

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MAIARA NATIELE ALVES

**INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS GEOMÉTRICOS DAS BARRAS DE AÇO NO
FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

MAIARA NATIELE ALVES

INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS GEOMÉTRICOS DAS BARRAS DE AÇO NO
FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação do Curso de Engenharia Civil do Departamento de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Marina Rocha Pinto Portela Nunes

PATO BRANCO

2021

Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEP. ACADEMICO DE CONSTR. CIVIL DACOC-PB

TERMO DE APROVAÇÃO**Trabalho de Conclusão de Curso - TCC**

INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS GEOMÉTRICOS DAS BARRAS DE AÇO NO FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO


Por


MAIARA NATIELE ALVES


Monografia apresentada às 13 horas 00 min. do dia 12 de março de 2021 como requisito parcial, para conclusão do Curso de ENGENHARIA CIVIL da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.


Banca examinadora:


Prof. Dr. FABIO RODRIGO MANDELLO RODRIGUES	Membro
Prof. Dr. PAULO CESAR VITORIO JUNIOR	Membro
Prof ^ª . Dr ^ª . MARINA ROCHA P. P. NUNES	Orientador
Prof ^ª . Dr ^ª . ELIZÂNGELA MARCELO SILIPRANDI	Professor(a) responsável TCCII

 Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **MARINA ROCHA PINTO PORTELA NUNES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 12/03/2021, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **FABIO RODRIGO MANDELLO RODRIGUES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 16/03/2021, às 09:55, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **PAULO CEZAR VITORIO JUNIOR, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 16/03/2021, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **ELIZANGELA MARCELO SILIPRANDI, PROFESSOR(A) ORIENTADOR(A)**, em (at) 18/03/2021, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 A autenticidade deste documento pode ser conferida no site (The authenticity of this document can be checked on the website) https://sei.utfpr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador (informing the verification code) **1932957** e o código CRC (and the CRC code) **0F183ABD**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente a Deus pela saúde, pelas oportunidades ao longo da vida e pelas pessoas especiais que permitiu que cruzassem meu caminho.

Aos meus pais, Silvia e Vanderlei, pelo apoio em todas as minhas escolhas, pela dedicação, suporte e incentivo ao longo da graduação.

Aos amigos que fizeram parte da minha vida e trajetória acadêmica, pelas contribuições pessoais e profissionais ao longo dos anos.

À minha orientadora, Prof. Dr^a Marina Rocha, por todo auxílio, direcionamentos, correções, ensinamentos e incentivos ao longo da elaboração desse trabalho.

Aos professores, por todo apoio e pelos ensinamentos durante a graduação.

A todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação, muito obrigada.

Tudo é considerado impossível até acontecer.

Nelson Mandela

RESUMO

ALVES, Maiara Natiele. Influência dos aspectos geométricos das barras de aço no fator de concentração de tensão, 2021. 54 pg. **Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil)**, Universidade Federal Tecnológica do Paraná. Departamento Acadêmico de Construção Civil – UTFPR – Pato Branco, 2021.

As barras de aço apresentam nervuras para permitir uma boa aderência entre o aço e o concreto. Entretanto, o raio de transição entre a superfície livre e a nervura transversal das barras é uma zona de descontinuidade geométrica que leva a um aumento das tensões locais e pode afetar o desempenho dessas barras na estrutura. Esse aumento das tensões é quantificado por um fator de concentração de tensão K_t . Neste trabalho, foi elaborado um modelo tridimensional da barra de aço utilizando o software FreeCAD, para realizar um estudo paramétrico e determinar o K_t por meio do Método dos Elementos Finitos. Com isso, foi possível identificar os valores máximos de concentração de tensão, o tamanho das zonas de pico e a influência de cada parâmetro analisado. Constatou-se que o tamanho do raio e da largura da nervura influenciam em mais de 10% nos valores de $K_{t,máx}$ e no tamanho das zonas de pico, já a altura da nervura e o diâmetro da barra praticamente não interferem em $K_{t,máx}$.

Palavras-chaves: Barras de aço. Método dos Elementos Finitos. Fator de concentração de tensão.

ABSTRACT

ALVES, Maiara Natiele. Influence of steel reinforcement bar geometries on stress concentration factor, 2021. 54 pg. Civil Engineering Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree) – Department of Building Construction, Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2021.

Steel reinforcement bars (rebars) have ribs to allow good adhesion between steel and concrete. However, the transition radius between the free surface and the transverse rib of the bars is an area of geometric discontinuity that leads to an increase in local stresses and can affect the performance of these bars in the structure. This increase in stresses is quantified by a stress concentration factor K_t . In this work, a three-dimensional model of the rebar was created using the FreeCAD software, to perform a parametric study and determine the K_t using the Finite Element Method. With that, it was possible to identify the maximum values of stress concentration, the size of the peak zones and the influence of each analyzed parameter. It was found that the size of the radius and the width of the rib influence more than 10% in the values of $K_{t,max}$ and the size of the peak zones, since the height of the rib and the diameter of the bar practically do not interfere in $K_{t,max}$.

