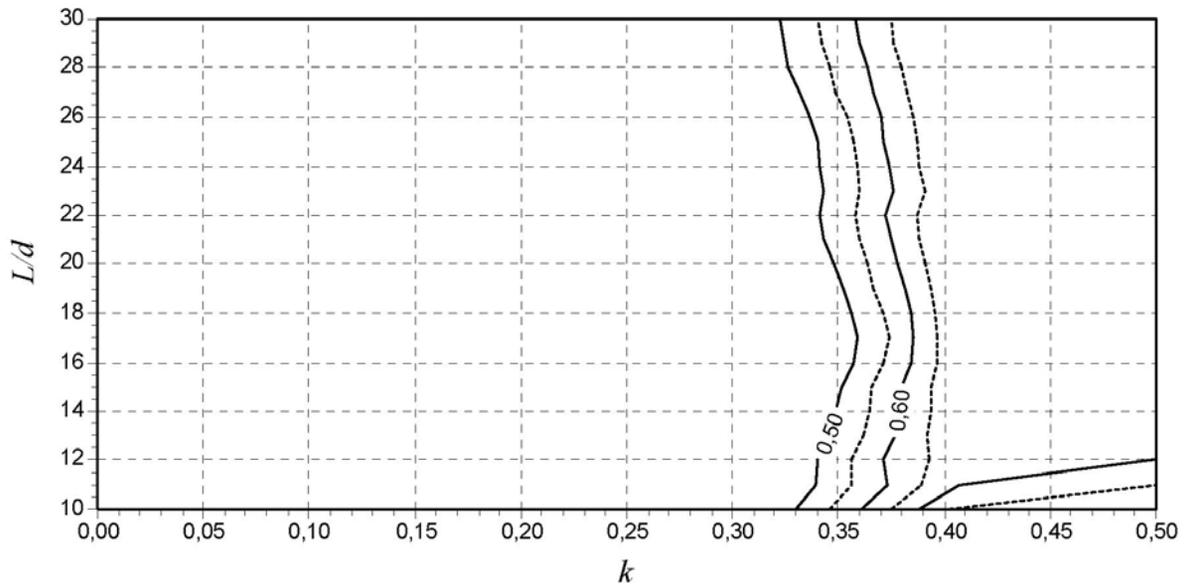
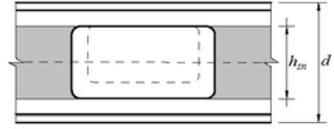


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico

ÁBACO 89

abertura retangular
2:1

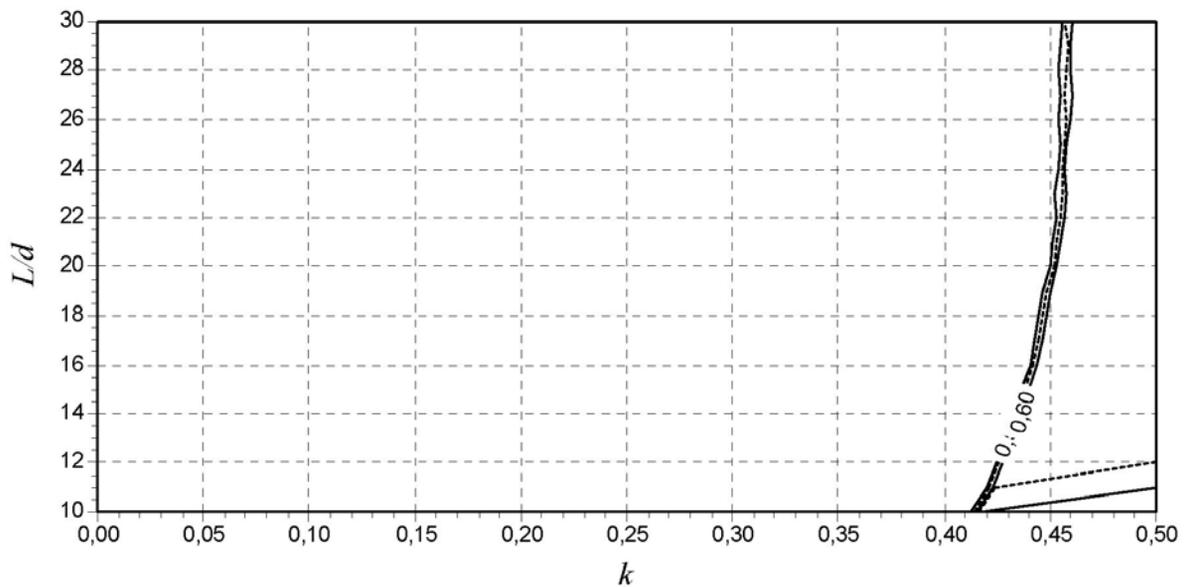
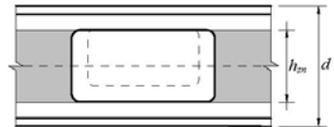
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 90

abertura retangular
1,8 : 1

$$h_{zn} \leq 0,7d$$



Capítulo 7

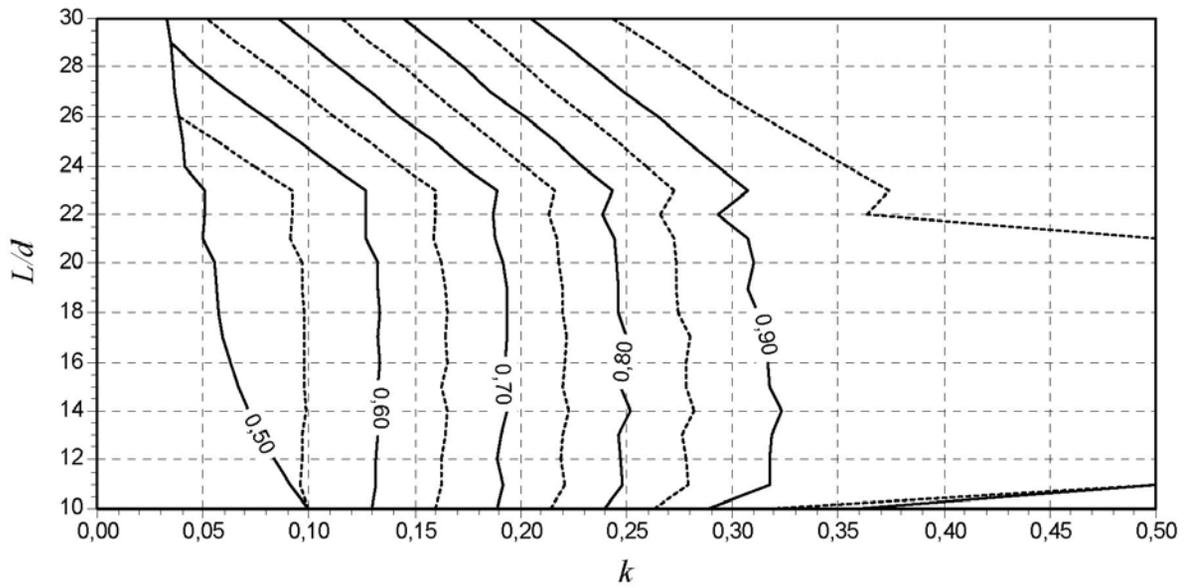
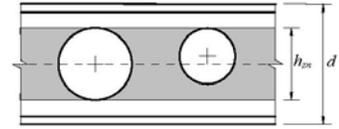
Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje

Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje

ÁBACO 91

abertura circular

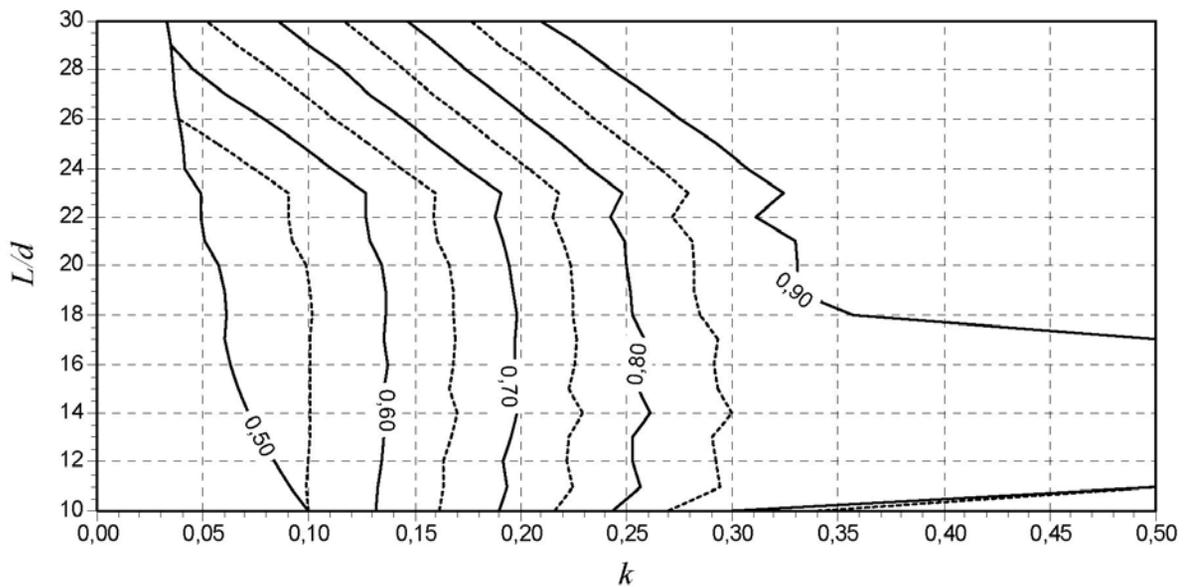
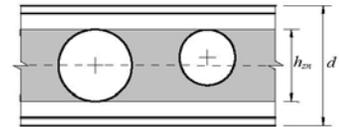
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



ÁBACO 92

abertura circular

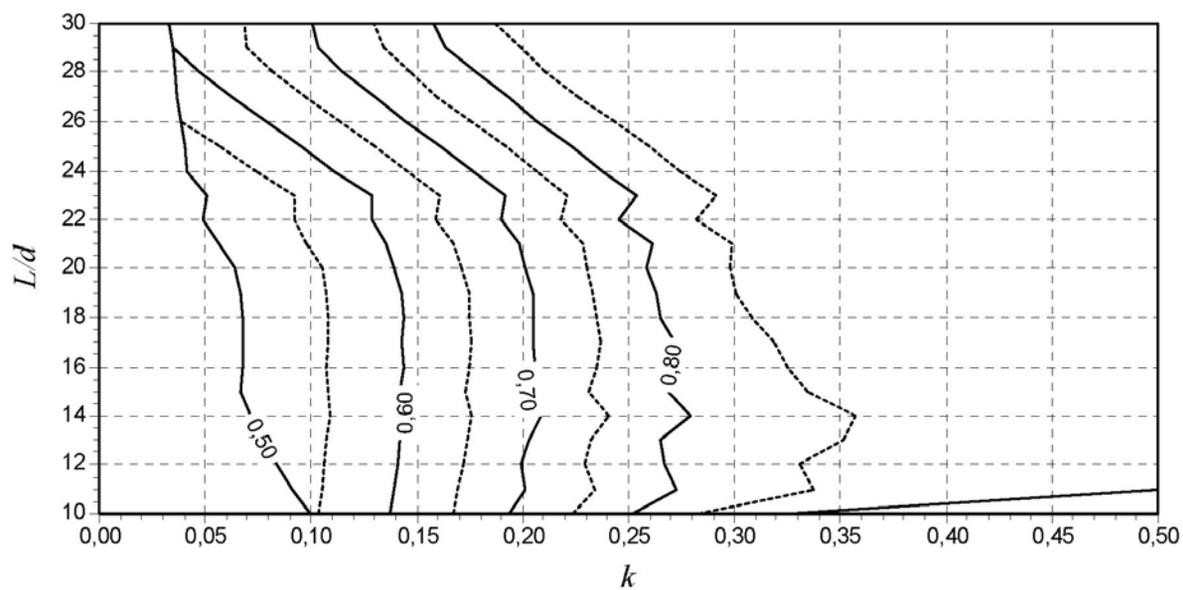
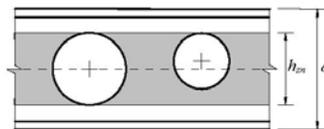
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
93

abertura circular

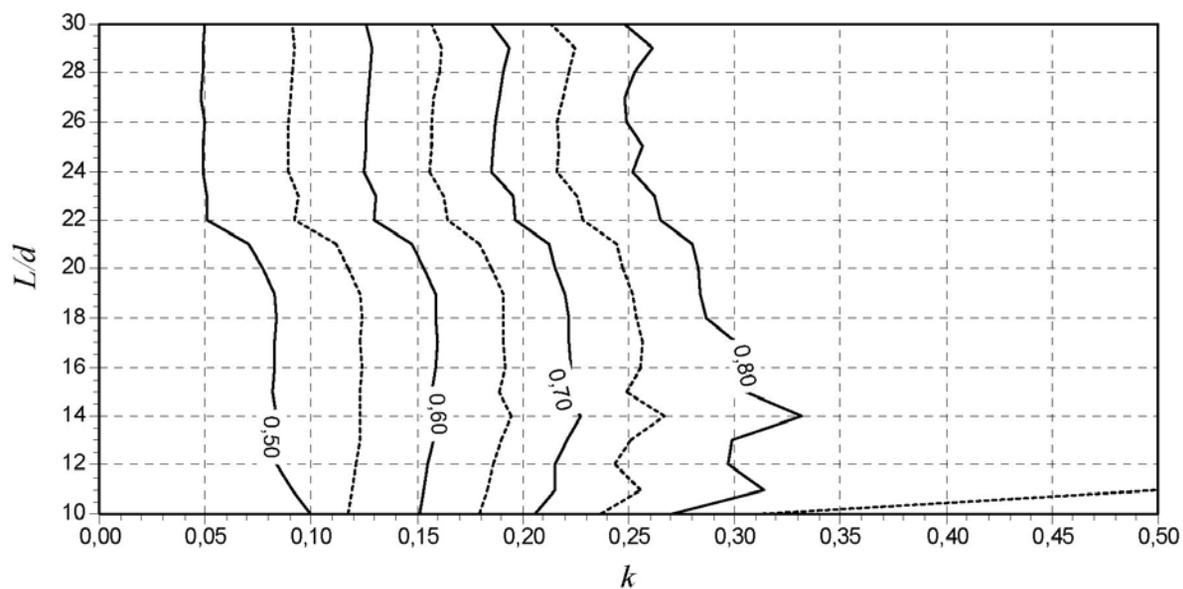
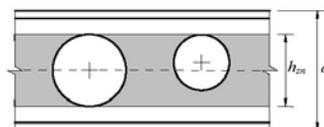
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
94

abertura circular

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

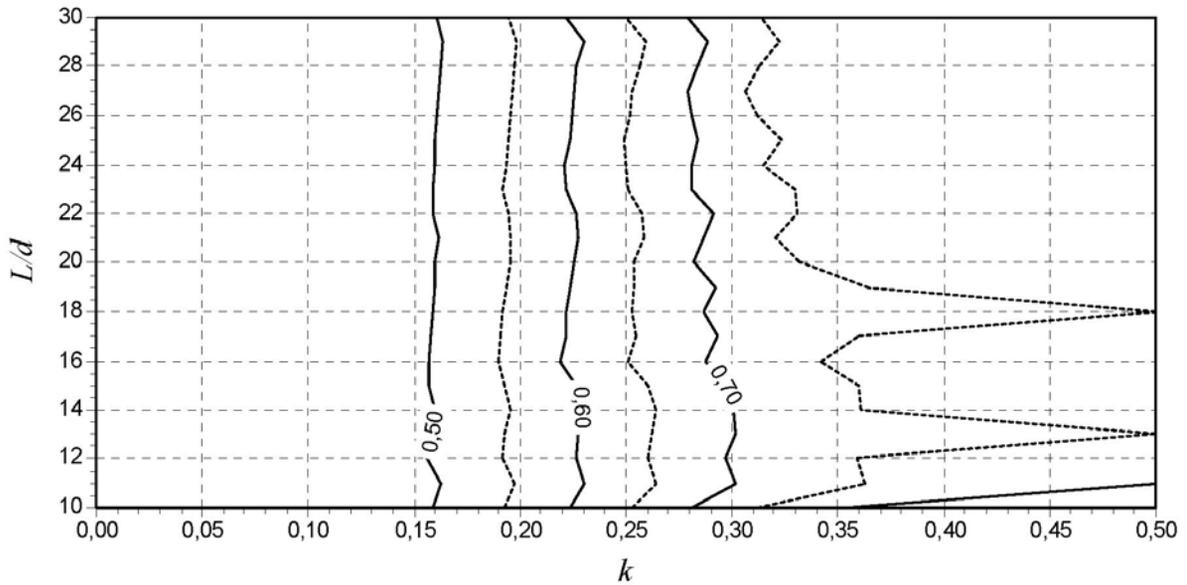
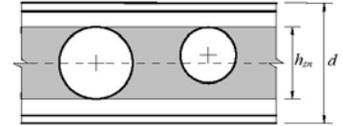


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje

**ÁBACO
95**

abertura circular

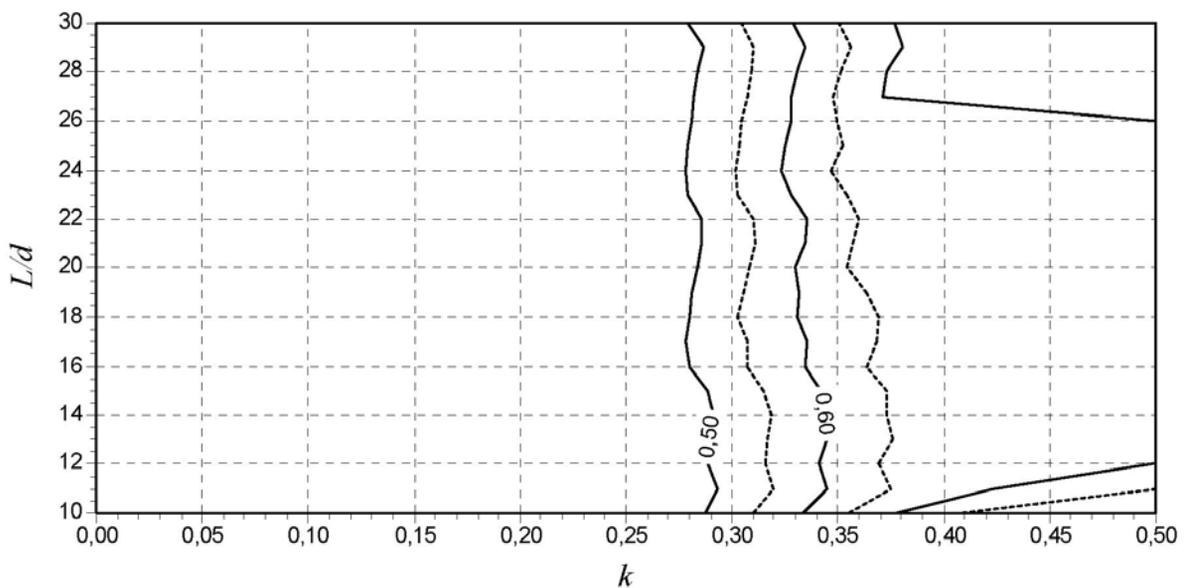
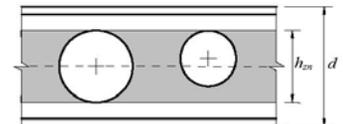
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
96**

abertura circular

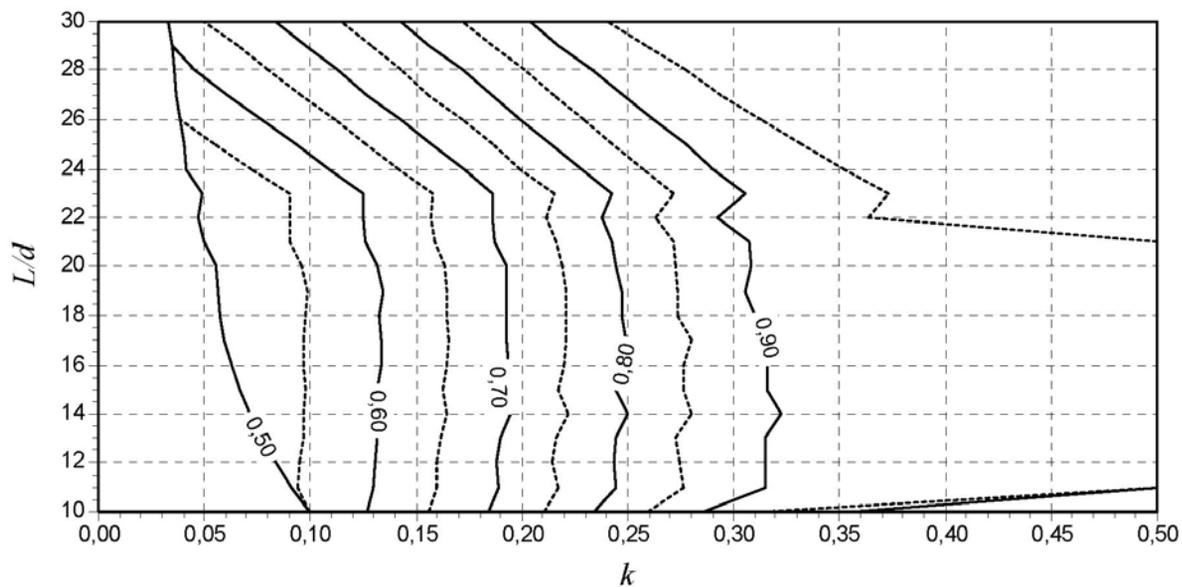
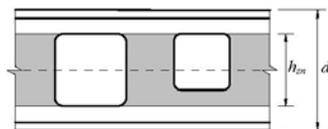
$$h_{zn} \leq 0,7d$$



**ÁBACO
97**

abertura quadrada

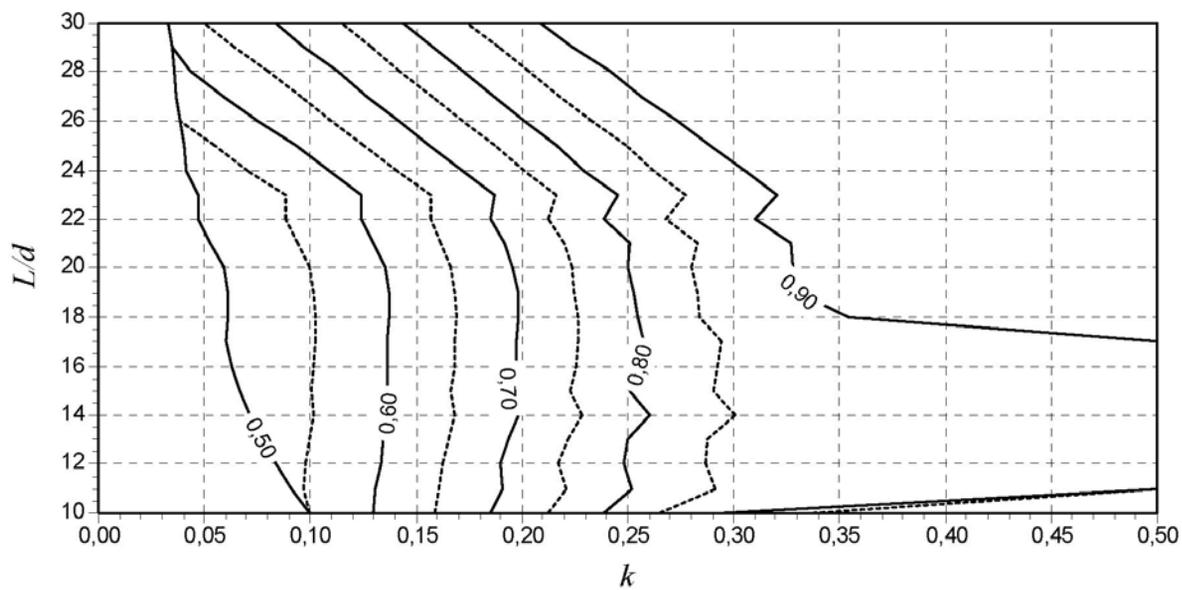
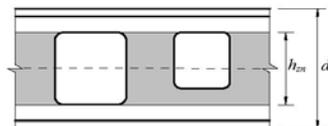
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
98**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,3d$$

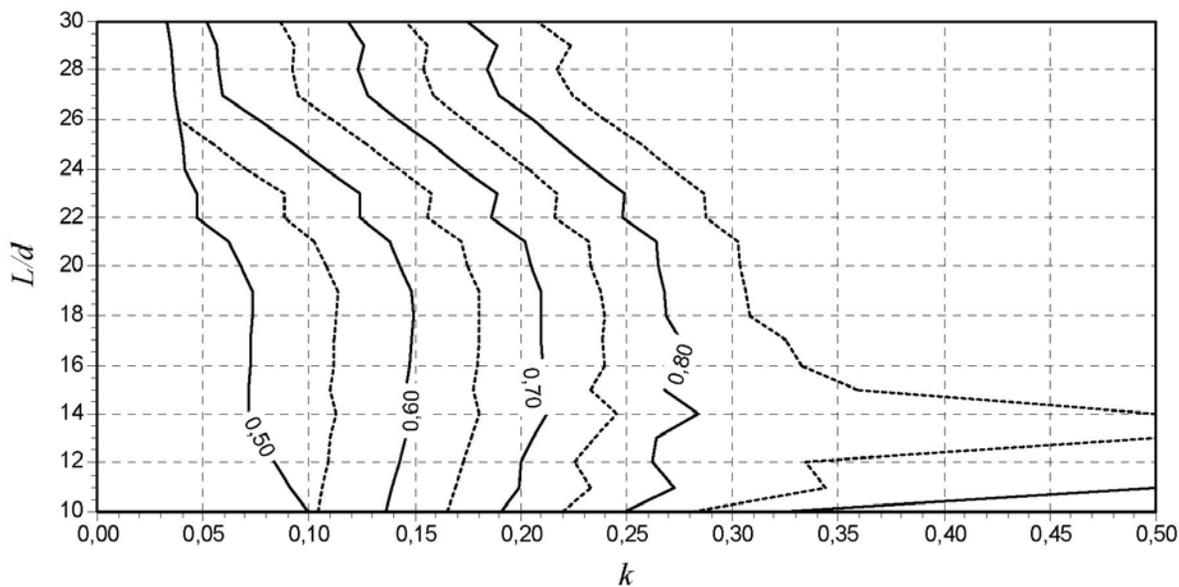
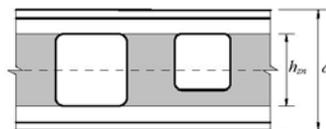


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje

ÁBACO 99

abertura quadrada

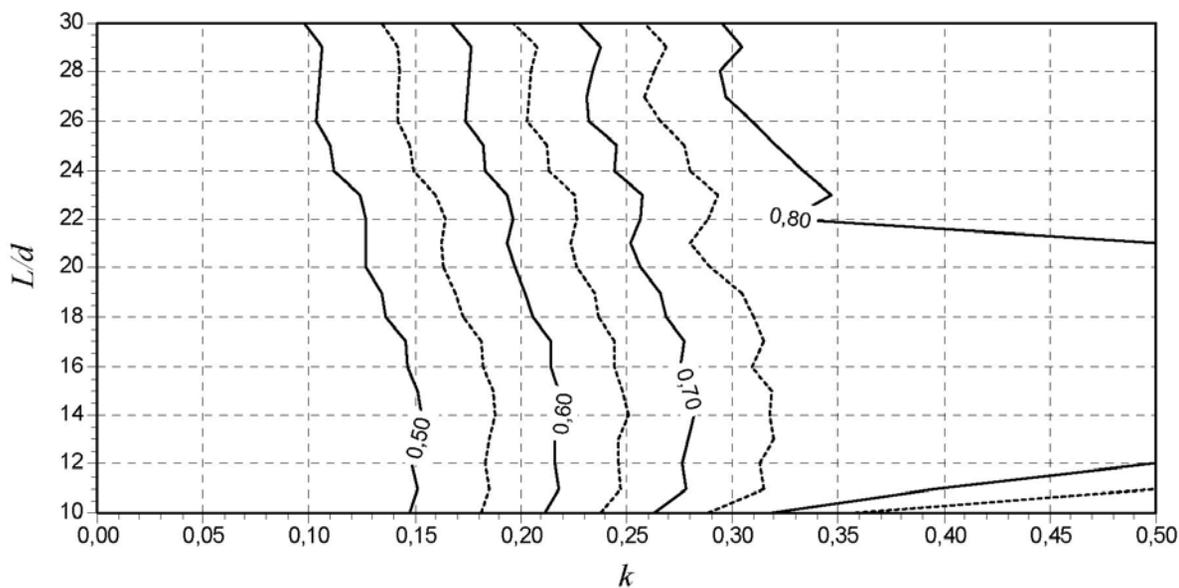
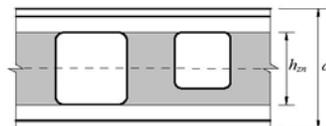
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO 100

abertura quadrada

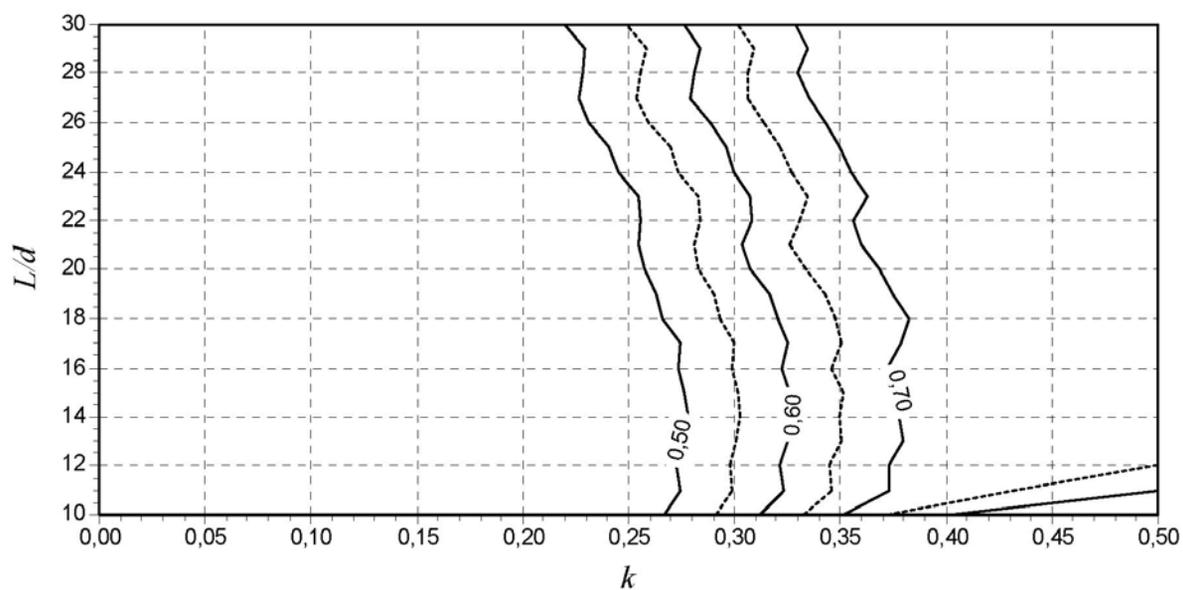
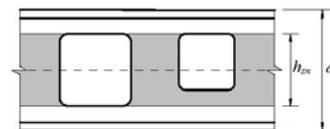
$$h_{zn} \leq 0,5d$$



**ÁBACO
101**

abertura quadrada

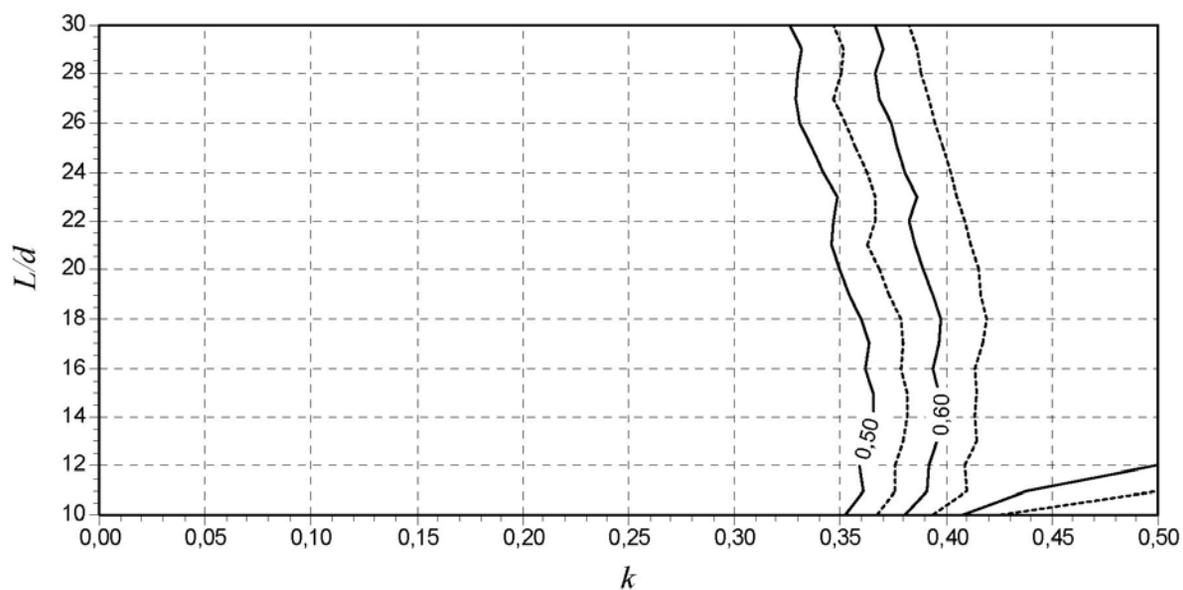
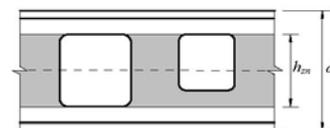
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



**ÁBACO
102**

abertura quadrada

$$h_{zn} \leq 0,7d$$

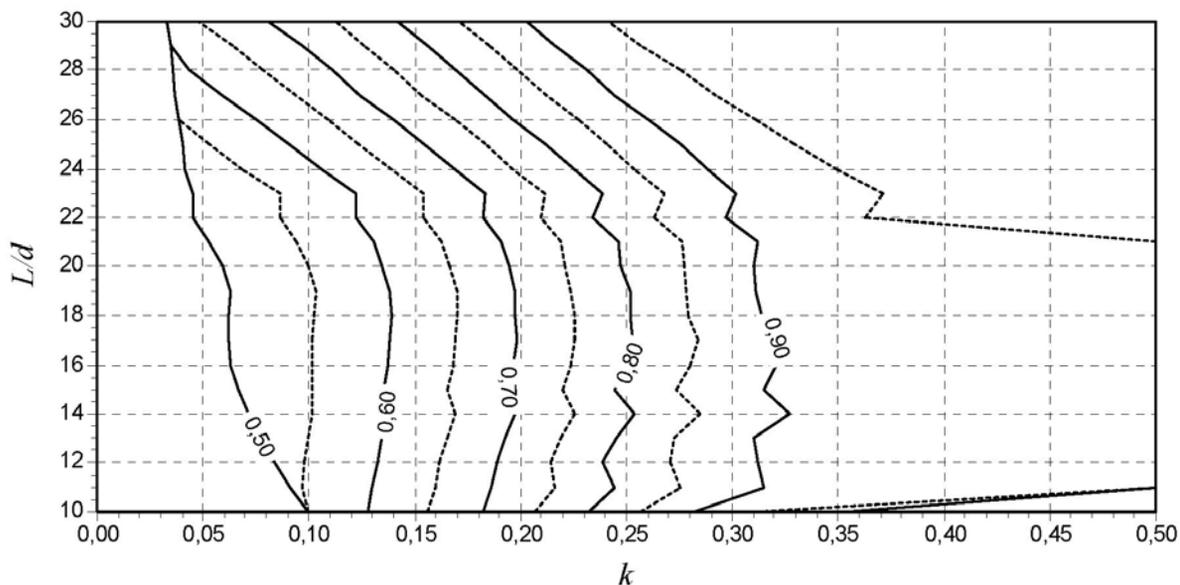
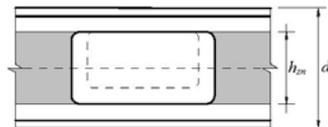


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje

**ÁBACO
103**

abertura retangular
2:1

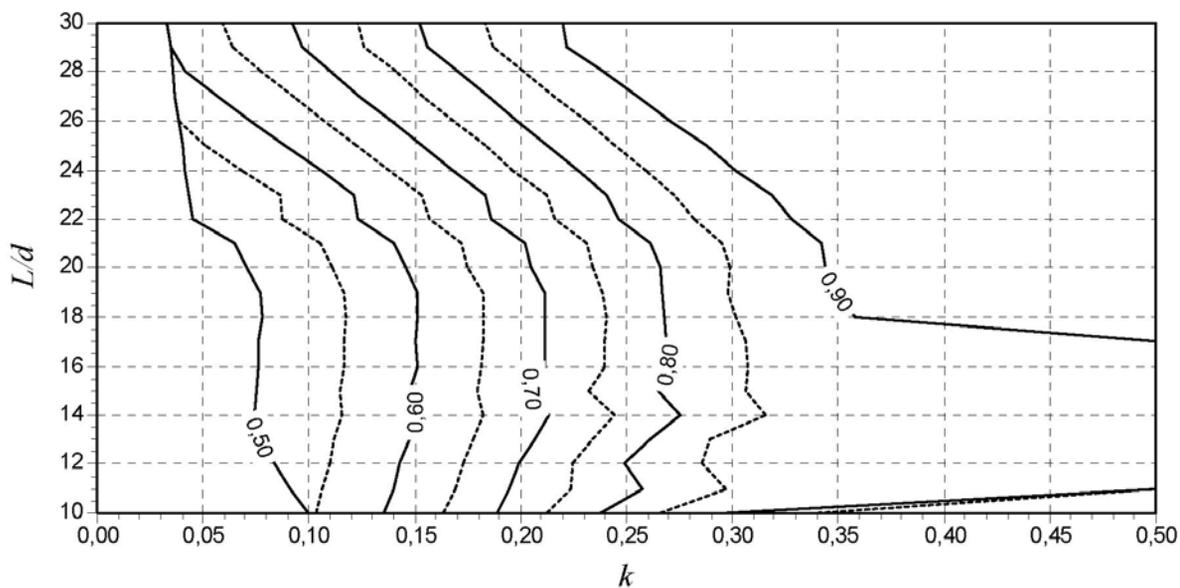
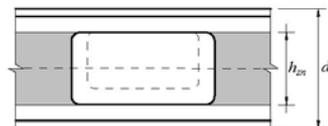
$$h_{zn} \leq 0,2d$$