Keywords: Steel reinforcement bars (rebars). Finite Element Method. Stress concentration factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de mancal.....	15
Figura 2: Exemplo de prótese odontológica.....	15
Figura 3: Representação gráfica da nervura transversal.....	18
Figura 4: Variações da geometria conforme variações do β	20
Figura 5: Expressão do K_t para chapa infinita com furo central.....	24
Figura 6: Malha de elementos finitos.....	25
Figura 7: Tipos de elementos finitos.....	27
Figura 8: Ilustração da nervura.....	28
Figura 9: Indicação da zona crítica.....	29
Figura 10: Modelo elaborado para análises.....	30
Figura 11: Condições de contorno do modelo.....	30
Figura 12: Malha do modelo.....	31
Figura 13: Zona de concentração de tensão (valores de tensões em MPa).....	35
Figura 14: Convergência da malha para o raio da nervura $r=0,8\text{mm}$	36
Figura 15: Indicação das posições 0 e 1 presentes no eixo x dos gráficos.....	36
Figura 16: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 1 a 8.....	37
Figura 17: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico.....	38
Figura 18: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 9 a 15.....	39
Figura 19: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 16 a 22.....	39
Figura 20: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 9 a 15.....	41
Figura 21: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 16 a 22.....	41
Figura 22: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 23 a 30.....	42
Figura 23: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 31 a 38.....	42
Figura 24: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para modelos de 39 a 43.....	43
Figura 25: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 23 a 30.....	44
Figura 26: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 31 a 38.....	44
Figura 27: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 39 a 43.....	45

Figura 28: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 44 a 49.....	46
Figura 29: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 44 a 49	47
Figura 30: Influência da largura e da altura da nervura no aumento do K_t	48
Figura 31: Identificação da zona de pico dos modelos.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas utilizadas como referência	19
Tabela 2 – Parâmetros geométricos das barras reais.....	22
Tabela 3 – Parâmetros geométricos utilizados no estudo.....	22
Tabela 4 - Parâmetros da geometria original das barras	22
Tabela 5 – Características geométricas de uma barra real.....	32
Tabela 6 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise do raio.....	33
Tabela 7 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise da altura da nervura	33
Tabela 8 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise da largura da nervura	34
Tabela 9 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise do diâmetro.....	34
Tabela 10 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 1 a 8.....	37
Tabela 11 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 9 a 22.....	40
Tabela 12 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 23 a 43.....	43
Tabela 13 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 44 a 49.....	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS – British Standard

CS – Construction Standard

ISO – International Organization for Standardization

NBR – Norma Brasileira

NCh – Norma Chilena

NMX – Norma Mexicana

NTC – Norma Técnica Colombiana

NTE – Norma Técnica Ecuatoriana

NZS – New Zealand Standard

LISTA DE SIMBOLOS

α – ângulo de flanco

β – ângulo entre o eixo da nervura oblíqua e o eixo da barra

ω – largura da base da nervura (mm)

h – altura da nervura (mm)

Φ – diâmetro nominal da barra (mm)

r – raio de transição da nervura transversal (mm)

K_t – fator de concentração de tensão

$K_{t,máx}$ – fator de concentração de tensão máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	18
2.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS BARRAS DE AÇO	18
2.1.1	Ângulo do Flanco (α).....	19
2.1.2	Ângulo entre o eixo da nervura transversal e o eixo longitudinal (β).....	19
2.1.3	Largura da base da nervura (w).....	20
2.1.4	Altura da nervura (h)	21
2.1.5	Parâmetros geométricos encontrados na literatura.....	21
2.2	FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO	23
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	24
3	METODOLOGIA	28
3.1	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	29
3.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIO	37
4.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ALTURA.....	39
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LARGURA.....	42
4.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO.....	45
4.5	ANÁLISE GERAL	47
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

As pontes são uma das estruturas civis mais susceptíveis a danos por fadiga. Nas pontes de concreto armado, as barras de aço são elementos determinantes na sua resistência à fadiga. Nas barras, as trincas por fadiga frequentemente ocorrem no raio de transição entre a superfície livre da barra e a nervura transversal (ROCHA et al., 2016; ZHENG E ABEL, 1999), sem qualquer sinal externo no concreto, exceto fissuração local (TILLY, 1979).