**ÁBACO
104**

abertura retangular
2:1

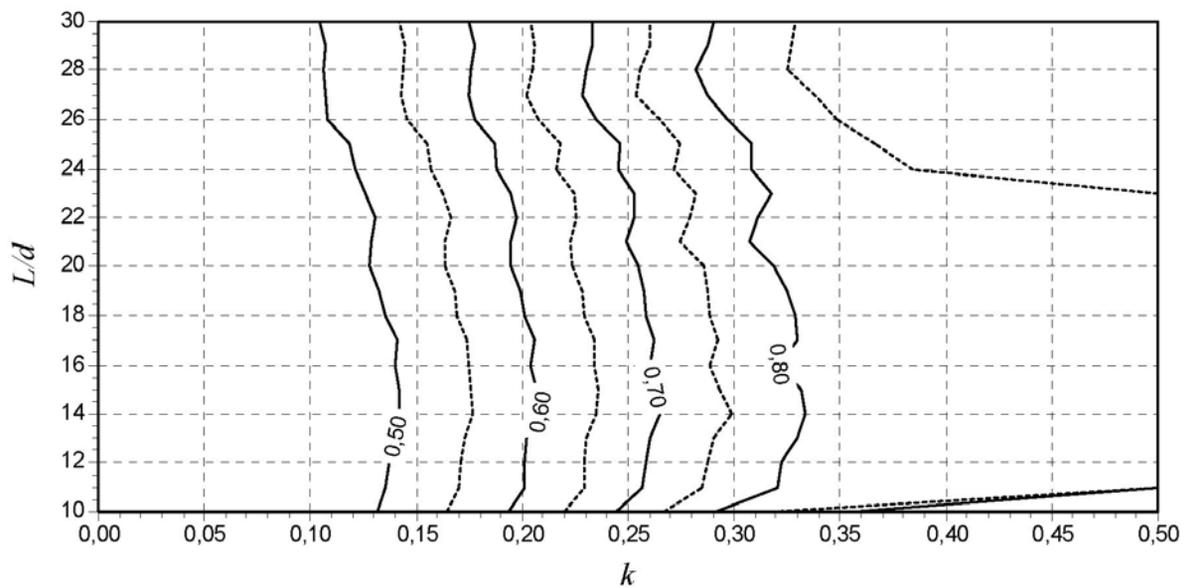
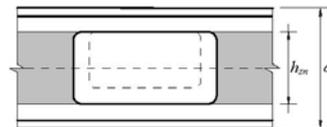
$$h_{zn} \leq 0,3d$$



ÁBACO
105

abertura retangular
2:1

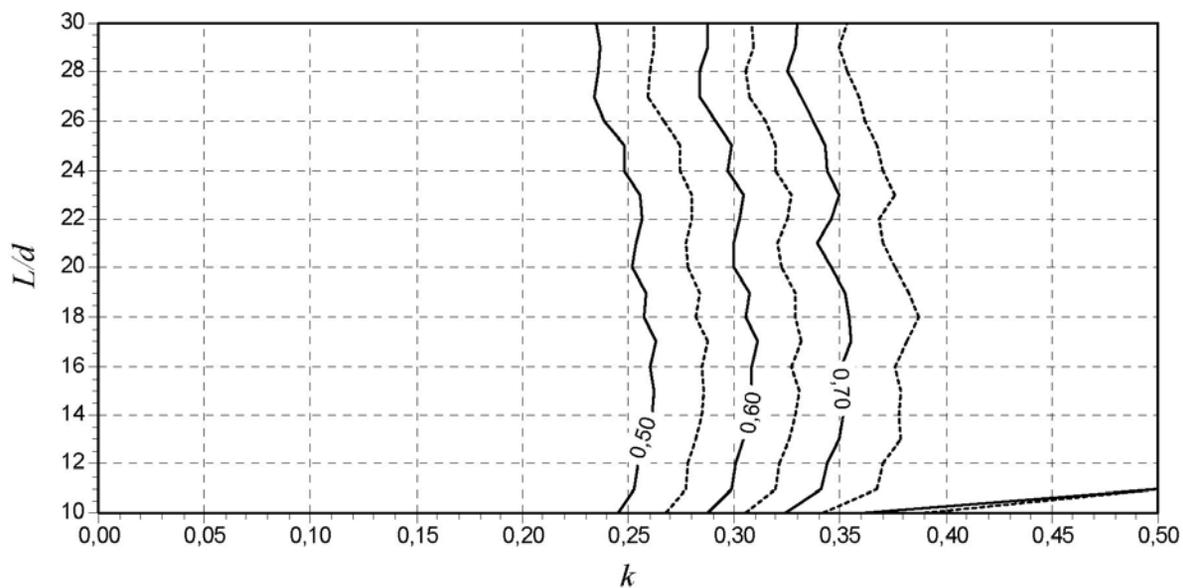
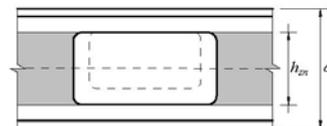
$$h_{zn} \leq 0,4d$$



ÁBACO
106

abertura retangular
2:1

$$h_{zn} \leq 0,5d$$

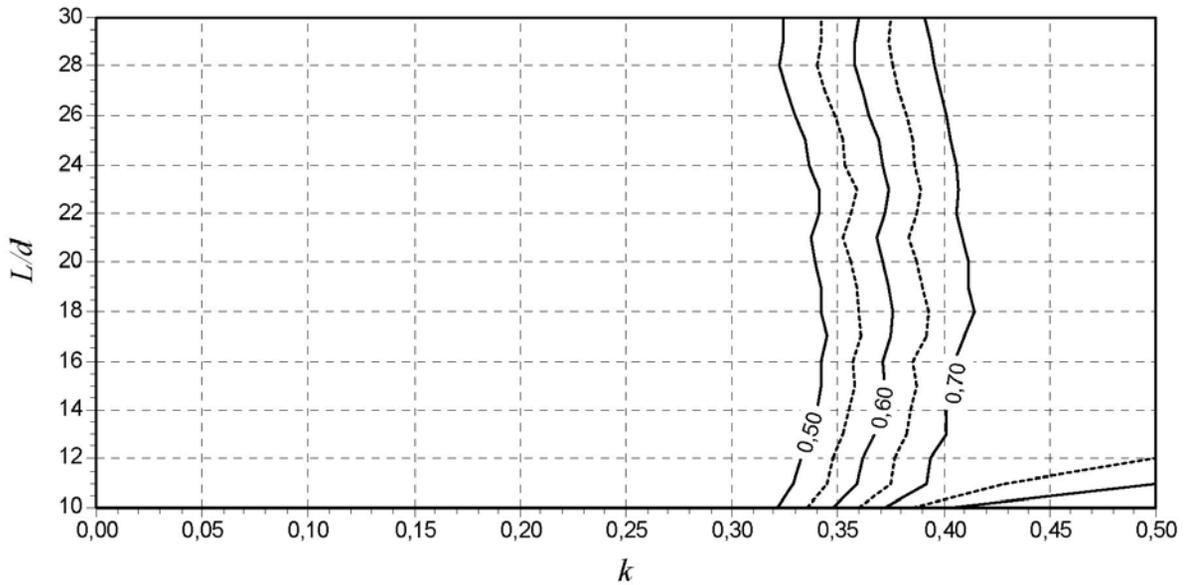
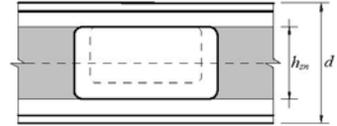


Ábacos para aberturas em vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura ligada à laje

ÁBACO 107

abertura retangular
2 : 1

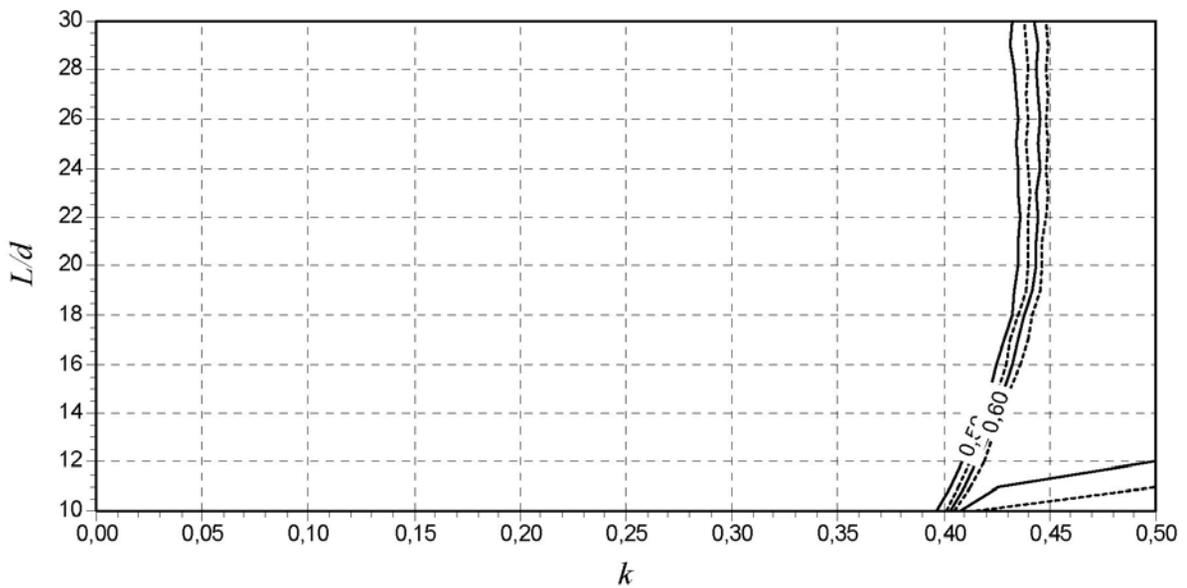
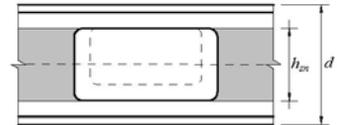
$$h_{zn} \leq 0,6d$$



ÁBACO 108

abertura retangular
1,8 : 1

$$h_{zn} \leq 0,7d$$



Capítulo 8

Exemplos de utilização dos ábacos

Exemplos de utilização dos ábacos

8.1 - Determinação da zona neutra para aberturas retangulares concêntricas em viga de aço constituída por perfil I soldado

Deseja-se determinar a zona neutra de uma viga de aço birrotulada com vão (L) de 9 m, constituída por um perfil soldado com altura (d) igual a 450 mm, largura das mesas (b_f) igual a 200 mm, espessura das mesas (t_f) igual a 12,5 mm e espessura da alma (t_w) igual a 6,3 mm, para a execução de aberturas retangulares centradas na altura do perfil, com altura (h_o) igual à metade da altura da seção transversal. A viga encontra-se submetida a uma carga uniformemente distribuída. O aço do perfil tem resistência ao escoamento (f_y) de 300 MPa. Os esforços solicitantes e os esforços resistentes de cálculo, obtidos do dimensionamento da viga sem aberturas, feito conforme a ABNT NBR 8800:2008, são dados a seguir:

$$\frac{S_d}{R_d} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} = \frac{34581}{43226} = 0,80 \\ \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = \frac{154}{423} = 0,36 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{S_d}{R_d} = 0,80$$

Solução:

Os ábacos relacionados a vigas de aço constituídas por perfil I soldado duplamente simétrico estão agrupados no Capítulo 3. Os requisitos para aplicação desses ábacos encontram-se no subitem 1.8.2.2. Para a viga em estudo, observa-se que os requisitos relacionados ao tipo e ao aço do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor e ao tipo de carregamento são atendidos.

A abertura é retangular e concêntrica. Portanto, a excentricidade é nula ($e_o = 0$) e a altura da zona neutra é igual à própria altura da abertura pretendida, ou seja:

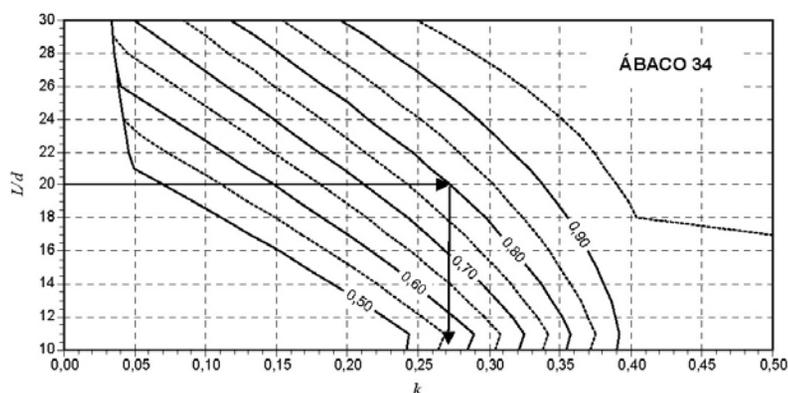
$$h_{zn} = h_o + 2e_o = 225 + 0 = 225 \text{ mm}$$

Como esse valor corresponde a $0,5d$ o ábaco aplicável é o de número 34 ($h_{zn} \leq 0,5d$).

Os dados de entrada são a taxa de solicitação (S_d/R_d), já definida como igual a 0,80, e a relação:

$$\frac{L}{d} = \frac{9000}{450} = 20$$

Com esses dados, obtém-se no ábaco $k \cong 0,272$, como se vê a seguir.



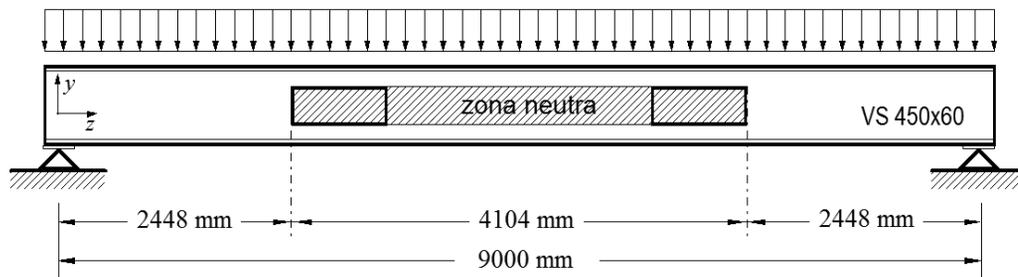
A zona neutra, portanto, vai de:

$$z = k L = 0,272 L = 0,272 \times 9000 = 2448 \text{ mm}$$

até

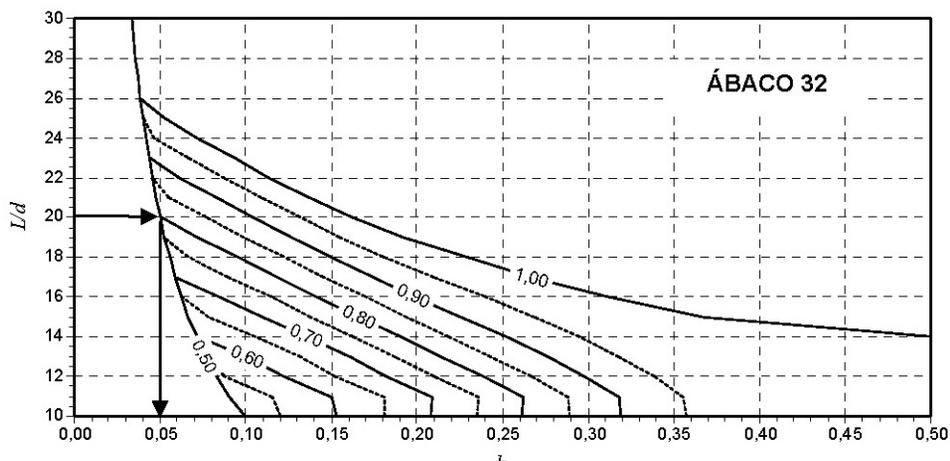
$$z = 9000 - 2448 = 6552 \text{ mm} \quad (L_{zn} = L - 2kL = 9000 - 2 \times 0,272 \times 9000 = 4104 \text{ mm})$$

como mostra a figura a seguir. Nesse comprimento, igual a 4104 mm, podem ser feitas aberturas retangulares de altura h_o igual a 225 mm (metade da altura do perfil) e comprimento máximo a_o de 450 mm (duas vezes a altura h_o), desde que atendidos os requisitos descritos no subitem 1.8.2.2.



Nesse caso, como $h_{zn} \leq 0,5d$ não é necessário verificar a estabilidade do tê comprimido.

Caso se pudessem ter aberturas retangulares de altura menor, por exemplo, de 30% da altura do perfil ($h_{zn} = h_o = 0,3 \times 450 = 135 \text{ mm}$), seria usado o ábaco de número 32, como mostrado abaixo, obtendo-se $k \cong 0,05$.



A zona neutra iria de

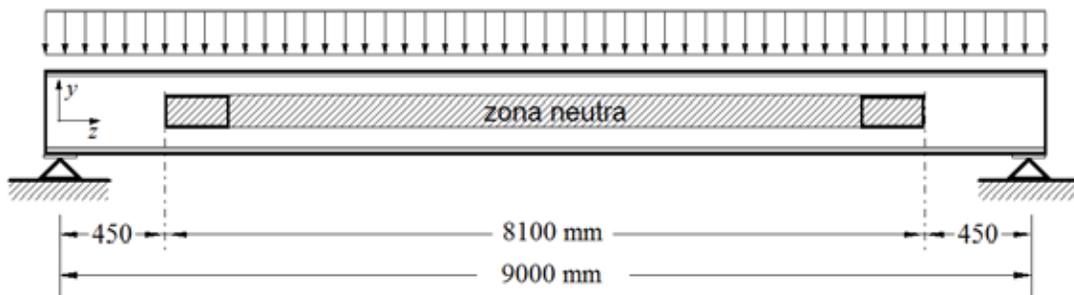
$$z = k L = 0,05 L = 0,05 \times 9000 = 450 \text{ mm}$$

até

$$z = 9000 - 450 = 8550 \text{ mm} \quad (L_{zn} = L - 2kL = 9000 - 2 \times 0,05 \times 9000 = 8100 \text{ mm}),$$

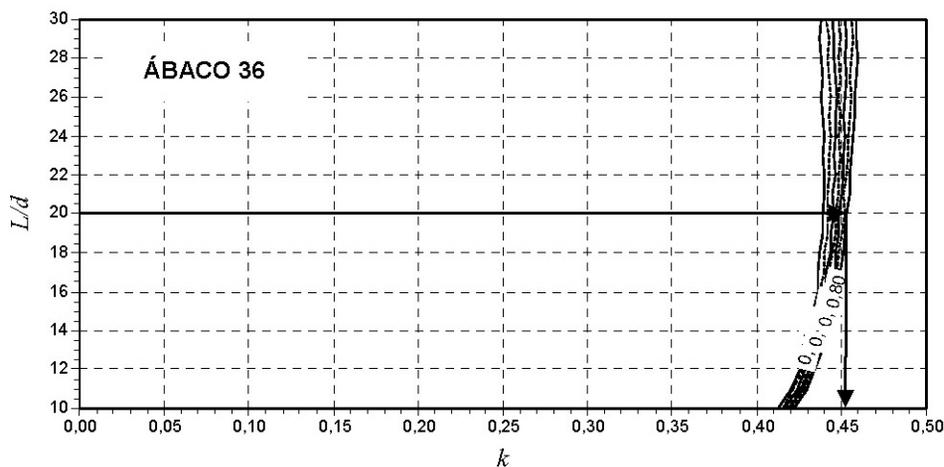
como mostra a figura a seguir.

Exemplos de utilização dos ábacos



Portanto, reduzindo-se a altura das aberturas, aumenta-se o comprimento da zona neutra, que agora passou a ser de 8100 mm, abrangendo 90% do comprimento da viga.

Por outro lado, se fossem necessárias aberturas retangulares de altura maior como, por exemplo, 70% da altura do perfil ($h_{zn} = h_o = 0,7 \times 450 = 315$ mm), seria usado o ábaco de número 36, como mostrado abaixo, obtendo-se $k \cong 0,453$.

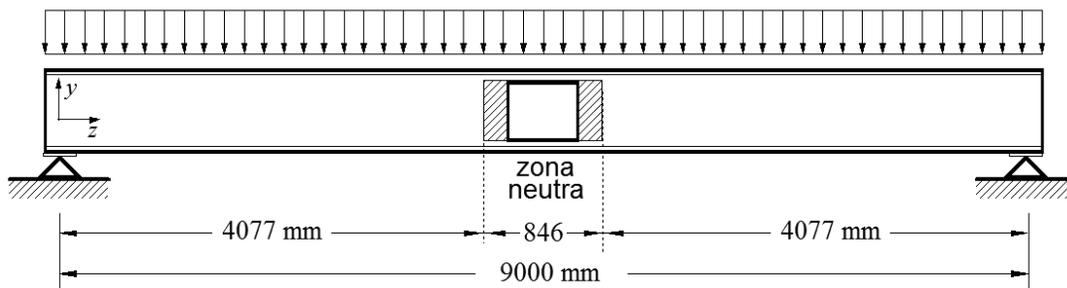


Nesse caso, $a_o = 1,4 h_o = 1,4 \times 315 = 441$ mm e a zona neutra iria de:

$$z = k L = 0,453 L = 0,453 \times 9000 = 4077 \text{ mm}$$

até

$$z = 9000 - 4077 = 4923 \text{ mm}$$



Portanto, aumentando-se a altura das aberturas, reduz-se o comprimento da zona neutra, que agora passou a ser de apenas 846 mm ($4923 - 4077$), correspondentes a 9,4% do comprimento da viga, ou seja, ao adotar a relação $h_{zn} = 0,7d$ impõe-se uma grande restrição ao posicionamento da abertura.

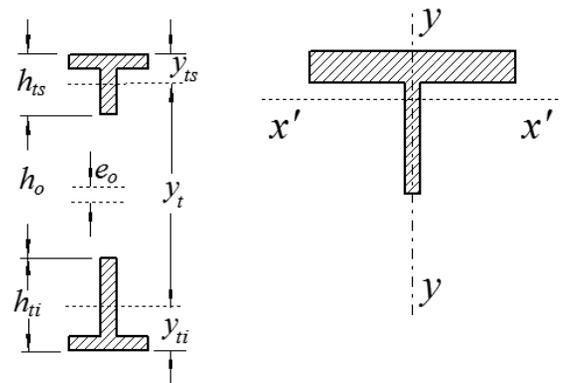
Nesse último caso, como $h_{zn} = 0,7d$, é necessário verificar a estabilidade do tê comprimido. Considerando que a abertura é centrada em relação à altura do perfil ($e_o = 0$), e que os tês superior e inferior são iguais, a altura destes será dada por:

$$h_{ts} = \frac{d - h_o}{2} - e_o = \frac{450 - 315}{2} - 0 = 67,5 \text{ mm}$$

$$h_{ti} = \frac{d - h_o}{2} + e_o = \frac{450 - 315}{2} + 0 = 67,5 \text{ mm}$$

A força axial de compressão solicitante de cálculo no tê superior comprimido é igual ao momento fletor solicitante de cálculo na seção do centro da abertura dividido pela distância entre os centros geométricos dos tês superior e inferior (y_t).

$$N_{cT, Sd} = \frac{M_{Sd}}{y_t}$$



$$\text{onde } y_t = d - y_{ts} - y_{ti}, \quad y_{ts} = \frac{b_{fs} t_{fs}^2 + h_{ts}^2 t_w - t_{fs}^2 t_w}{2(b_{fs} t_{fs} + h_{ts} t_w - t_{fs} t_w)} \quad \text{e} \quad y_{ti} = \frac{b_{fi} t_{fi}^2 + h_{ti}^2 t_w - t_{fi}^2 t_w}{2(b_{fi} t_{fi} + h_{ti} t_w - t_{fi} t_w)}$$

Para uma abertura concêntrica ($e_o = 0$) com $a_o = 441 \text{ mm}$ e $h_o = 315 \text{ mm}$, em um perfil VS 450x60, tem se:

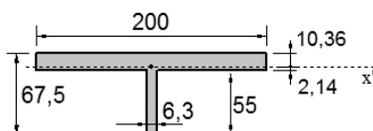
$$y_{ts} = y_t - 10,36 \text{ mm}$$

$$y_t = 450 - 10,36 = 429,28 \text{ mm}$$

Portanto, supondo a abertura com centro na seção central da viga (seção de máximo momento), vem:

$$N_{cT, Sd} = \frac{34581 \text{ kN.cm}}{42,9 \text{ cm}} = 806 \text{ kN}$$

As dimensões e propriedades geométricas relevantes do tê comprimido estão mostradas a seguir:



$$y_G = 10,36 \text{ mm}$$

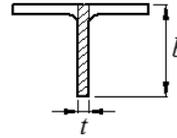
$$A_{eT} = 28,465 \text{ cm}^2$$

$$I_{x'} = \frac{20 \times 1,25^3}{12} + (20 \times 1,25) \left(\frac{1,25}{2} - 0,214 \right)^2 + \frac{0,63 \times 5,5^3}{12} + (5,5 \times 0,63) \left(\frac{5,5}{2} + 0,214 \right)^2 = 46,66 \text{ cm}^4$$

No que se refere à flambagem local da alma do tê, aplicando-se o estabelecido para o grupo 6 da Tabela F.1 da ABNT NBR 8800:2008, vem:

Exemplos de utilização dos ábacos

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{67,5}{6,3} = 10,71$$



$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,75 \sqrt{\frac{200000}{300}} = 19,36$$

Logo:

$$\lambda < \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} \rightarrow Q_s = 1,0$$

Como a mesa não pode flambar, tem-se que:

$$Q = 1,0$$

Para a instabilidade da barra como um todo, faz-se:

$$(KL)_{x'} = a_o = 441 \text{ mm} = 44,1 \text{ cm}$$

$$N_{ex'} = \frac{\pi^2 E I_{x'}}{(KL)_{x'}^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 46,66}{44,1^2} = 4735,84 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_{gT} f_y}{N_{ex'}}} = \sqrt{\frac{1,0 \times 28,465 \times 30}{4735,84}} = 0,425$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,425^2} = 0,701$$

$$N_{cT,Rd} = \frac{\chi Q A_{gT} f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,701 \times 1,0 \times 28,465 \times 30}{1,1} = 544,2 \text{ kN}$$

Portanto:

$$N_{cT,Rd} < N_{cT,Sd} = 806 \text{ kN}$$

Isso significa que o tê comprimido resiste a apenas 67,5% da força de compressão atuante, para abertura com centro situado na seção central da viga. Logo, na viga em questão, não é possível fazer uma abertura na seção central com $h_o = 0,7d = 315 \text{ mm}$ e $a_o = 1,4d = 441 \text{ mm}$. No entanto:

- aberturas com esse tamanho podem ser feitas com centro em seções da viga nas quais o momento fletor solicitante de cálculo esteja com valor inferior ou igual a 233,42 kN.m ($0,675 \times 345,81$);

- pode-se ainda avaliar a possibilidade de se fazer aberturas com $h_o = 0,7d$ posicionadas em seções da viga nas quais o momento fletor solicitante de cálculo supere 233,42 kN.m, mas com comprimento a_o menor que $1,4d$.

Salienta-se que os cantos das aberturas devem ter como raio mínimo o maior valor entre 16 mm e duas vezes a espessura da alma t_w , nesse caso igual a $2 \times 6,3 \text{ mm} = 12,6 \text{ mm}$. Portanto, prevalece um raio mínimo necessário de 16 mm.

8.2 - Determinação da zona neutra para aberturas retangulares excêntricas em viga de aço constituída por perfil I soldado e cálculo da flecha

Deseja-se determinar a zona neutra de uma viga de aço birrotulada com vão (L) de 18 m, constituída por um perfil I soldado com altura (d) igual a 900 mm, largura das mesas (b_f) igual a 350 mm, espessura das mesas (t_f) igual a 19 mm e espessura da alma (t_w) igual a 9,5 mm, para a execução de aberturas retangulares com altura (h_o) igual a 450 mm, com excentricidade positiva de 45 mm (acima do eixo longitudinal da viga) e a maior razão de aspecto possível. O aço do perfil tem resistência ao escoamento (f_y) de 300 MPa. A viga encontra-se submetida a uma carga uniformemente distribuída, cujo valor de cálculo (q_d) é igual a 30,38 kN/m. Os esforços solicitantes e os esforços resistentes de cálculo, obtidos do dimensionamento da viga sem aberturas, feito conforme a ABNT NBR 8800:2008, são dados a seguir.

$$\frac{S_d}{R_d} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} = \frac{123039}{207910} = 0,60 \\ \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = \frac{273}{887} = 0,31 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{S_d}{R_d} = 0,60$$

Deseja-se também determinar a flecha da viga com aberturas. Sabe-se que a viga, sem aberturas, para a combinação de ações de serviço mais desfavorável, tem uma flecha, δ_{tot} , de 48 mm. Sabe-se ainda que foi dada à viga uma contraflecha (δ_o) de 12 mm.

Solução:

Os ábacos relacionados a vigas de aço constituídas por perfil I soldado duplamente simétrico estão agrupados no Capítulo 3. Os requisitos para aplicação desses ábacos encontram-se no subitem 1.8.2.2. Para a viga em estudo, observa-se que os requisitos relacionados ao tipo e ao aço do perfil, às propriedades do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor e ao tipo de carregamento são atendidos. A abertura é retangular, com excentricidade positiva $e_o = 45$ mm.

A altura da zona neutra é dada por

$$h_{zn} = h_o + 2e_o = 450 + 2 \times 45 = 540$$

Como esse valor corresponde a 0,6d o ábaco aplicável é o de número 35 ($h_{zn} \leq 0,6d$).

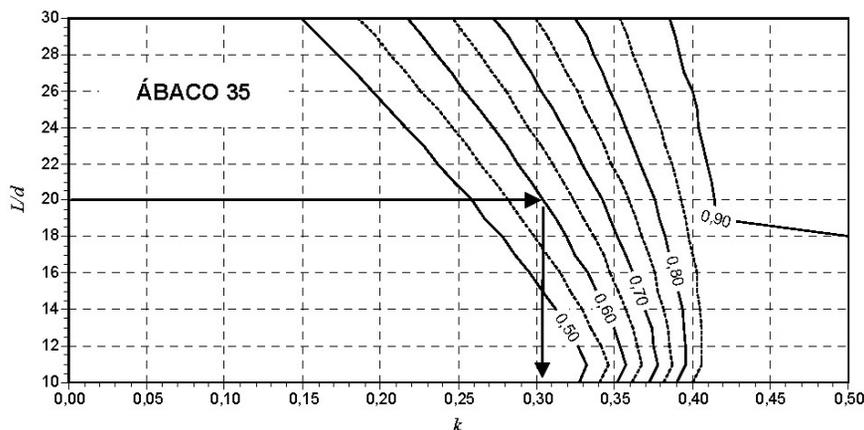
A máxima razão de aspecto para a abertura, nesse caso, é de 2:1 como indicado no cabeçalho do ábaco. Assim, $a_o = 2h_o = 2 \times 450 = 900$ mm.

Os dados de entrada são a taxa de solicitação (S_d/R_d), já definida como igual a 0,60, e a relação:

$$\frac{L}{d} = \frac{18000}{900} = 20$$

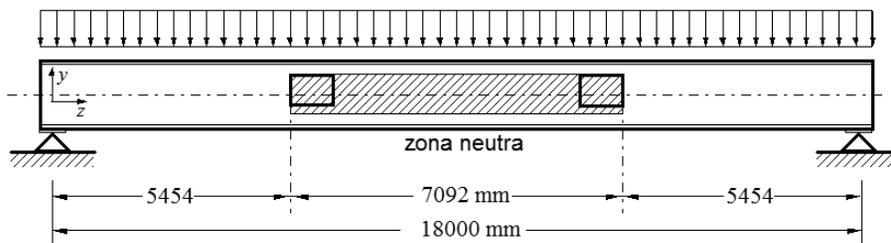
Com esses dados, obtém-se no ábaco $k \cong 0,303$ como se vê a seguir.

Exemplos de utilização dos ábacos



A zona neutra, portanto, vai de:
 $z = k L = 0,303L = 0,303 \times 18000 = 5454 \text{ mm}$
 até
 $z = 18000 - 5454 = 12546 \text{ mm}$

Como mostra a figura a seguir. Nesse comprimento, igual a 7092 mm, podem ser feitas aberturas retangulares de altura h_o igual a 450 mm (metade da altura do perfil) e comprimento máximo a_o de 900 mm (duas vezes a altura h_o), com excentricidade de 45 mm.



No entanto, como $h_{zn} = 0,6d$, é necessário verificar a estabilidade do tê comprimido, que pode sofrer flambagem em relação ao eixo x' indicado na figura a seguir. Considerando que a abertura é excêntrica em relação à altura do perfil, as alturas dos tê superior e inferior são dadas, respectivamente, por:

$$h_{ts} = \frac{d - h_o}{2} - e_o = \frac{900 - 450}{2} - 45 = 180 \text{ mm}$$

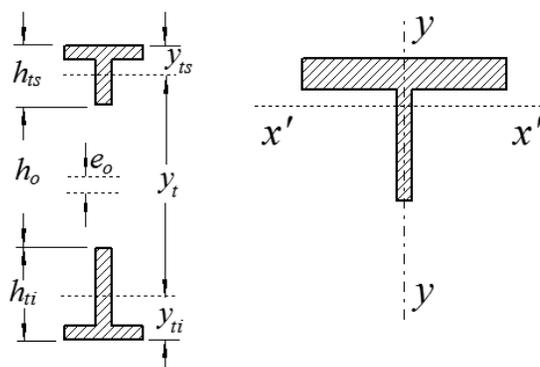
$$h_{ti} = \frac{d - h_o}{2} + e_o = \frac{900 - 450}{2} + 45 = 270 \text{ mm}$$

A força axial de compressão solicitante de cálculo no tê superior é igual ao momento fletor solicitante de cálculo na seção do centro da abertura dividido pela distância entre os centros geométricos dos tê superior e inferior (y_t):

$$N_{cT, Sd} = \frac{M_{Sd}}{y_t}$$

onde:

$$y_t = d - y_{ts} - y_{ti}$$



$$y_{ts} = \frac{b_{fs} t_{fs}^2 + h_{ts}^2 t_w - t_{fs}^2 t_w}{2(b_{fs} t_{fs} + h_{ts} t_w - t_{fs} t_w)}$$

$$y_{ti} = \frac{b_{fi} t_{fi}^2 + h_{ti}^2 t_w - t_{fi}^2 t_w}{2(b_{fi} t_{fi} + h_{ti} t_w - t_{fi} t_w)}$$

Para esse caso, tem-se:

$$y_{ts} = 26,3 \text{ mm}$$

$$y_{ti} = 45,1 \text{ mm}$$

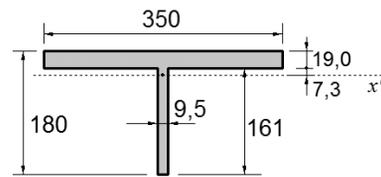
$$y_t = 900 - 26,3 - 45,1 = 828,6 \text{ mm}$$

$$N_{cT, sd} = \frac{123039 \text{ kN.cm}}{828,6 \text{ cm}} = 148,49 \text{ kN}$$

As dimensões e propriedades geométricas relevantes do tê comprimido são:

$$y_G = 26,3 \text{ mm}$$

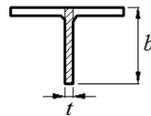
$$A_{gT} = 81,8 \text{ cm}^2$$



$$I_{x'} = \frac{35 \times 1,9^3}{12} + (35 \times 1,9) \left(\frac{1,9}{2} + 0,73 \right)^2 + \frac{0,95 \times 16,1^3}{12} + (16,1 \times 0,95) \left(\frac{16,1}{2} - 0,73 \right)^2 = 1357,6 \text{ cm}^4$$

No que se refere à flambagem local da alma do tê, aplicando-se o estabelecido para o grupo 6 da Tabela F.1 da ABNT NBR 8800:2008, vem:

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{180}{9,5} = 18,9$$



$$\left(\frac{b}{t} \right)_{\text{lim}} = 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,75 \sqrt{\frac{200000}{300}} = 19,36$$

Logo:

$$\lambda < \left(\frac{b}{t} \right)_{\text{lim}} \rightarrow Q_a = 1,0$$

Como a mesa não pode flambar, tem-se que:

$$Q = 1,0$$

Para a instabilidade da barra como um todo, faz-se:

$$(KL)_{x'} = a_o = 900 \text{ mm} = 90 \text{ cm}$$

Exemplos de utilização dos ábacos

$$N_{ex'} = \frac{\pi^2 E I_{x'}}{(KL)_{x'}^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 1357,6}{90^2} = 33083,9 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_{gT} f_y}{N_{ex'}}} = \sqrt{\frac{1,0 \times 81,8 \times 30}{33083,9}} = 0,272$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \quad \rightarrow \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,272^2} = 0,796$$

$$N_{cT,Rd} = \frac{\chi Q A_{gT} f_y}{\gamma_{al}} = \frac{0,796 \times 1,0 \times 81,8 \times 30}{1,1} \cong 1775,8 \text{ kN}$$

Portanto:

$$N_{cT,Rd} > N_{cT,Sd} = 148,49 \text{ kN}$$

(o tê comprimido resiste aos esforços aplicados)

A força de compressão solicitante no tê comprimido representa apenas 8,4% da força de compressão resistente. Logo, o tê comprimido permanece estável.

Para saber quantas aberturas de 900x450 com $e_o = 45 \text{ mm}$ podem ser feitas dentro da zona neutra, é necessário verificar o espaçamento mínimo admissível entre aberturas adjacentes. Para aberturas retangulares, é necessário que:

$$s \geq \begin{cases} h_o = 450 \text{ mm} \\ a_o \frac{1,1V_{sd}/V_{pl}}{1 - 1,1V_{sd}/V_{pl}} = 900 \times \frac{1,1 \times 273/1474}{1 - 1,1 \times 273/1474} = 230,3 \text{ mm} \end{cases}$$

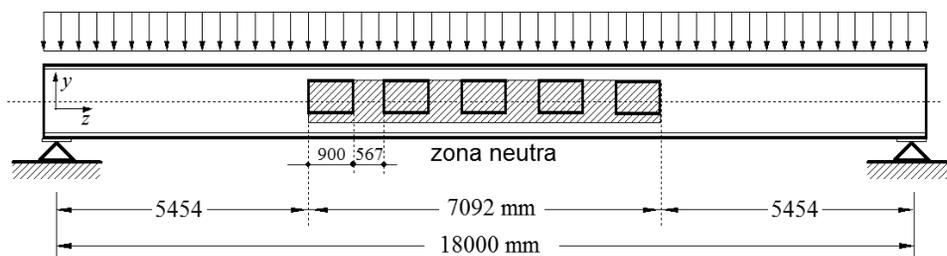
Logo, $s = 450 \text{ mm}$. O máximo número de aberturas que pode ser feito na zona neutra com este espaçamento pode ser calculado da seguinte forma:

$$n = \frac{L_{zn}}{a_o + s} = \frac{6768}{900 + 450} = 5,01$$

Pode-se ajustar o espaçamento fazendo:

$$s = \frac{L_{zn} - n(a_o)}{n - 1} = \frac{6768 - 5(900)}{5 - 1} = 567 \text{ mm}$$

Portanto, pode-se fazer até cinco aberturas espaçadas de 567 mm, conforme mostrado na figura a seguir.