O raio de transição é uma zona de descontinuidade na barra de aço, que altera a distribuição de tensões na região e é denominada como zona de concentração de tensão (BUDYNAS, 2011). É possível quantificar o efeito da geometria da barra nas tensões que atuam nesse raio por meio do fator de concentração de tensão K_t . O valor de K_t fornece uma indicação da severidade da concentração de tensão na zona analisada; e quanto maior o valor de K_t , maior a probabilidade de se iniciar e propagar uma trinca por fadiga nessa zona.

O fator de concentração de tensão pode ser obtido analiticamente. No livro “Peterson's Stress Concentration Factors” (PILKEY, 1997), por exemplo, são apresentadas soluções de K_t para várias geometrias com concentradores de tensões. Entretanto, para geometrias complexas, o cálculo analítico se torna impraticável. Nesses casos, é comum utilizar o Método dos Elementos Finitos (MEF) para obter K_t . Dentre as geometrias complexas pode-se citar as geometrias em 3D como por exemplo, o mancal (LOYOLA, 2017), apresentado na Figura 1, os implantes dentários (LOSADA, 2018) na Figura 2, as barras de aço, objeto de estudo desse trabalho, dentre outros.

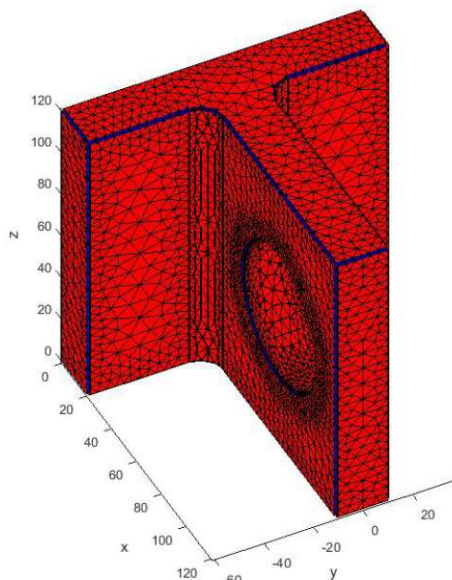


Figura 1: Exemplo de mancal
Fonte: Loyola, 2017.

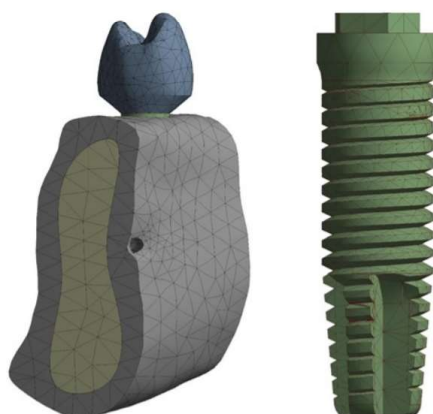


Figura 2: Exemplo de prótese odontológica
Fonte: Losada, 2018.

Existem diversos softwares comerciais de elementos finitos disponíveis, como Ansys, SAP2000, FreeCAD e Abaqus. Neste trabalho será utilizado o FreeCAD, software livre, que ainda está em desenvolvimento, e vem sendo aplicado em diferentes áreas: na biomodelagem virtual para diagnóstico e planejamento cirúrgico (SILVA E ROSADO, 2014), no estudo de pontes metálicas e de concreto armado (OLIVEIRA, 2019; MUNIZ E TRENTIN, 2019), etc.

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo para analisar a influência dos aspectos geométricos das barras de aço (raio, altura e largura da nervura e o diâmetro das barras) no K_t . Para isso, foi elaborado um modelo paramétrico de uma barra de aço utilizando o software FreeCAD. Esse modelo é constituído de um cilindro com

uma nervura. Os valores de K_t foram determinados a partir das tensões obtidas pelo método dos elementos finitos ao longo da nervura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Determinar a influência das características geométricas das barras de aço nos valores de K_t na zona crítica, isto é, no raio de transição ao longo da nervura transversal.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter dados da geometria das nervuras transversais das barras de aço, disponíveis na literatura;
- Realizar um estudo paramétrico com as características geométricas encontradas;
- Determinar a distribuição de K_t ao longo da nervura;
- Analisar as regiões críticas, onde os valores de K_t são máximos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O raio de transição entre a superfície livre da barra de aço e a nervura transversal é a principal zona de concentração de tensão das barras de aço. É nessa região onde as trincas por fadiga frequentemente se iniciam e propagam. A vida à fadiga das barras de aço é, portanto, influenciada pela concentração de tensões nessa zona. K_t é um fator que indica a severidade dessa concentração de tensões e é dependente da geometria da descontinuidade (ROCHA et al., 2016; ZHENG E ABEL, 1999).