Salienta-se que os cantos das aberturas devem ter como raio mínimo o maior valor entre 16 mm e duas vezes a espessura da alma t_w , nesse caso igual a $2 \times 9,5 \text{ mm} = 19 \text{ mm}$. Portanto, prevalece um raio mínimo necessário de 19 mm.

A flecha da viga com aberturas retangulares, conforme o item 1.9, é dada por:

$$\delta_{tot,ab} = \delta_{tot} \left[1 + 5167 \left(\frac{d}{L} \right)^{3,19} \left(\frac{a_o}{d} \right)^{6,48} \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{1,42} \right]$$

Como δ_{tot} é igual a 48 mm, d igual a 900 mm, L igual a 18000 mm, a_o igual a 450 mm, n igual a 5 e α igual a 1 (aberturas retangulares com razão de aspecto de 2:1), vem:

$$\delta_{tot,ab} = 48 \left[1 + 5167 \left(\frac{900}{18000} \right)^{3,19} \left(\frac{450}{900} \right)^{6,48} \left(\frac{5}{1} \right)^{1,42} \right] \cong 49,93 \text{ mm}$$

Nesse caso, as aberturas provocaram um acréscimo na flecha de aproximadamente 4%. Considerando a contraflecha (δ_0) de 12 mm, a flecha a ser usada para comparação com a flecha máxima permitida pela ABNT NBR 8800:2008 é:

$$\delta_{max} = \delta_{tot,ab} - \delta_0 = 49,93 - 12 = 37,73 \text{ mm}$$

8.3 - Projeto de aberturas circulares concêntricas em viga de aço constituída por perfil I laminado e cálculo da flecha

Precisa-se fazer o maior número possível de aberturas circulares concêntricas com diâmetro (D_o) igual a 270 mm em uma viga de aço birrotulada, submetida a uma carga uniformemente distribuída, com vão (L) de 11250 mm, constituída por um perfil W460x52 em aço com resistência ao escoamento (f_y) igual a 345 MPa. Posicionar essas aberturas, sabendo-se que, no dimensionamento da viga sem aberturas, feito conforme a ABNT NBR 8800:2008, se obteve:

$$\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} = 0,57, \quad \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = 0,10 \quad \text{e} \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$$

Deseja-se também determinar a flecha da viga com aberturas. Sabe-se que a viga sem aberturas, para a combinação de ações de serviço mais desfavorável, tem uma flecha, δ_{tot} , de 41 mm. Sabe-se ainda que foi dada à viga uma contraflecha (δ_0) de 14 mm.

Solução:

Os ábacos relacionados a vigas de aço constituídas por perfil I laminado estão agrupados no Capítulo 2. Os requisitos para aplicação desses ábacos encontram-se no subitem 1.8.2.2. Para a viga em estudo, observa-se que os requisitos relacionados ao tipo e ao aço do perfil, às propriedades do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor e ao tipo de carregamento são atendidos.

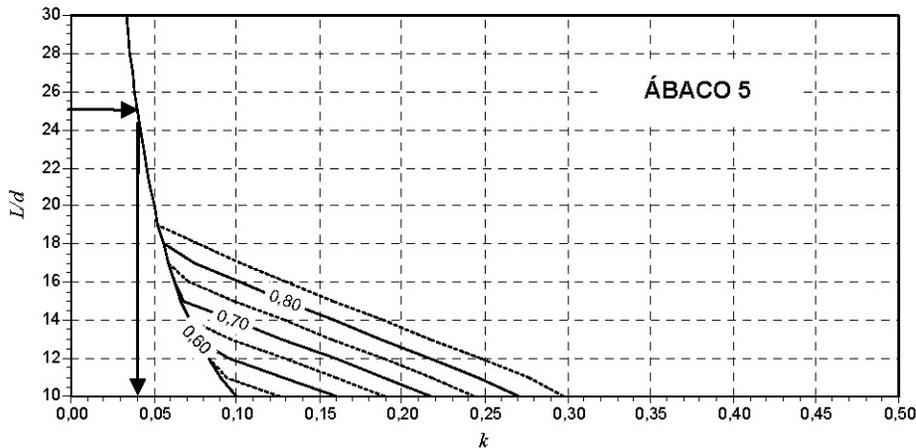
Como $D_o/d = 270/450 = 0,6$, e a abertura é concêntrica, toma-se $h_{zn} = D_o = 0,6d$. Logo, o ábaco aplicável para viga de aço com perfil I laminado é o de número 5.

Exemplos de utilização dos ábacos

Os dados de entrada são a taxa de sollicitação (S_d/R_d), igual a 0,57 (maior valor entre M_{Sd}/M_{Rd} e V_{Sd}/V_{Rd}), e a relação:

$$\frac{L}{d} = \frac{11250}{450} = 25$$

Com esses dados, obtém-se no ábaco $k \cong 0,04$ como se vê na figura seguinte.



A zona neutra, portanto, vai de:

$$z = kL = 0,04L = 0,04 \times 11250 = 450 \text{ mm}$$

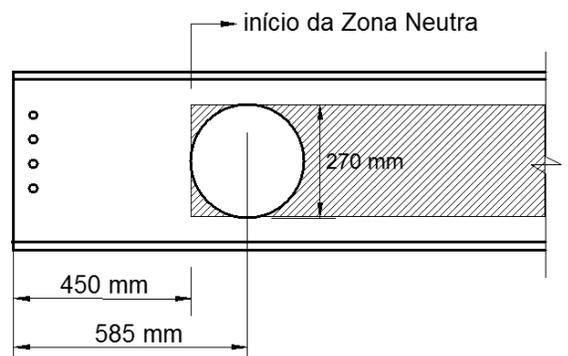
$$\text{até } z = 11250 - 450 = 10800 \text{ mm}$$

Essa zona, portanto, tem como comprimento:

$$L_{zn} = L - 2kL = 11250 - 2 \times 0,04 \times 11250 = 10350 \text{ mm}$$

Logo, o centro da abertura extrema deverá estar situado a pelo menos 585 mm do apoio, como mostrado na figura ao lado.

Quando é necessário executar uma série de aberturas circulares, o espaçamento entre bordas de furos, conforme definido no subitem 1.8.2.2, deve atender à condição:

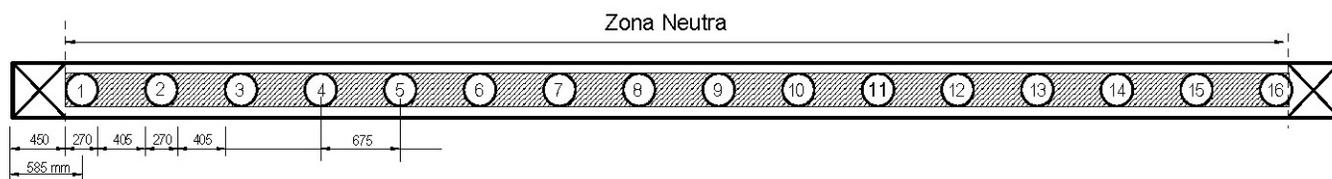


$$s \geq \begin{cases} 1,5 D_o \\ D_o \frac{1,1V_{Sd}/V_{pl}}{1 - 1,1V_{Sd}/V_{pl}} \end{cases}$$

Assim, como $D_o = 270 \text{ mm}$, $V_{Rd} = V_{pl}/1,1$ e $V_{Sd}/V_{Rd} = 0,10$, vem:

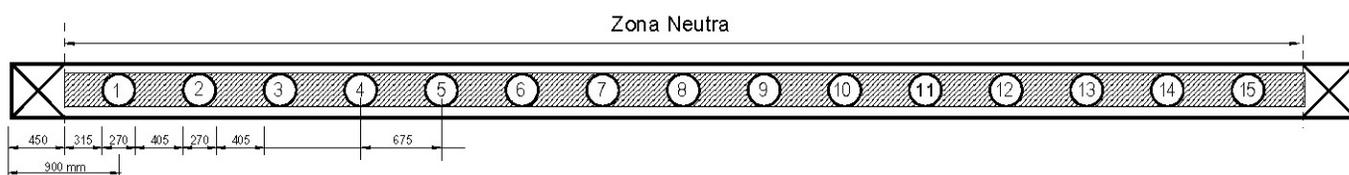
$$s \geq \begin{cases} 1,5 D_o = 1,5 \times 270 = 405 \text{ mm} \\ D_o \frac{1,1V_{Sd}/V_{pl}}{1 - 1,1V_{Sd}/V_{pl}} = D_o \left(\frac{V_{Sd}/V_{Rd}}{1 - V_{Sd}/V_{Rd}} \right) = 270 \left(\frac{0,10}{1 - 0,10} \right) = 30 \text{ mm} \end{cases}$$

Então, podem ser feitas aberturas com $D_o = 270$ mm com pelo menos 405 mm de espaçamento (s) entre bordas de furos, o que equivale a 675 mm de centro a centro de abertura, como ilustra a figura seguinte.

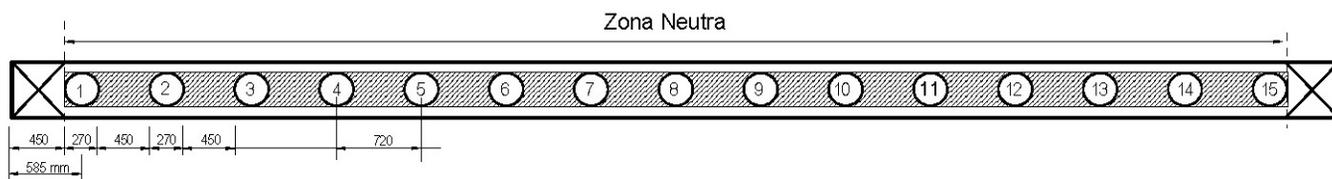


Entretanto, nota-se que a abertura 16 avança além da zona neutra. O correto, então, é optar por fazer apenas 15 aberturas e, conforme mostra a figura a seguir:

- ou centralizar as 15 aberturas mantendo o espaçamento (s) de 405 mm;
- ou redistribuir entre as aberturas o espaço que sobra ao se eliminar a abertura 16, o que significa que o espaçamento (s) se eleva para 450 mm.



(15 aberturas centralizadas com espaçamento de 405 mm)



(15 aberturas redistribuídas com espaçamento de 450 mm)

Nesse caso, por se tratar de uma abertura circular, não é necessário verificar o t \hat{e} comprimido.

A flecha da viga com aberturas circulares, conforme o item 1.9, é dada por:

$$\delta_{tot,ab} = \delta_{tot} \left[1 + 5167 \left(\frac{d}{L} \right)^{3,19} \left(\frac{D_o}{d} \right)^{6,48} \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{1,42} \right]$$

Como δ_{tot} é igual a 41 mm, d igual a 450 mm, L igual a 11250 mm, D_o igual a 270 mm, n igual a 15 e α igual a 3 (aberturas circulares), vem

$$\delta_{tot,ab} = 41 \left[1 + 5167 \left(\frac{450}{11250} \right)^{3,19} \left(\frac{270}{450} \right)^{6,48} \left(\frac{15}{3} \right)^{1,42} \right] \cong 44 \text{ mm}$$

Nesse caso, as aberturas provocaram um acréscimo na flecha de aproximadamente 7%. Considerando a contraflecha (δ_o) de 10 mm, a flecha a ser usada para comparação com a flecha máxima permitida pela ABNT NBR 8800:2008 é:

$$\delta_{max} = \delta_{tot,ab} - \delta_o = 44 - 14 = 30 \text{ mm}$$

Exemplos de utilização dos ábacos

8.4 - Projeto de aberturas circulares concêntricas em viga mista com perfil I laminado

Considere-se uma viga mista birrotulada, escorada antes da cura do concreto, submetida a uma carga uniformemente distribuída, com o mesmo vão (11250 mm) e o mesmo perfil de 8.3 (W460x52 em aço com resistência ao escoamento igual a 345 MPa), na qual também é necessário fazer o maior número possível de aberturas circulares concêntricas com diâmetro D_o igual a 270 mm. A laje é maciça, com espessura de 10 cm, largura efetiva de 2813 mm e possui concreto de densidade normal com resistência característica à compressão igual a 25 MPa.

Posicionar as aberturas, sabendo-se que, no dimensionamento da viga sem aberturas, feito conforme a ABNT NBR 8800:2008, para 75% de interação, se obteve:

$$\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} = 0,70, \quad \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = 0,23 \quad \text{e} \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$$

Solução:

Os ábacos relacionados a vigas mistas com perfil I laminado estão agrupados no Capítulo 5. Os requisitos para aplicação desses ábacos encontram-se no subitem 1.8.2.3. Para a viga em estudo, observa-se que os requisitos relacionados ao tipo e ao aço do perfil, às propriedades do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor, ao tipo de carregamento, ao concreto e às dimensões da laje são atendidos.

Como $D_o/d = 270/450 = 0,6$ e a abertura é concêntrica, toma-se $h_{zn} = D_o$. Logo, o ábaco aplicável é o de número 59.

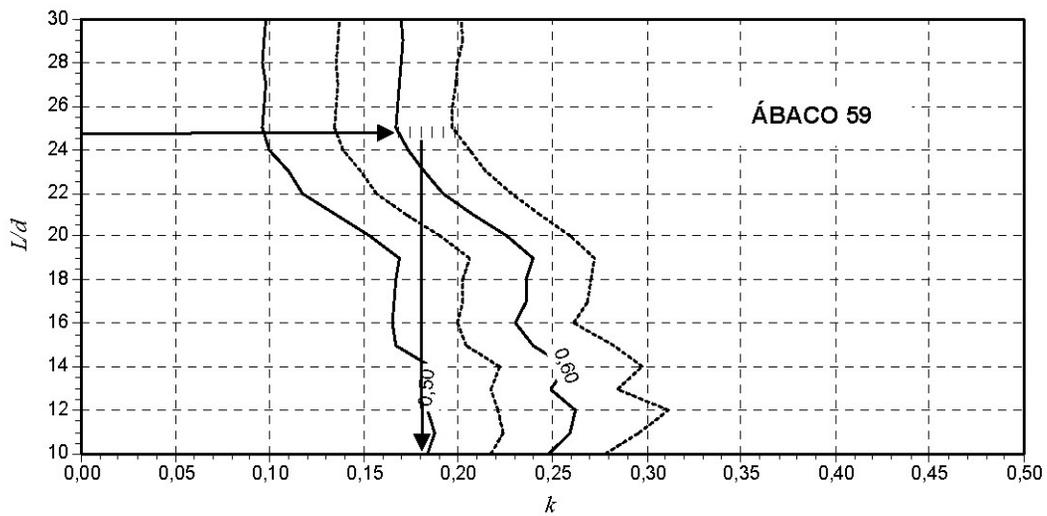
Os dados de entrada são a taxa de solicitação (S_d/R_d), igual a 0,70 (maior valor entre M_{Sd}/M_{Rd} e V_{Sd}/V_{Rd}), e a relação:

$$\frac{L}{d} = \frac{11250}{450} = 25$$

Verifica-se, no entanto, que o ábaco 59 contempla apenas vigas mistas com relação S_d/R_d de no máximo 0,65. Uma alternativa, nesse caso, é substituir o perfil de aço por um mais resistente, com o objetivo de reduzir essa relação. Se fosse tomado o perfil seguinte da série, W460x60, as relações M_{Sd}/M_{Rd} e V_{Sd}/V_{Rd} cairiam para 0,62 e 0,22, respectivamente, e poderia ser utilizado o ábaco 59 (com o novo perfil de aço, V_{Rd} permanece igual a $V_{pl}/1,1$). Como o W460x60 possui altura total d igual a 455 mm, vem:

$$\frac{L}{d} = \frac{11250}{455} = 24,73$$

Com os valores de L/d igual a 24,73 e S_d/R_d igual a 0,62 no ábaco 59, obtém-se $k \cong 0,18$ como ilustra a figura seguinte.



Isso indica que a zona neutra vai de:

$$z = k L = 0,18L = 0,18 \times 11250 = 2025 \text{ mm}$$

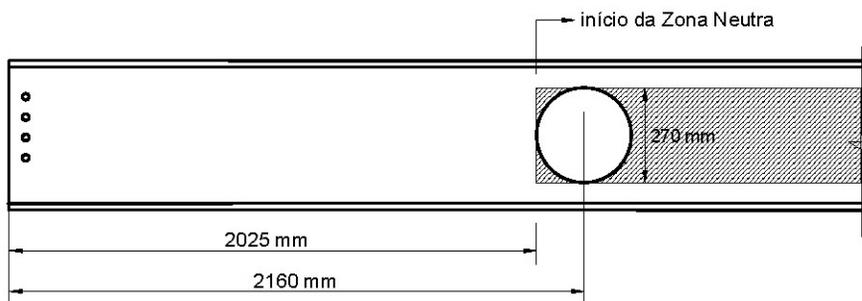
até

$$z = 11250 - 2025 = 9225 \text{ mm}$$

A zona neutra, portanto, tem como comprimento:

$$L_{zn} = L - 2kL = 11250 - 2 \times 0,18 \times 11250 = 7200 \text{ mm}$$

Isso significa que a zona neutra abrange os 7200 mm centrais da viga e o centro da abertura extrema deverá estar situado a pelo menos 2160 mm do apoio, como mostrado na figura a seguir.



O espaçamento mínimo entre bordas de aberturas circulares em vigas mistas, conforme definido no sub-item 1.8.2.3 deve atender à condição:

$$s \geq \begin{cases} 2d \\ D_o \frac{1,1V_{sd}/V_{pl}}{1 - 1,1V_{sd}/V_{pl}} \end{cases}$$

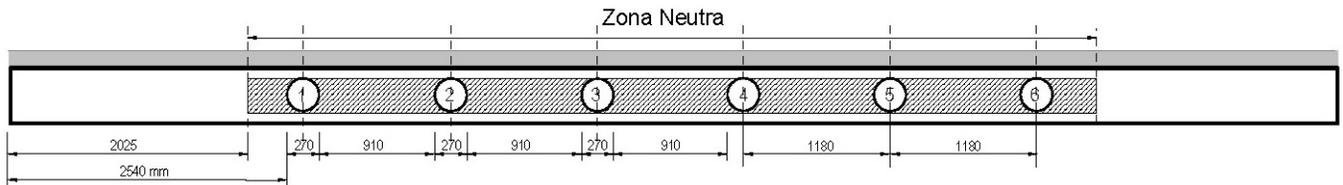
Assim, como $D_o = 270 \text{ mm}$, $V_{Rd} = V_{pl}/1,1$ e $V_{sd}/V_{Rd} = 0,22$, vem:

Exemplos de utilização dos ábacos

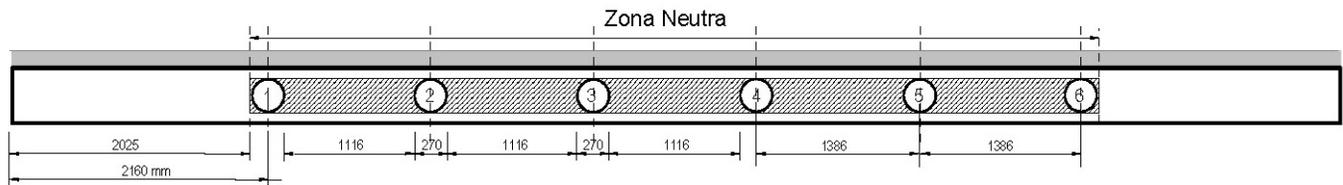
$$s \geq \begin{cases} 2d = 2 \times 455 = 910 \text{ mm} \\ D_o \frac{1,1V_{sd}/V_{pl}}{1-1,1V_{sd}/V_{pl}} = D_o \left(\frac{V_{sd}/V_{Rd}}{1-V_{sd}/V_{Rd}} \right) = 270 \times \left(\frac{0,22}{1-0,22} \right) = 76 \text{ mm} \end{cases}$$

Logo, prevalece o espaçamento mínimo de 910 mm. Dessa forma, podem ser feitas apenas 6 aberturas circulares com $D_o = 270$ mm na viga em questão. A seguir são apresentadas duas alternativas possíveis, tendo em vista o espaçamento mínimo requerido entre aberturas:

- Alternativa 1: aberturas espaçadas de 910 mm entre bordas adjacentes.