Existem, na literatura, trabalhos que analisaram a influência dos parâmetros geométricos das barras em K_t . As análises foram realizadas a partir de modelos bidimensionais (ZHENG E ABEL, 1999) e tridimensionais (ROCHA et al., 2016). A

vantagem do modelo tridimensional neste caso, foi o de permitir uma análise mais ampla, sendo possível determinar K_t ao longo de toda a nervura e analisar as zonas críticas, estudar a influência da inclinação da nervura em relação ao eixo longitudinal e do diâmetro em K_t , como realizado por Rocha et al. (2016). Entretanto, ainda há poucos estudos disponíveis na literatura que abordem uma análise da distribuição das tensões e determinação de K_t , utilizando modelos tridimensionais das barras de aço.

Nesse contexto, este estudo visa analisar a influência das características geométricas das barras de aço nos valores de K_t . Essa análise será realizada por meio de um modelo tridimensional de uma barra de aço, o qual torna viável determinar o valor de K_t ao longo de toda a nervura e analisar as zonas críticas.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico utilizado para a realização desse trabalho, com um breve relato sobre as barras de aço, o fator de concentração de tensão K_t e o método dos elementos finitos.

2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS BARRAS DE AÇO

As barras de aço são classificadas segundo a ABNT NBR 7480 (2007) – “Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação” como produtos que possuem diâmetro nominal de 6,3mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. Conforme a norma brasileira, as barras de aço destinadas ao uso no concreto armado, devem apresentar homogeneidade em relação as suas características geométricas. A norma define que as barras da categoria CA-50 devem possuir nervuras transversais oblíquas e também regulamenta algumas características geométricas dessas nervuras, como o ângulo entre o eixo da nervura transversal oblíqua e o eixo longitudinal e a altura da nervura (ABNT, 2007).

Os parâmetros geométricos que serão utilizados na modelagem das barras nesse trabalho são apresentados na Figura 3, onde Φ é o diâmetro da barra, α representa o ângulo do flanco, β é o ângulo entre o eixo da nervura transversal oblíqua e o eixo longitudinal da barra, ω é a largura da base da nervura, h é a altura da nervura e r é o raio de transição entre a superfície livre da barra e a nervura transversal.

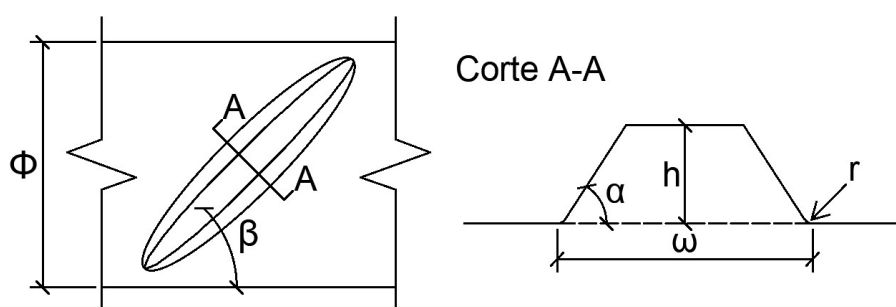


Figura 3: Representação gráfica da nervura transversal
Fonte: Adaptado de Zheng e Abel, 1998.

A ABNT NBR 7480 (2007) regulamenta parâmetros geométricos das nervuras transversais. Esses parâmetros também são regulamentados em outros países, por suas respectivas normas. Nas seções 2.1.1 a 2.1.4, serão apresentadas as características geométricas das barras conforme definições das normas da Tabela 1.

Tabela 1 - Normas utilizadas como referência

País	Norma	Ano
Brasil	ABNT NBR 7480	2007
EUA	ASTM 615	2016
EUA	ASTM 706	2016
Reino Unido	BS 4449	2005
China	CS2	2012
Internacional	ISO 6935	2007
Chile	NCH 204	2006
México	NMX B-457	2013
Colômbia	NTC 2289	2007
Equador	NTE INEN 102	2015
Austrália	NZS 4671	2001

Fonte: Autoria própria, 2021.

2.1.1 Ângulo do Flanco (α)

Segundo a NZS 4671 (2001) – “Steel reinforcing materials”, a inclinação do flanco da nervura α não deve ser inferior a 45° e as nervuras devem ter um raio na transição r para o núcleo do produto. A ISO 6935 (2007) – “Steel for the reinforcement of concrete — Part 2: Ribbed bars”, a BS 4449 (2005) – “Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – Bar, coil and decoiled product – Specification” e a CS2 (2012) – “Steel Reinforcing Bars for the Reinforcement of Concrete” especificam o mesmo valor mínimo, 45° .

2.1.2 Ângulo entre o eixo da nervura transversal e o eixo longitudinal (β)

A ABNT NBR 7480 (2007) define que os eixos das nervuras transversais oblíquas devem formar com direção do eixo da barra, um ângulo β entre 45° e 70° . Segundo a NZS 4671 (2001) e a NTC 2289 (2007) - “Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto”, esse ângulo não deve ser inferior a 45° . Se o ângulo for maior que 45° e menor que 70° , devem estar presentes nervuras longitudinais e/ou pelo menos uma linha de nervuras deve estar na direção inversa às outras linhas (Figura 4).

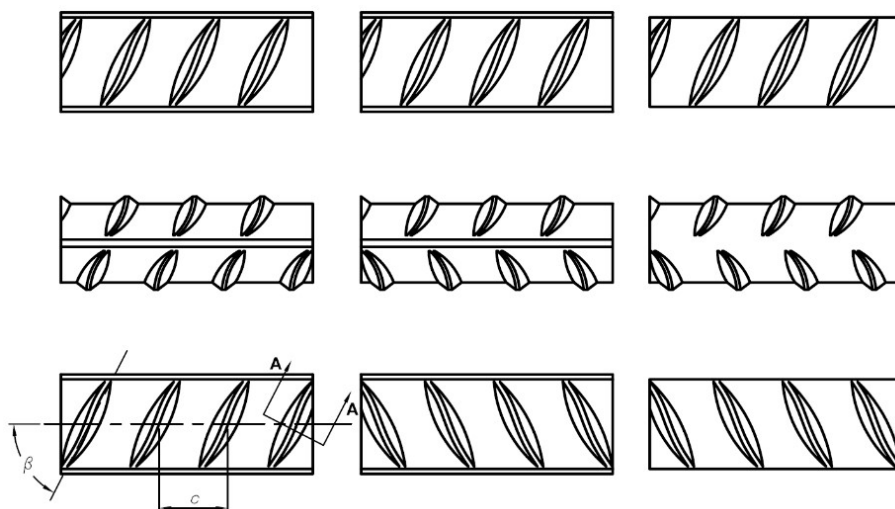


Figura 4: Variações da geometria conforme variações do β
Fonte: NZS 4671, 2001.

Conforme a NCH 204 (2006) – “Acero – Barras laminadas em quente para hormigón armado”, a NTE INEN 102 (2015) – “Varillas corrugadas y lisas de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos”, a ASTM 615 (2016) – “Standard Specification for Deformed and Plain Carbon – Steel Bars for Concrete Reinforcement”, a ASTM 706 (2001) – “Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement” e a NMX-B-457 (2013) – “Industria siderúrgica - varilla corrugada de acero de baja aleación para refuerzo de concreto - especificaciones y métodos de prueba”, se as nervuras transversais estiverem inclinadas em relação ao eixo da barra, o ângulo de inclinação β não deve ser inferior a 45° . Se β estiver entre 45° e 70° , as nervuras devem alternadamente ter inclinação contrária nos dois lados opostos da barra. Se β for maior que 70° , a mudança de inclinação não é necessária.

A ISO 6935 (2007) especifica que o ângulo β deve estar entre 35° e 90° . Já a BS 4449 (2005) e a CS2 (2012) definem que o valor tem que estar entre 35° e 75° .

2.1.3 Largura da base da nervura (ω)

Segundo a NCH 204 (2006), a largura da base ω , no ponto médio deve ser uniforme ao longo da barra e menor ou igual $0,25\Phi$.

2.1.4 Altura da nervura (h)

Segundo a norma brasileira, ABNT NBR 7480 (2007), a altura das nervuras das barras de aço varia conforme o diâmetro Φ . Se o valor do diâmetro for inferior a 10mm, a altura deve ser maior ou igual a $0,02\Phi$ e se o valor for superior ou igual a 10mm, a altura deve ser maior ou igual a $0,04\Phi$.

A altura da nervura segundo a NZS 4176 (2001) deve ser de $0,05\Phi$ a $0,10\Phi$. Já a NCH 204 (2006) e a NMX-B-457 (2013) apresentam os valores variando entre $0,04\Phi$ e $0,05\Phi$. Porém, os valores de diâmetros da NMX-B-457 (2013) não são correspondentes aos diâmetros comerciais brasileiros e não possuem uma relação constante.

A NTC 2289 (2007) também apresenta os valores variando conforme o diâmetro, assim como as relações com as quais os valores foram obtidos, como pode ser observado a seguir:

- $h = 0,04\Phi$ para $\Phi < 15\text{mm}$;
- $h = 0,045\Phi$ para $\Phi = 15\text{mm}$, $\Phi = 16\text{mm}$ e $\Phi = 57\text{mm}$;
- $h = 0,05\Phi$ para $19\text{mm} \leq \Phi \leq 43\text{mm}$.

As normas equatorianas (NTE INEN 102, 2015; NTE INEN 2167, 2015) também apresentam os valores variando conforme o diâmetro, mas esses valores não possuem uma relação constante.

A ASTM 615 (2016) e a ASTM 706 (2001) apresentam os valores de altura variando conforme o diâmetro, com relações que se assemelham as da NTC 2289.