- Alternativa 2: aberturas espaçadas de 1116 mm entre bordas adjacentes.



Como se trata de uma viga mista, de acordo com 1.8.3-a precisam ser colocadas armaduras adicionais transversal e longitudinal na laje sobre as aberturas, com taxa de 0,25% da área de cisalhamento da laje (A_{cc}). Essas armaduras devem se estender para além da abertura, nos dois sentidos, até à distância de d ou D_o , a que for maior (ver Figura 1.13).

O comprimento de cisalhamento da laje no entorno de cada abertura circular é dado por:

$$L_{cc} \geq \begin{cases} 2d + D_o = 2 \times 450 + 270 = 1170 \text{ mm} \\ 3D_o = 3 \times 270 = 810 \text{ mm} \end{cases}$$

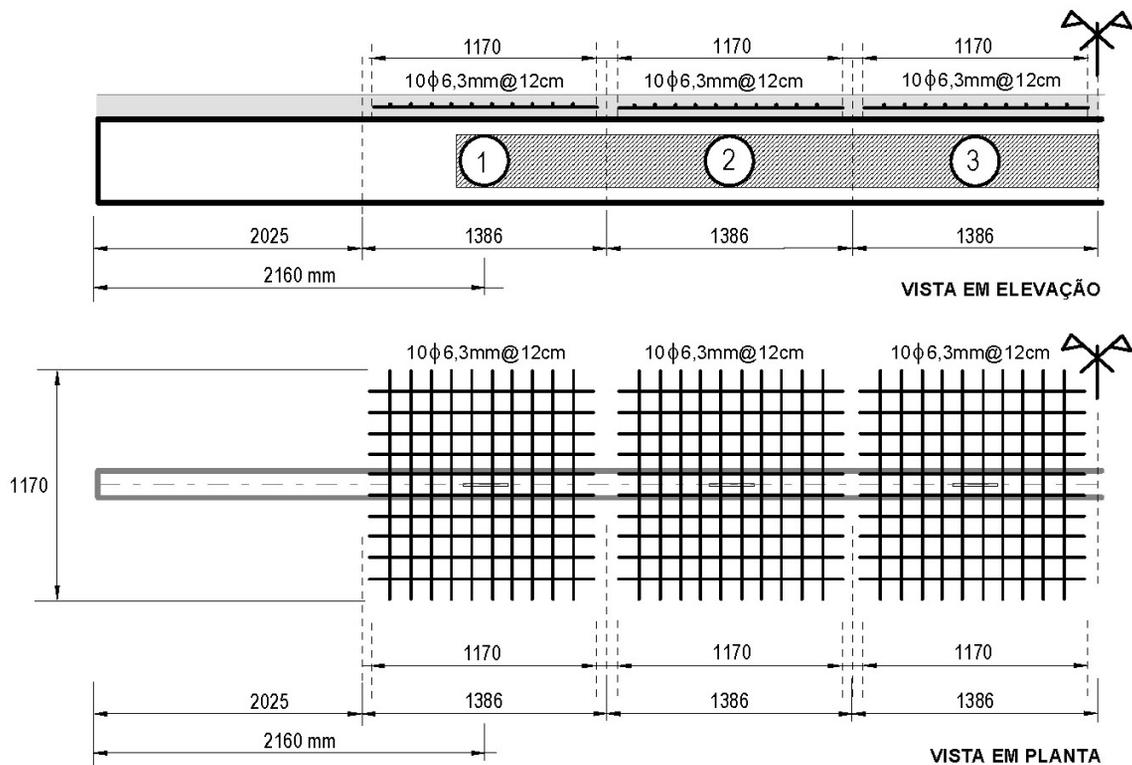
Logo, adota-se L_{cc} como 1170 mm. Como a laje é maciça e possui espessura t_c de 100 mm, a área de cisalhamento será:

$$A_{cc} = L_{cc} t_c = 1170 \times 100 = 117000 \text{ mm}^2$$

Portanto, a área necessária das armaduras longitudinal e transversal é:

$$A_{so} = \frac{0,25}{100} A_{cc} = \frac{0,25}{100} \times 117000 = 292,5 \text{ mm}^2$$

Essa área fica atendida com 10 barras de diâmetro igual a 6,3 mm, espaçadas de aproximadamente 120 mm, que devem ser dispostas tanto na direção transversal ao eixo da viga, como na direção longitudinal, com comprimento $L_{cc} = 1170$ mm, como mostrado na figura a seguir.

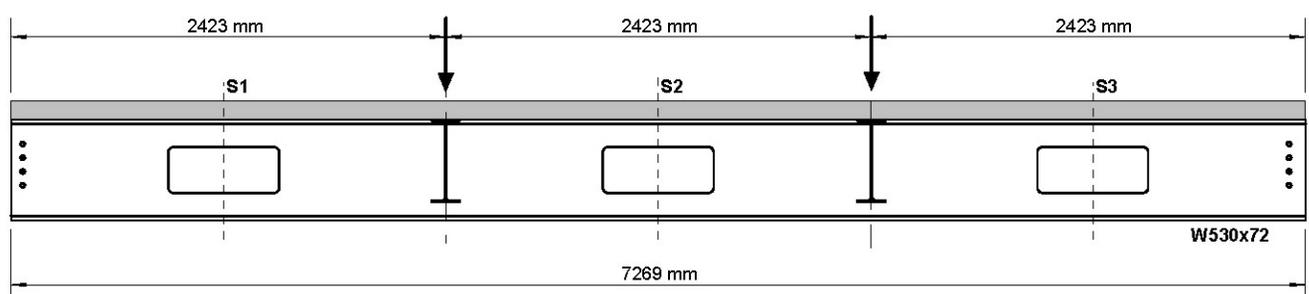


Observa-se que, nesse caso, o comprimento das barras da armadura de reforço quase coincide com a distância entre aberturas na direção longitudinal. Em situações assim, pode ser mais prático utilizar uma armadura longitudinal contínua, eliminando a necessidade de cortar as barras.

Como a viga em estudo possui aberturas circulares, não é necessário acrescentar conectores de cisalhamento na região das aberturas (ver 1.8.3-b).

8.5 - Determinação da zona neutra para uma viga mista com perfil I laminado sujeita a forças concentradas e cálculo da flecha

A seguir mostra-se a viga principal de uma edificação, constituída por um perfil I laminado W530x72 ($d = 524$ mm, $b_f = 207$ mm, $t_f = 10,9$ mm, $t_w = 9$ mm), em aço com resistência ao escoamento (f_y) igual a 345 MPa, que recebe duas vigas secundárias. Essa viga é mista, escorada antes da cura do concreto, possui 7269 mm de vão, e quando calculada sem aberturas pela ABNT NBR 8800:2008 apresenta uma taxa de solicitação $S_d/R_d = 0,70$, para um grau de interação de 55%. A laje é maciça, com espessura de 10 cm, largura efetiva de 1817 mm e possui concreto de densidade normal com resistência característica à compressão igual a 25 MPa. Deseja-se saber qual a maior abertura retangular concêntrica com razão de aspecto 2:1 que pode ser feita nas seções S1, S2 e S3 indicadas.



Exemplos de utilização dos ábacos

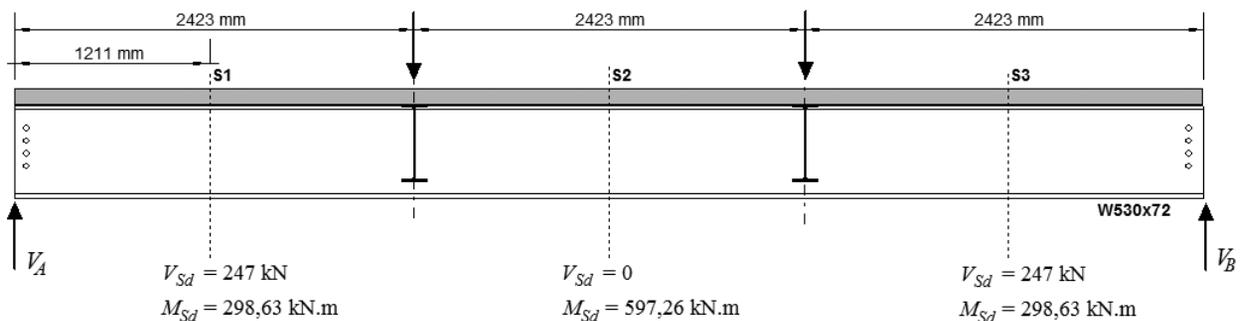
Deseja-se também determinar a flecha da viga com aberturas. Sabe-se que a viga sem aberturas, para a combinação de ações de serviço mais desfavorável, tem uma flecha, δ_{tot} , de 14 mm e que não foi dada contraflecha.

Solução:

Os ábacos relacionados a vigas mistas com perfil I laminado estão agrupados no Capítulo 5. Os requisitos para aplicação desses ábacos encontram-se no subitem 1.8.2.3. Para a viga em estudo, observa-se que o requisito relacionado ao tipo do perfil é atendido. Supõe-se que os requisitos relacionados ao aço e às propriedades do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor, ao concreto e às dimensões da laje também estejam atendidos.

Com relação ao requisito relacionado ao tipo de carregamento, por se tratar de uma viga submetida a forças concentradas, há que se verificar se o momento fletor e a força cortante solicitantes de cálculo, nas seções S1, S2 e S3, são menores do que aqueles que ocorreriam para o mesmo perfil de aço submetido à máxima carga uniformemente distribuída possível.

Para a viga sob atuação de forças concentradas, os esforços solicitantes de cálculo nas seções S1, S2 e S3 são indicados na figura seguinte.



O momento fletor resistente de cálculo da viga mista (M_{Rd}) com 55% de interação é igual a 848,94 kN.m. A carga uniformemente distribuída de cálculo que produz esse momento fletor é dada por:

$$M_{Rd} = \frac{q_{Sd} L^2}{8} \therefore q_{Sd} = \frac{8 M_{Rd}}{L^2} = \frac{8 \times 848,94}{7,269^2} = 128,5 \text{ kN/m}$$

A reação de apoio para essa carga distribuída é $V_{A,q_{Sd}} = 467 \text{ kN}$, e o momento fletor e a força cortante solicitantes de cálculo em S1 e S3, produzidos por q_{Sd} são, respectivamente:

$$M_{S1,q_{Sd}} = M_{S3,q_{Sd}} = V_{A,q_{Sd}} z - q_{Sd} \frac{z^2}{2} = 467 \times 1,211 - 128,5 \times \frac{1,211^2}{2} = 471,3 \text{ kN.m} > 298,63 \text{ kN.m}$$

$$V_{S1,q_{Sd}} = V_{S3,q_{Sd}} = V_{A,q_{Sd}} - q_{Sd} z = 467 - 128,5 \times 1,211 = 311,4 \text{ kN} > 247 \text{ kN}$$

Em S2 são:

$$M_{S2,q_{Sd}} = V_{A,q_{Sd}} z - q_{Sd} \frac{z^2}{2} = 467 \times 3,6345 - 128,5 \times \frac{3,6345^2}{2} = 848,6 \text{ kN.m} > 597,26 \text{ kN.m}$$

$$V_{S2,q_{Sd}} = 0$$

Portanto, o momento fletor e a força cortante solicitantes de cálculo na viga sob forças concentradas em S1, S2 e S3, mostrados na figura anterior, não são maiores que na viga submetida à máxima carga uniformemente distribuída. Adicionalmente, como as forças concentradas estão a uma distância de 1054,5 mm das bordas das aberturas, valor superior à altura da viga d , igual a 524 mm, observa-se ainda que:

$$\left(\frac{h}{t_w} = \frac{524 - 2 \times 10,9}{9} = 55,8 \right) \leq \left(3,06 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,06 \sqrt{\frac{200000}{345}} = 73,68 \right)$$

Portanto, os ábacos podem ser empregados. A relação L/d é de $7269/524 \approx 13,9$.

Como se trata de uma viga mista com perfil I laminado, devem ser utilizados os ábacos do Capítulo 5 específicos para aberturas retangulares. A tabela a seguir auxilia na verificação.

$h_o = h_{zn}$ (mm)	a_o (mm)	ábaco	k necessário	k possível	verificação
$0,2d = 105$	$2h_o = 210$	67	0,152	0,10	atende
$0,3d = 157$	$2h_o = 314$	68	0,145	0,15	não atende

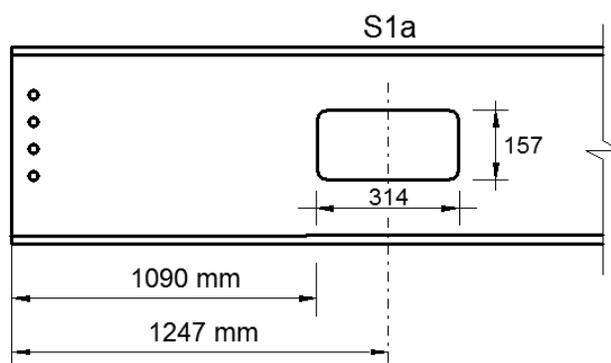
O valor de k necessário foi calculado por meio da seguinte expressão:

$$kL = 1211 - \frac{a_o}{2}$$

Analisando a tabela anterior, conclui-se que nos terços extremos da viga, a maior abertura retangular possível seria de 210×105 mm ($h_o = 0,2d$ e $k = 0,10$).

Observa-se que uma abertura com h_o igual a $0,3d$ quase atende às condições de dimensionamento, com um k necessário igual a $0,145$ contra um k possível de $0,15$. Nesse caso, existem duas possibilidades:

1. deslocar a abertura de 314×157 mm em direção ao centro da viga, de modo que sua borda mais externa fique situada em $0,15L = 1090$ mm, como mostrado na figura a seguir:



Com a mudança da posição da abertura, cuja seção central agora é a S1a, devem-se atualizar os valores dos esforços na nova posição. Assim, na viga sob carga distribuída máxima, obtêm-se na posição S1a:

Exemplos de utilização dos ábacos

$$M_{S1a,q_{sd}} = V_{A,q_{sd}} z - q_{sd} \frac{z^2}{2} = 467 \times 1,247 - 128,5 \times \frac{1,247^2}{2} = 48244 \text{ kN.cm}$$

$$V_{S1a,q_{sd}} = V_{A,q_{sd}} - q_{sd} z = 467 - 128,5 \times 1,247 = 306,8 \text{ kN}$$

Na viga sob forças concentradas, vêm:

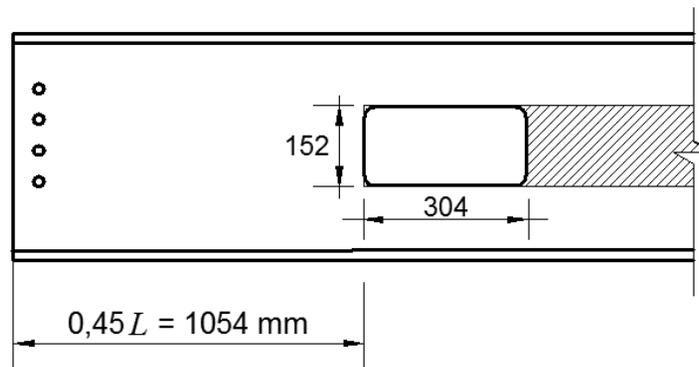
$$M_{Sd} = \frac{z}{2423} \times 59726 = \frac{1247}{2423} \times 59726 = 33738 \text{ kN.cm}$$

$$V_{Sd} = 247 \text{ kN}$$

Como $M_{Sd} \leq M_{s1a,q_{sd}}$ e $V_{Sd} \leq V_{s1a,q_{sd}}$, o ábaco 68 pode ser utilizado.

2. interpolar a dimensão da abertura para $k = 0,145$, como segue:

- para $k = 0,10 \Rightarrow h_o = 105 \text{ mm}$
- para $k = 0,15 \Rightarrow h_o = 157 \text{ mm}$
- para $k = 0,145 \Rightarrow h_o = 152 \text{ mm}$ e $a_o = 2h_o = 304 \text{ mm}$



Como se trata de uma viga mista, de acordo com 1.8.3-a, precisam ser colocadas armaduras adicionais transversal e longitudinal sobre as aberturas, com taxa de 0,25% da área de cisalhamento da laje (A_{cc}). Essas armaduras adicionais devem se estender para além da abertura, nos dois sentidos, até à distância de d ou a_o , a que for maior (ver Figura 1.13).

O comprimento de cisalhamento da laje no entorno de cada abertura retangular é dado por:

$$L_{cc} \geq \begin{cases} 2d + a_o = 2 \times 524 + 304 = 1352 \text{ mm} \\ 3a_o = 3 \times 304 = 912 \text{ mm} \end{cases}$$

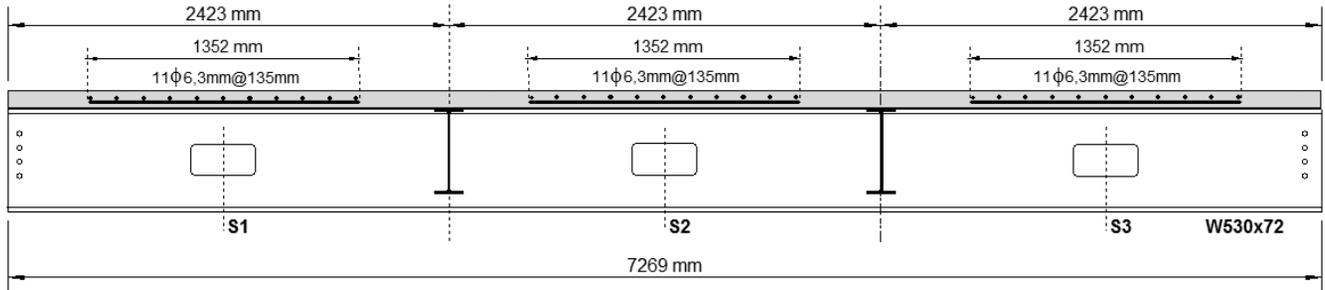
Logo, adota-se L_{cc} como 1352 mm. Como a laje é maciça e possui espessura t_c de 100 mm, a área de cisalhamento será:

$$A_{cc} = L_{cc} t_c = 1352 \times 100 = 135200 \text{ mm}^2$$

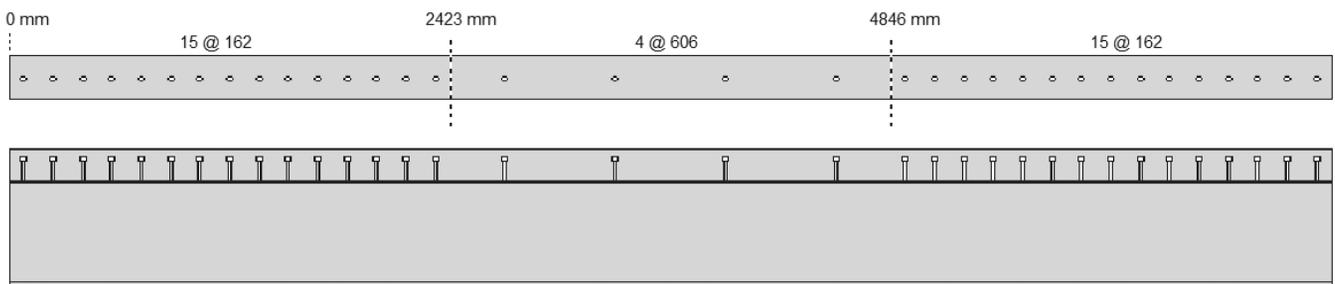
Portanto, a área necessária das armaduras longitudinal e transversal é:

$$A_{so} = \frac{0,25}{100} A_{cc} = \frac{0,25}{100} \times 135200 = 338 \text{ mm}^2$$

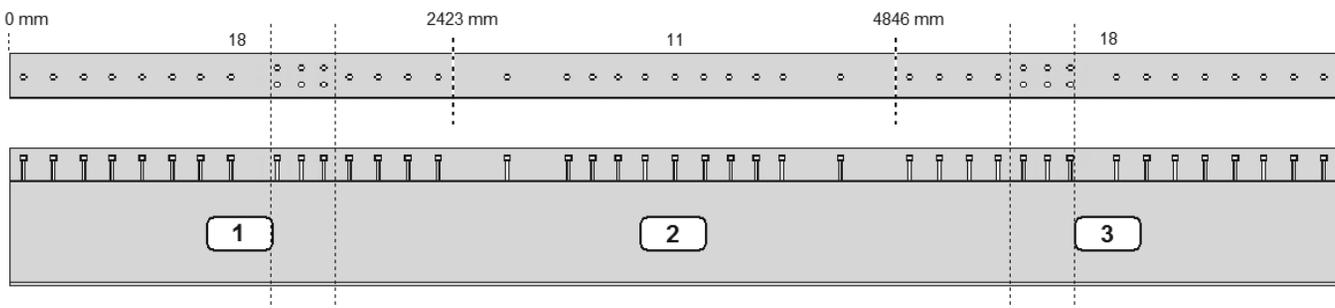
Essa área fica atendida com 11 barras de diâmetro igual a 6,3 mm, espaçadas de aproximadamente 135 mm, que devem ser dispostas tanto na direção transversal ao eixo da viga, como na direção longitudinal, com comprimento $L_{cc} = 1352$ mm, como mostrado na figura a seguir.



Como a viga em estudo possui aberturas retangulares, é necessário acrescentar conectores de cisalhamento na região das aberturas, conforme especificado em 1.8.3-b. Na viga sem aberturas foram usados conectores de cisalhamento pino com cabeça de diâmetro igual a 19 mm, distribuídos conforme se vê na figura a seguir.



Para as aberturas 1 e 3, como o espaçamento longitudinal dos conectores já está próximo do mínimo permitido pela ABNT NBR 8800:2008 ($6\phi = 6 \times 19$ mm = 114 mm), a solução é acrescentar uma segunda linha de conectores no comprimento d a partir da abertura em direção ao centro do vão. Para a abertura 2, pode-se acrescentar 7 conectores em linha, de modo a atender o requisito de pelo menos dois conectores a cada 300 mm, como mostrado na figura a seguir.



A flecha da viga com aberturas retangulares, conforme o item 1.9, é dada por:

$$\delta_{tot,ab} = \delta_{tot} \left[1 + 5167 \left(\frac{d}{L} \right)^{3,19} \left(\frac{a_o}{d} \right)^{6,48} \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{1,42} \right]$$

Como δ_{tot} é igual a 14 mm, d igual a 524 mm, L igual a 7269 mm, a_o igual a 152 mm, n igual a 3 e α igual a 1 (aberturas retangulares com razão de aspecto de 2:1), vem:

$$\delta_{tot,ab} = 14 \left[1 + 5167 \left(\frac{524}{7269} \right)^{3,19} \left(\frac{152}{524} \right)^{6,48} \left(\frac{3}{1} \right)^{1,42} \right] = 14(1 + 0,0018) \cong 14 \text{ mm}$$

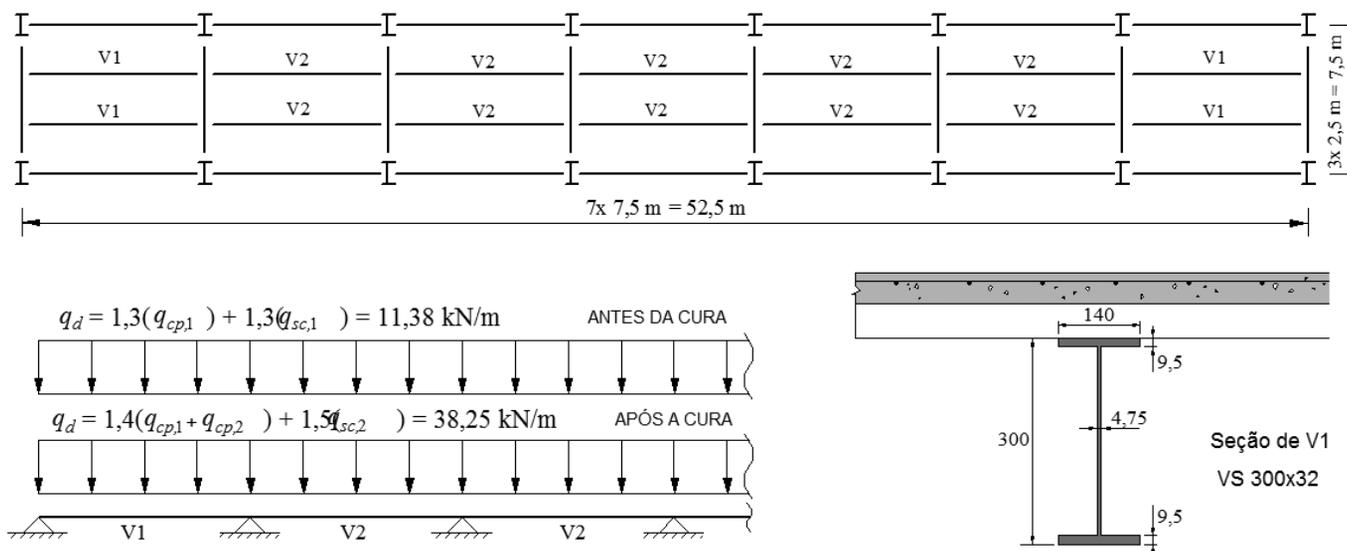
Exemplos de utilização dos ábacos

Nesse caso, as aberturas praticamente não provocaram acréscimo na flecha.

Salienta-se que os cantos das aberturas devem ter como raio mínimo o maior valor entre 16 mm e duas vezes a espessura da alma t_w , nesse caso igual a $2 \times 9,0 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$. Portanto, prevalece um raio mínimo necessário de 18 mm.

8.6 - Determinação da zona neutra para vigas com grandes aberturas

Determinar a maior abertura retangular concêntrica, com razão de aspecto a_0/h_0 igual a 2:1, que pode ser feita na viga mista V1 do sistema de piso esquematizado abaixo, e em que posição aberturas desse tipo podem ser introduzidas. A viga é birrotulada, com as características e o carregamento mostrados e não é escorada antes da cura do concreto. O cálculo detalhado dessa viga sem aberturas é apresentado em Queiroz *et al.* (2010).



O perfil de aço é soldado, VS 300x32, e possui aço com resistência ao escoamento de 350 MPa. A laje é mista, com fôrma de aço incorporada com nervura de 75 mm de altura e altura total de 140 mm, concreto de densidade normal com resistência característica à compressão de 20 MPa. No quadro a seguir encontram-se os carregamentos atuantes (antes e após a cura do concreto) e os momentos fletores e forças cor-tantes solicitantes e resistentes de cálculo, determinados de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

	Antes da cura do concreto	Após a cura do concreto
Esforços solicitantes de cálculo	$M_{Rd,1} = 151,24 \text{ kN.m}$ $V_{Rd,1} = 252 \text{ kN}$	$M_{Rd,2} = 295,45 \text{ kN.m}^{(*)}$ $V_{Rd,2} = 252 \text{ kN}$
Esforços resistentes de cálculo	$M_{Sd,1} = 79,98 \text{ kN.m}$ $V_{Rd,1} = 42,66 \text{ kN}$	$M_{Sd,2} = 268,95 \text{ kN.m}$ $V_{Sd,2} = 143,44 \text{ kN}$
(*) para 71,2% de interação		

Solução:

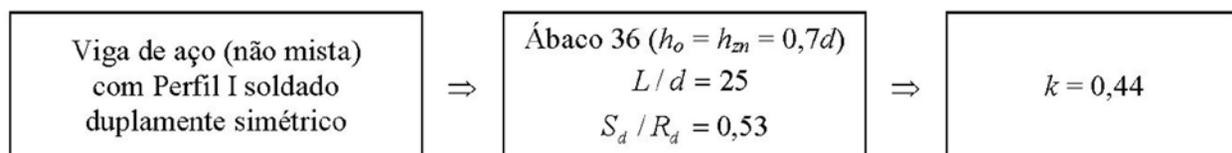
Os ábacos relacionados a vigas de aço e a vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico estão agrupados nos Capítulos 3 e 6, respectivamente. Os requisitos para aplicação desses ábacos encontram-se nos subitens 1.8.2.2 e 1.8.2.3. Para a viga em estudo, observa-se que os requisitos relacionados ao tipo e ao aço do perfil, às propriedades do perfil para que não ocorra instabilidade sob momento fletor, ao tipo de carregamento, ao concreto e às dimensões da laje são atendidos.

Supondo inicialmente a abertura com a maior altura possível ($0,7d$), vêm:

$$h_o = h_{zn} = 0,7d = 0,7 \times 300 = 210 \text{ mm} \quad a_o = 2h_o = 420 \text{ mm}$$

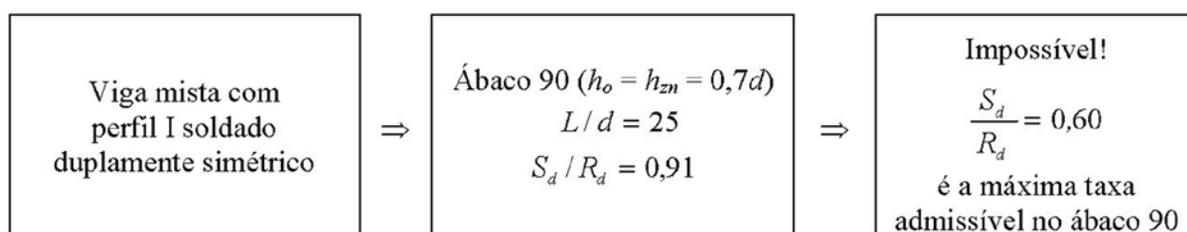
$$L/d = 7500/300 = 25$$

- Antes da cura do concreto: $\frac{S_d}{R_d} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{Sd,1}}{M_{Rd,1}} = \frac{79,98}{151,24} = 0,53 \\ \frac{V_{Sd,1}}{V_{Rd,1}} = \frac{42,66}{252} = 0,17 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{S_d}{R_d} = 0,53$



$$kL = 0,44 \times 7500 = 3300 \text{ mm} \quad (L_{zn} = L - 2kL = 900 \text{ mm})$$

- Após a cura do concreto: $\frac{S_d}{R_d} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{Sd,2}}{M_{Rd,2}} = \frac{268,95}{295,45} = 0,91 \\ \frac{V_{Sd,2}}{V_{Rd,2}} = \frac{143,44}{252} = 0,57 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{S_d}{R_d} = 0,91$



Verifica-se que, embora a solução para o carregamento antes da cura seja possível, para a condição de carregamento após a cura os esforços solicitantes na viga mista são tais que não permitem uma abertura na alma do perfil de aço com $h_o = 0,7d$.

A rigor, analisando os ábacos do Capítulo 6, que são os aplicáveis nesse caso, constata-se que com taxa de sollicitação $S_d/R_d = 0,91$, não seria aceita qualquer abertura na viga em questão. Com os ábacos 87 a 90, identificam-se as taxas de sollicitação possíveis, considerando-se diversos tamanhos para a abertura, con-forme o quadro a seguir.

Exemplos de utilização dos ábacos

Altura da abertura	a_o	$(S_d/R_d)_{m\acute{a}x}$	ábaco	k	$L - 2kL$
$h_{zn} = 0,4d = 120 \text{ mm}$	$a_o = 2h_o = 240 \text{ mm}$	0,80	87	0,31	2850 mm
$h_{zn} = 0,5d = 150 \text{ mm}$	$a_o = 2h_o = 300 \text{ mm}$	0,75	88	0,37	1950 mm
$h_{zn} = 0,6d = 180 \text{ mm}$	$a_o = 2h_o = 360 \text{ mm}$	0,65	89	0,44	900 mm
$h_{zn} = 0,7d = 210 \text{ mm}$	$a_o = 1,8h_o = 378 \text{ mm}$	0,60	90	0,46	600 mm

Em resumo, as verificações feitas até esse ponto demonstram que não é possível fazer uma abertura com 420x210 mm ($h_o = 0,7d$) no perfil VS300x32 e que, para fazer uma abertura com 360x180 mm ($h_o = 0,6d$), é necessário usar um perfil para o qual a taxa de sollicitação S_d/R_d não ultrapasse 0,65. Reduzindo o tamanho da abertura para 300x150 mm, ou 240 x 120 mm, seria possível admitir uma taxa de sollicitação ainda maior.

Havendo de fato necessidade de se fazer a abertura na alma, uma solução seria alterar o perfil de aço, de modo a garantir para a viga mista uma capacidade resistente adicional que possibilite a introdução dessa abertura. Assim, o perfil soldado VS300x32 foi substituído pelo perfil VS400x38 ($d = 400 \text{ mm}$, $b_f = 160 \text{ mm}$, $t_f = 9,5 \text{ mm}$, $t_w = 4,75 \text{ mm}$) que, para o carregamento dado, apresenta as respostas do quadro seguinte:

	Antes da cura do concreto	Após a cura do concreto
Esforços resistentes de cálculo	$M_{Rd,1} = 241,27 \text{ kN.cm}$ $V_{Rd,1} = 248 \text{ kN}$	$M_{Rd,2} = 411,00 \text{ kN.cm}^{(*)}$ $V_{Rd,2} = 248 \text{ kN}$
Esforços sollicitantes de cálculo	$M_{Sd,1} = 79,98 \text{ kN.cm}$ $V_{Sd,1} = 43 \text{ kN}$	$M_{Sd,2} = 268,95 \text{ kN.cm}$ $V_{Sd,2} = 143 \text{ kN}$
(*) para 58,6% de interação		

Com o novo perfil, obtém-se a seguinte taxa de sollicitação na viga mista, que possivelmente representa a situação mais desfavorável:

$$\frac{S_d}{R_d} = \frac{M_{Sd,2}}{M_{Rd,2}} = \frac{26895}{41100} = 0,65$$

Com essa taxa, e com $L/d = 7500/400 = 18,75$, observa-se que a maior abertura possível é alcançada com o uso do ábaco 89, de dimensões iguais a:

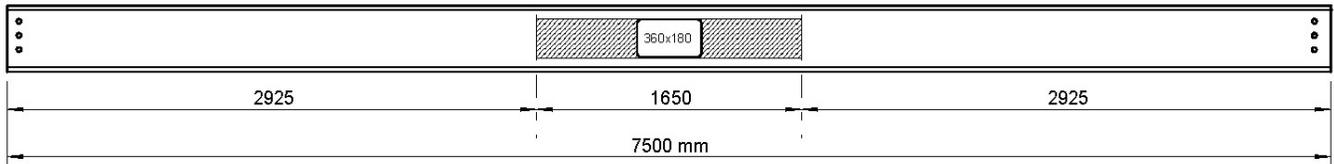
$$h_o = 0,6d = 0,6 \times 300 = 180 \text{ mm} \quad a_o = 2h_o = 360 \text{ mm}$$

Nesse ábaco, pode-se determinar o comprimento onde a citada abertura pode ser feita (zona neutra). Assim:

$$k = 0,39 \Rightarrow kL = 0,39 \times 7500 = 2925 \text{ mm}$$

$$\text{O comprimento da zona neutra é, portanto: } L_{zn} = L - 2kL = 7500 - 2 \times 0,39 \times 7500 = 1650 \text{ mm}$$

Logo, a zona neutra, para esse caso, tem seus limites situados a $kL = 0,39 \times 7500 = 2925$ mm das extremidades da viga, conforme representado na figura seguinte.



Deve-se, no entanto, confirmar se essa abertura pode ser feita também na viga de aço antes da cura do concreto. Nessa fase, tem-se:

$$\frac{S_d}{R_d} = \frac{M_{Sd,1}}{M_{Rd,1}} = \frac{7998}{24127} = 0,33$$

Com $L/d = 18,75$, para a abertura com $h_o = 0,6d$, pode-se usar o ábaco 35, com o qual se obtém:

$$k = 0,26 \Rightarrow kL = 0,26 \times 7500 = 1950 \text{ mm}$$

Logo, a abertura pode ser feita também na viga de aço, em um comprimento de zona neutra ainda mais flexível que na viga mista (o valor de k na viga de aço é menor que na viga mista, como era esperado no caso em estudo).

Salienta-se que os cantos das aberturas devem ter como raio mínimo o maior valor entre 16 mm e duas vezes a espessura da alma t_w , nesse caso igual a $2 \times 4,75 \text{ mm} = 9,5 \text{ mm}$. Portanto, prevalece um raio mínimo necessário de 16 mm.

Os requisitos de armadura de reforço e conectores de cisalhamento adicionais listados em 1.8.3 devem ser cumpridos.

Há um aspecto interessante a considerar antes de iniciar a verificação de uma viga com abertura. Nos casos de aberturas grandes, cuja altura represente, por exemplo, 60 a 70% da altura do perfil de aço, é necessário que o perfil tenha uma reserva de capacidade resistente para receber a abertura. Em alguns casos pode ser necessária uma reserva de aproximadamente 40% da capacidade resistente, como se vê no quadro a seguir.

Assim, naquelas situações em que já se sabe, de antemão, que será necessário introduzir uma abertura de grandes proporções em relação ao perfil de aço, é interessante consultar os ábacos antes de começar o dimensionamento e determinar, a partir deles, a taxa de sollicitação máxima à qual a viga poderá estar sujeita.

O quadro a seguir indica as taxas de sollicitação (S_d/R_d) máximas que podem ser admitidas quando é necessário fazer aberturas circulares, quadradas ou retangulares com altura da ordem de 60 a 70% da altura do perfil de aço.