- $h = 0,04\Phi$ para $\Phi < 15\text{mm}$;
- $h = 0,045\Phi$ para $15\text{mm} \leq \Phi \leq 19\text{mm}$ e $\Phi \geq 57\text{mm}$;
- $h = 0,05\Phi$ para $19\text{mm} \leq \Phi \leq 43\text{mm}$.

A altura da nervura segundo a ISO 6935 (2007) deve ser de $0,05\Phi$. A BS 4449 e a CS2 definem que o valor deve estar entre $0,03\Phi$ e $0,15\Phi$.

2.1.5 Parâmetros geométricos encontrados na literatura

Na literatura são fornecidos parâmetros geométricos de barras reais, como o raio, o ângulo de flanco α , a altura h e a largura da nervura ω e o diâmetro da barra Φ . As Tabelas 2 e 3 apresentam os parâmetros geométricos e barras presente em Zheng e Abel (1998) e Zheng e Abel (1999), respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros geométricos das barras reais

Φ (mm)	α (°)	r/h	ω/h
12	36,0	0,90	4,00
16	42,0	1,08	4,20
20	44,3	0,96	4,07
24	46,7	0,15	2,79
28	41,7	0,48	3,40
32	37,5	0,31	3,65
36	39,4	0,30	3,70

Fonte: Adaptado de Zheng e Abel, 1998.

Tabela 3 – Parâmetros geométricos utilizados no estudo

Φ (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	α_1 (°)	α_2 (°)	h (mm)	ω (mm)
12	0,76	1,03	35,6	36,0	0,78	3,09
16	1,10	1,87	40,8	42,0	1,02	4,28
20	1,48	1,19	38,7	44,3	1,23	5,01
24	1,60	0,4	32,6	46,7	2,73	7,62
28	1,11	1,14	41,2	41,7	2,29	7,81
32	1,09	0,78	32,0	37,5	2,52	9,19
36	1,11	0,91	35,2	39,4	3,00	11,1

Fonte: Adaptado de Zheng e Abel, 1999.

No estudo realizado por Rocha et al. (2016), foi analisada a influência da geometria da nervura e do diâmetro da barra de aço nos fatores de concentração de tensão K_t ao longo da nervura transversal. Para o estudo foram utilizados 6 modelos fornecidos pelo fabricante, que estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da geometria original das barras

Φ (mm)	r (mm)	h (mm)	ω/h	α (°)
10	0,2	0,75	2,97	47,5
10	0,4	0,75	2,97	47,5
16	0,2	1,20	2,97	47,5
16	0,4	1,20	2,97	47,5
26	0,2	1,95	2,97	47,5
26	0,4	1,95	2,97	47,5

Fonte: Adaptado de Rocha, 2016.

Dentre os parâmetros geométricos apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, neste trabalho optou-se por desenvolver modelos baseados na geometria de uma barra de aço real, que ainda não foi modelada tridimensionalmente, fornecida em Zheng e Abel (1999).

2.2 FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

No desenvolvimento das equações elementares de tensão, como por exemplo compressão, flexão e torção, é assumido que não há nenhuma irregularidade geométrica no elemento. Qualquer descontinuidade na geometria de uma peça, como furos e entalhes, altera a distribuição de tensões locais. Com isso, as equações elementares de tensão não conseguem mais descrever o estado de tensão nessa região das peças. Essas descontinuidades são denominadas concentradores de tensão (BUDYNAS, 2011).

O efeito da concentração de tensão num componente pode ser quantificado por meio do fator de concentração de tensão K_t . Conforme Dieter (1988), geralmente, K_t é descrito como a razão da tensão máxima pela tensão nominal com base na seção transversal líquida (equação 1). Também, K_t pode ser obtido utilizando o valor de tensão nominal com base na seção transversal bruta, considerando uma região onde não há concentração de tensão (equação 2).

$$K_t = \left(\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{nominal}} \right) \quad \text{(equação 1)}$$

$$K_t = \left(\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{aplicada}} \right) \quad \text{(equação 2)}$$

K_t indica a gravidade da concentração de tensões; depende da geometria da descontinuidade e do tipo de carregamento (PILKEY, 1997). Desta forma, o material específico utilizado não afeta o valor do K_t , e por isso é denominado fator de concentração de tensão teórico (BUDYNAS, 2011).

Para algumas geometrias, existem expressões na literatura que possibilitam determinar K_t analiticamente, como o exemplo apresentado na Figura 5.

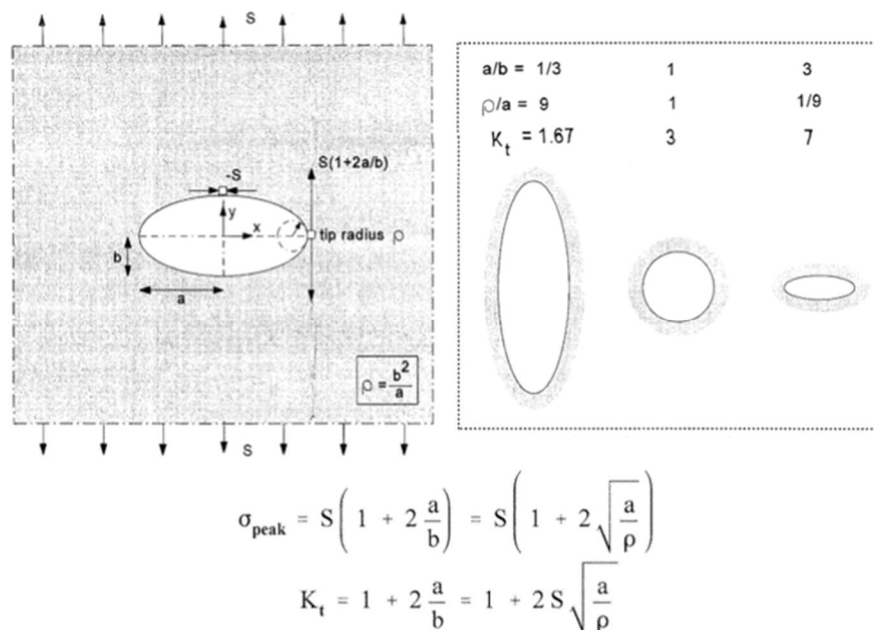


Figura 5: Expressão do K_t para chapa infinita com furo central
Fonte: Schijve, 2001.

Valores de K_t são também fornecidos de forma gráfica no livro “Peterson's Stress Concentration Factors” para diferentes geometrias e condições de carregamento (PILKEY, 1997).

Para geometrias mais complexas em 2D e as geometrias em 3D, a solução analítica é inviável. Nesses casos, o método dos elementos finitos é comumente utilizado para determinação de K_t , como por exemplo, na avaliação de K_t para reparo de tubulação de aço AISI 316L (PACHECO, 2013) e a análise da concentração de tensões em juntas soldadas (LARA, 2016).

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado para analisar diversos tipos de problemas da engenharia tais como: estudo dos deslocamentos e tensões em peças mecânicas, barragens, minas, torres, edifícios e coberturas (MARTHA, 1994).

A teoria do Método dos Elementos Finitos teve seu marco inicial no final do século 18, quando o matemático alemão Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos. Porém, o termo que se utiliza atualmente, Método dos Elementos Finitos, foi citado pela primeira vez em um artigo

publicado na década de 1960 por Ray. W. Clough, professor da Universidade da Califórnia (MORAES, 2015).

Segundo Azevedo (2003), o MEF só tem utilidade prática se houver um computador digital, devido à grande quantidade de cálculos que é necessário realizar. Com isso, fica claro compreender a defasagem com que o MEF chegou aos projetistas estruturais, no final da década de 80 e na década de 90, com o avanço da tecnologia e a explosão do uso de microcomputadores.

Segundo Mirlisenna (2016), o MEF consiste em uma análise onde “a geometria submetida aos carregamentos e restrições é subdividida em pequenas partes, denominadas de elementos, os quais passam a representar o domínio contínuo do problema”. Esses elementos devem manter as propriedades da geometria inicial e podem apresentar diferentes formas, como a triangular e a quadrilateral. Este processo permite resolver problemas mais complexos, pois ao fragmentar uma geometria em problemas mais simples, o computador consegue realizar com eficiência estas tarefas.

Os elementos são conectados entre si por pontos, denominados nós ou pontos nodais. O conjunto de elementos e nós originam a malha, como pode ser visualizado na Figura 6. Em função dessa subdivisão da geometria a solução não é exata, mas aproximada por este método numérico, e a precisão depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha (MIRLISENNA, 2016).

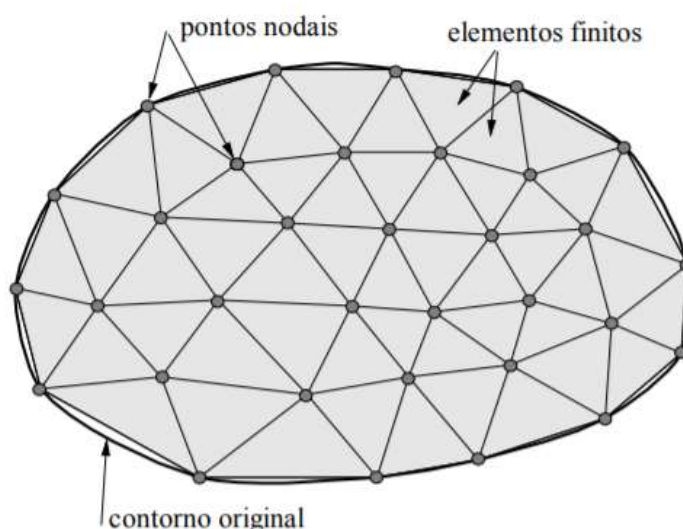


Figura 6: Malha de elementos finitos
Fonte: Souza, 2003.