Exemplos de utilização dos ábacos

vigas de aço com perfil I laminado				vigas mistas com perfil I laminado			
Tipo de abertura	Altura da zona neutra	Taxa S_d / R_d máxima	Ábaco	Tipo de abertura	Altura da zona neutra	Taxa S_d / R_d máxima	Ábaco
Circular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,85	5	Circular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,65	59
Circular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,75	6	Circular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,60	60
Quadrada	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,85	11	Quadrada	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,65	65
Quadrada	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,75	12	Quadrada	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,60	66
Retangular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,85	17	Retangular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,65	71
Retangular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,75	18	Retangular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,60	72

vigas de aço com perfil I soldado duplamente simétrico				vigas mistas com perfil I soldado duplamente simétrico			
Tipo de abertura	Altura da zona neutra	Taxa S_d / R_d máxima	Ábaco	Tipo de abertura	Altura da zona neutra	Taxa S_d / R_d máxima	Ábaco
Circular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,90	23	Circular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,70	77
Circular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,85	24	Circular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,65	78
Quadrada	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,90	29	Quadrada	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,70	83
Quadrada	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,85	30	Quadrada	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,60	84
Retangular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,90	35	Retangular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,65	89
Retangular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,80	36	Retangular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,60	90

vigas de aço com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida				vigas mistas com perfil I soldado monossimétrico com mesa de menor espessura comprimida			
Tipo de abertura	Altura da zona neutra	Taxa S_d / R_d máxima	Ábaco	Tipo de abertura	Altura da zona neutra	Taxa S_d / R_d máxima	Ábaco
Circular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,75	41	Circular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,75	95
Circular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,70	42	Circular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,65	96
Quadrada	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,75	47	Quadrada	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,70	101
Quadrada	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,70	48	Quadrada	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,65	102
Retangular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,75	53	Retangular	$h_{zn} \leq 0,6d$	0,70	107
Retangular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,65	54	Retangular	$h_{zn} \leq 0,7d$	0,60	108

Capítulo 9

Aberturas em Perfis U, Tubulares
e Formados a Frio

Aberturas em Perfis U, Tubulares e Formados a Frio

9.1 - Considerações preliminares

Os ábacos apresentados neste trabalho, nos capítulos precedentes, foram elaborados por um simulador computacional desenvolvido com base em uma formulação que contempla perfis I que atendam às condições apresentadas no subitem 1.8.2. Esses ábacos, no entanto, dada a semelhança de comportamento estrutural na flexão, podem ser também utilizados para:

- perfis U laminados ou soldados, desde que sejam atendidas as condições descritas no subitem 9.2;

- perfis de seção tubular retangular, englobando os perfis caixão, os perfis laminados, com ou sem conformação posterior a frio, e os formados a frio com solda de costura, desde que sejam atendidas as condições descritas no subitem 9.3.

Salienta-se que os ábacos não podem ser aplicados aos demais tipos de perfis, incluindo perfis I laminados ou soldados que não atendam às condições de 1.8.2, perfis tubulares circulares (ver subitem 9.4) e perfis formados a frio (ver subitem 9.5).

9.2 - Aberturas em perfis U

Os ábacos presentes neste trabalho podem ser aplicados aos perfis U fletidos em relação ao eixo de maior momento de inércia, caso sejam atendidas as condições estabelecidas no subitem 1.8.2. Nas condições relacionadas ao tipo de perfil, devem ser aplicadas as limitações dos perfis I laminados para U laminados e as limitações dos perfis I soldados para U soldados.

9.3 - Aberturas em perfis de seção tubular retangular

Os ábacos presentes neste trabalho po-

dem também ser aplicados aos perfis de seção tubular retangular e quadrada fletidos em relação ao eixo de maior momento de inércia, caso sejam feitas aberturas de geometrias iguais e nas mesmas posições nas duas almas e sejam atendidas as condições estabelecidas no subitem 1.8.2. Nas condições relacionadas ao tipo de perfil, devem ser aplicadas as limitações:

- dos perfis I laminados para perfis tubulares laminados e formados a frio com solda de costura;

- dos perfis I soldados para perfis caixão.

Adicionalmente, nos perfis tubulares laminados e formados a frio, os percentuais de limitação da altura da abertura, que nos cabeçalhos dos ábacos estão relacionados à altura da seção transversal (d), devem ser agora referidos à altura da parte plana das almas (h_{plana} - ver Figura 9.1). Isso significa que, por exemplo, em um ábaco em que a altura da zona neutra está limitada em $0,5d$, nesses perfis tubulares passa a ser limitada em $0,5h_{plana}$. Em todas as demais operações, deve-se manter d como a altura da seção transversal.

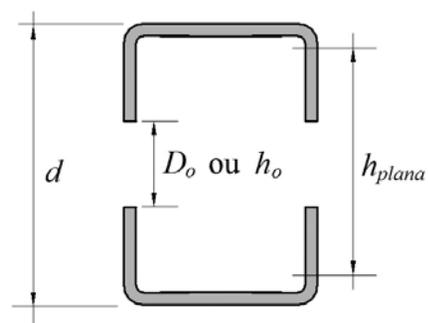


Figura 9.1 – Altura da seção a ser considerada para perfis retangulares com cantos arredondados.

9.4 - Aberturas em perfis tubulares circulares

O comportamento de um tubo circular com aberturas é complexo, devido à quantidade de parâmetros que influencia a capacidade re-

sistente e à multiplicidade de modos de colapso possíveis. São raras e recentes as referências na literatura técnica a estudos sobre o problema (ver, por exemplo, Djoudi e Bahai, 2004; Rahimi e Alashti, 2007).

Na Figura 9.2 são mostradas diversas configurações possíveis para a deformada de uma casca curva com abertura. Dependendo da posição da abertura na parede do tubo a configuração das deformações na chapa se modifica. Cada uma dessas configurações corresponde a um valor distinto de capacidade resistente.

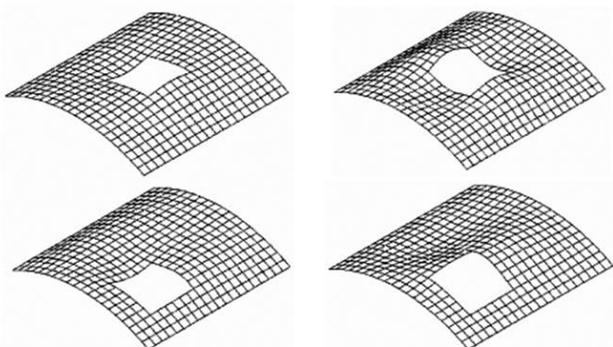


Figura 9.2 – Problemas de instabilidade local no entorno de uma abertura numa casca curva (adaptado de Djoudi e Bahai, 2004).

Considerando os poucos estudos divulgados, não se recomenda a execução de aberturas sem reforço em perfis tubulares circulares. Um corte na chapa com superfície curva pode criar uma situação muito desfavorável, reduzindo significativamente a capacidade resistente do perfil, além de produzir perturbações no comportamento estrutural do tubo difíceis de prever com os modelos disponíveis atualmente. Em geral, problemas desse tipo são tratados por meio de uma análise numérica específica. Como ilustração, na Figura 9.3 é apresentada a imagem de um modelo de elementos finitos para a análise de um tubo com uma abertura circular na parede.

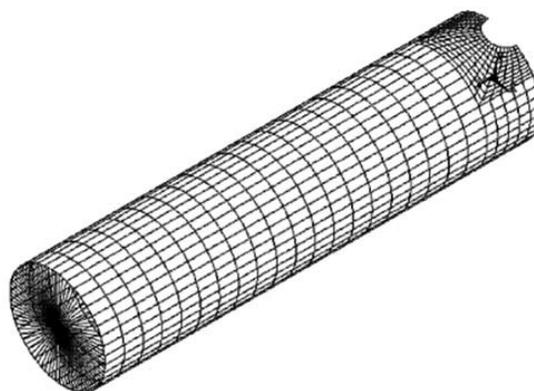


Figura 9.3 – Modelo de elementos finitos para análise do comportamento de um tubo com abertura circular (adaptado de Rahimi e Alashti, 2007).

9.5 - Aberturas em perfis formados a frio (PFF)

Os perfis formados a frio (PFF), via de regra, apresentam seções transversais em que elementos componentes (mesa, alma, etc.) têm largura muito superior à espessura (esbeltez elevada). Por essa razão, e também pelo fato de possuírem um processo de fabricação diferente do dos demais perfis, apresentam um comportamento próprio, geralmente influenciado por fenômenos localizados, de difícil tratamento matemático. Por exemplo, a questão da instabilidade local dos PFF, envolvendo a interação com a instabilidade global, é determinante no dimensionamento dos elementos estruturais, e têm um tratamento específico. Essa é a principal razão para a existência de normas distintas, brasileiras e internacionais, para o dimensionamento de PFF e de perfis laminados e soldados.

Tendo em vista as particularidades do comportamento estrutural, o dimensionamento desses perfis com aberturas na alma apresenta alto grau de complexidade e segue um procedimento bastante diferente do aplicável aos demais perfis e apresentados neste trabalho.

Como ilustração, Moen e Schafer (2008) comentam que devido à elevada esbeltez, os

Aberturas em Perfis U, Tubulares e Formados a Frio

elementos componentes dos PFF, quando comprimidos, sofrem perda de rigidez, de modo que apenas uma parte de sua seção contribui efetivamente para a capacidade resistente do perfil. Comentam ainda que os PFF exibem modos de colapso distintos e mais complexos do que aqueles observados nos perfis laminados e soldados e que a introdução de aberturas produz perturbações importantes no seu comportamento estrutural, como o surgimento de modos de flambagem diferentes dos perfis sem aberturas, como mostra a Figura 9.4.

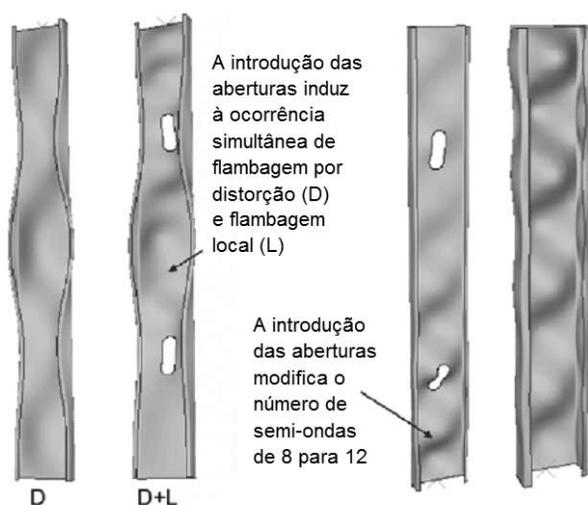


Figura 9.4 – Perturbação nos modos de flambagem em um perfil U enrijecido ocasionada pela introdução de aberturas na alma (adaptado de Moen e Schafer, 2008).

Na Figura 9.4 são mostradas duas situações: na primeira, o perfil sem abertura apresenta instabilidade por distorção, ao passo que o perfil com aberturas apresenta, simultaneamente, instabilidades por distorção e local; na segunda, o perfil sem aberturas apresenta instabilidade local com a formação de 8 semi-ondas, ao passo que o perfil com aberturas apresenta o mesmo tipo de instabilidade com a formação de 12 semi-ondas.

Pelas razões expostas, os ábacos apresentados neste trabalho não podem ser aplicados aos PFF, que possuem comportamento próprio, no qual a instabilidade local é normalmente predominante (nota-se que mesmo os perfis laminados e soldados cobertos pelos

ábacos não podem ser suscetíveis à instabilidade local - ver subitem 1.8.2).

Em síntese, pode-se dizer que dado ao grande número de parâmetros envolvidos no comportamento dos PFF, não existe ainda na literatura tecnocientífica um procedimento mais objetivo que permita a execução de um número razoável de ábacos para o projeto prático desses perfis com aberturas. De qualquer modo, havendo a necessidade de verificação de um caso bem definido de PFF com aberturas, recomenda-se recorrer à norma norte-americana AISI S100-2007 e ao seu comentário AISI S100-2007-C.

NOTAÇÃO

- a_o comprimento de uma abertura quadrada ou retangular (na direção do vão da viga)
- b largura em geral
- b_f largura das mesas do perfil de aço
- b_{fc} largura da mesa comprimida do perfil de aço
- b_{fi} largura da mesa inferior do perfil de aço
- b_{fs} largura da mesa superior do perfil de aço
- d altura total do perfil de aço
- e_o excentricidade da abertura em relação à semialtura do perfil de aço
- f flecha da viga sem aberturas
- f_o flecha da viga com aberturas
- f_{ck} resistência característica à compressão do concreto
- f_y resistência característica ao escoamento do aço
- h altura da alma, tomada como igual à distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados
- h_c duas vezes a distância do centro geométrico da seção transversal à face interna da mesa comprimida

h_o	altura da abertura quadrada ou retangular (na direção perpendicular ao vão da viga)	y_{ti}	distância do centro geométrico do tê inferior à face externa da mesa inferior
h_p	duas vezes a distância da linha neutra plástica da seção transversal à face interna da mesa comprimida;	y_{ts}	distância do centro geométrico do tê superior à face externa da mesa superior
h_{plana}	altura da parte plana das almas dos perfis tubulares laminados e formados a frio com solda de costura	z_o	distância do apoio esquerdo à linha central da abertura
h_{ti}	altura do tê inferior (parte da seção abaixo da abertura)	A_{cc}	área de cisalhamento da laje sobre uma abertura
h_{ts}	altura do tê superior (parte da seção acima da abertura)	A_{so}	área da armadura adicional sobre uma abertura
h_{zn}	altura da zona neutra	D_o	diâmetro de abertura circular
k	fração do comprimento da viga que delimita a zona neutra	E	módulo de elasticidade do aço (200000 MPa)
n	número de aberturas na viga	H_o	altura das aberturas quadradas ou retangulares (h_o) ou diâmetro das aberturas circulares (D_o)
q_{Sd}	carga uniformemente distribuída de cálculo	I_{yT}	momento de inércia do tê comprimido em relação ao eixo y
r_{yc}	raio de giração da seção T formada pela mesa comprimida e a parte comprimida da alma anexa, em regime elástico, em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (em perfis I duplamente simétricos é igual ao raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma, representado por ry)	$I_{x'}$	momento de inércia do tê comprimido em relação ao eixo x'
s	espaçamento livre mínimo entre bordas de duas aberturas adjacentes	$(KL)_{x'}$	comprimento de flambagem em relação ao eixo x' do tê superior
t	espessura em geral	L	vão ou comprimento da viga
t_c	espessura total das lajes maciças ou espessura acima das nervuras das lajes com fôrma de aço incorporada	L_b	distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)
t_f	espessura das mesas do perfil de aço	L_{cc}	comprimento de cisalhamento da laje sobre uma abertura
t_{fc}	espessura da mesa comprimida do perfil de aço	L_o	comprimento das aberturas quadradas ou retangulares (a_o) ou diâmetro das aberturas circulares (D_o)
t_{fi}	espessura da mesa inferior do perfil de aço monossimétrico	L_{zn}	comprimento da zona neutra
t_{fs}	espessura da mesa superior do perfil de aço monossimétrico	M_{pl}	momento de plastificação da seção transversal
t_w	espessura da(s) alma(s) do perfil de aço	M_{Sd}	momento fletor solicitante de cálculo
y_t	distância entre os centros geométricos dos tês acima e abaixo da abertura	M_{Rd}	momento fletor resistente de cálculo
		$N_{cT,Rd}$	força axial de compressão resistente de cálculo do tê sobre a abertura
		$N_{cT,Sd}$	força axial de compressão solicitante de cálculo no tê sobre a abertura, decorrente do momento fletor
		$N_{ex'}$	força axial de flambagem elástica em relação ao eixo x'
		Q_s	fator de redução que leva em conta a flambagem local de elementos AL
		Q	fator de redução total associado à flam-

Aberturas em Perfis U, Tubulares e Formados a Frio

	bagem local
R_d	esforço resistente de cálculo (M_{Rd} ou V_{Rd})
S_d	esforço solicitante de cálculo (M_{Sd} ou V_{Sd})
V_{pl}	força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento
V_{Sd}	força cortante solicitante de cálculo
V_{Rd}	força cortante resistente de cálculo
$W_{x,min}$	módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma
α	coeficiente de ajuste relacionado à forma da abertura para cálculo da flecha da viga
δ_0	contraflecha
δ_{max}	flecha máxima no estágio final de carregamento levando-se em conta a contraflecha
δ_{tot}	flecha da viga sem aberturas, causada pela combinação de ações de serviço aplicável, calculada conforme a ABNT NBR 8800:2008
$\delta_{tot,ab}$	flecha da viga com aberturas, causada pela combinação de ações de serviço aplicável
ϕ	diâmetro
λ	índice de esbeltez; parâmetro de esbeltez
λ_0	índice de esbeltez reduzido
χ	fator de redução associado à resistência à compressão

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 8800 : Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
2. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. AISI S100-2007: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, 2007.
3. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE . AISI S100-2007-C : Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, 2007.
4. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS-5950-1 : Structural use of steelwork in buildings. Code practice for design : Part 1 – Rolled and welded sections. United Kingdom, 2000.
5. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CAN/CSA-S16-01: Limit States Design of Steel Structures. Canada, 2003.
6. DARWIN, D. Steel and composite with web openings. Steel Design Guide Series 2. American Institute of Steel Construction: Chicago, 1990.
7. DARWIN, D. ; DONAHEY, R. C. LFRD for Composite Beams with Unreinforced Web Openings. ASCE Journal of Structural Engineering, Reston, v. 114, n.3, p. 535-552, mar. 1988.
8. DARWIN, D. ; LUCAS, W. C. LFRD for Steel and Composite Beams with Web Openings. ASCE Journal of Structural Engineering, Reston, v. 116, n.6, p. 1579-1593, jun. 1990.
9. DJOUDI, M.S.; BAHAI, H. Strain based finite element for the vibration of cylindrical panels with openings. Thin-Walled Structure, v. 42, n.4, p. 575–588, abr. 2004.
10. LAWSON, R. M. Design for openings in the webs of composite beams. The Steel Construction Institute: United Kingdom, 1987.
11. MOEN, C. D.; SCHAFFER, B. W. Experiments on cold-formed steel columns with holes. Thin-Walled Structures, v.46, n.10, p. 1164–1182, out. 2008.
12. RAHIMI, G.H.; ALASHTI, R.A. Lower bound to plastic load of cylinders with opening under combined loading. Thin-Walled Structures, v.45, n.3, p. 363–370, mar. 2007.
13. SILVEIRA, E. G.; VIEIRA, W. B.; VERÍSSIMO, G. S.; et al . Analytical-numerical study to estimate the ultimate strength of alveolar steel beams. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 32, Ouro Preto, 2011. Proceedings... Ouro Preto, 2011.
14. SIVAKUMARAN, K. S.; ZIELONKA, K. M. Web crippling of thin-walled steel members with web openings. Thin-Walled Structures, v. 8, n.4, p. 295–319, 1989
15. SIVAKUMARAN, K. S.; NG, M. Y.; FOX, S. R. Flexural strength of cold-formed steel joists with reinforced web openings. Canadian Journal of Civil Engineering, v.33, n.9, p. 1195–1208, set. 2006
16. VERÍSSIMO, G. S. Análise e Comportamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas com Aberturas na Alma. Belo Horizonte, 1996. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia

de Estruturas - Universidade Federal de Minas Gerais.

17. VERÍSSIMO, G. S; FAKURY, R. H. ; RIBEIRO, J. C. L. Design Aids for Unreinforced Web Openings in Steel and Composite Beams with W-Shapes. AISC Engineering Journal, v.46, Third Quarter, p.163-172, 2006. [Versão em Espanhol: VERÍSSIMO, G. S; FAKURY, R. H. ; RIBEIRO, J. C. L. Ayudas para el diseño de perforaciones de almas no reforzadas en vigas de acero y vigas compuestas con perfiles W. Acero Latinoamericano, n.502, p.36-44, jun.2007 . ISSN 0034-9798, Instituto Latinoamericano del Ferro y el Acero (ILAFSA), Santiago, Chile].
18. VERÍSSIMO, G. S; RIBEIRO, J. C. L. Flecha em vigas com aberturas na alma. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil, 2012 (Relatório Técnico)

Realização:



Centro Brasileiro da Construção em Aço

**Av. Rio Branco, 181 - 28º andar
Rio de Janeiro - RJ**

Tel: (21) 3445-6300

e-mail: cbca@acobrasil.org.br

www.cbca-acobrasil.org.br

Gestor:



ISBN 978-85-89819-31-2



9 788589 819312