Teoricamente, quanto mais refinada for a malha, ou seja, quanto menor for o tamanho dos elementos e maior for o número deles, maior tende a ser a precisão nos resultados da análise. Isso acontece porque a malha de elementos se aproxima mais do contorno original, representando-o de forma mais precisa.

Porém, segundo Moraes (2015), quanto maior for a complexidade das geometrias a serem modeladas, bem como quanto maior for o refinamento da malha, maior também será o custo computacional necessário para a resolução do problema, tendo em vista a maior complexidade matemática destes elementos. Portanto, deve-se haver uma análise de convergência durante a modelagem para que seja possível obter uma solução coerente e que possa ser processada pelo computador.

A análise de convergência é um processo onde é realizado o refinamento da malha e/ou a alteração da ordem dos elementos em várias tentativas, até que os resultados das tensões geradas não oscilem de forma significativa.

O procedimento geral do Método dos Elementos Finitos, segundo Neupane (2014), pode ser resumido seguindo etapas, que podem ser classificadas em pré-processamento, solução e pós-processamento.

Neupane (2014) define que o pré-processamento inclui a definição da geometria, das propriedades do material e das condições de contorno para o modelo físico. A estrutura é modelada por meio de um programa CAD (Computer Aided Design) que possui o código MEF ou são programas separados. Em seguida, a estrutura é discretizada através da geração da malha.

Na etapa da solução, as condições de contorno, propriedades do material e carregamento são aplicados. No pós-processamento é realizada a análise dos resultados para interpretar os dados obtidos na etapa de solução (NEUPANE, 2014).

Como mencionado, a geometria submetida aos carregamentos e restrições é subdividida em pequenas partes, denominadas de elementos. Segundo Neupane (2014), um elemento pode ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional podendo ser chamados também de elementos de barras/linha, superfície/área, sólido/volume, respectivamente (Figura 7).

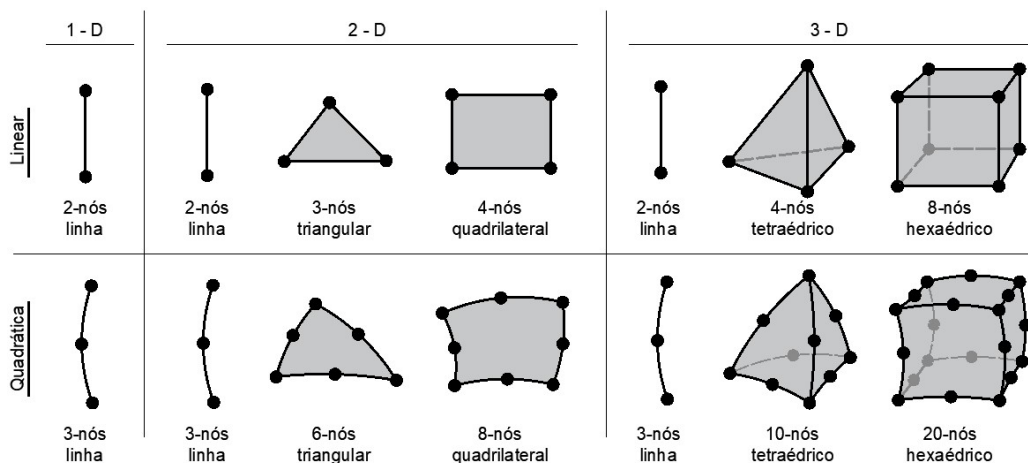


Figura 7: Tipos de elementos finitos
Fonte: Adaptado de Neupane, 2014.

Cada elemento é conectado entre os nós usando funções de forma. Essas funções apresentam uma ordem que define a distribuição do deslocamento entre os elementos. A ordem da função pode ser linear, quadrática, cúbica, e pode chegar até a enésima ordem da função polinomial (NEUPANE, 2014).

3 METODOLOGIA

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo para analisar a influência dos aspectos geométricos das barras de aço nos valores de K_t . Para isso, inicialmente, foi realizado um levantamento dos dados sobre as características geométricas das nervuras transversais, que podem ser encontradas em normas, no mercado e em artigos científicos. Então, foi criado um modelo paramétrico da barra de aço composto de um cilindro com uma nervura utilizando o FreeCAD 0.19.22198. Os parâmetros estudados foram o raio r , a altura h e a largura ω da nervura e o diâmetro da barra Φ indicados na Figura 8.

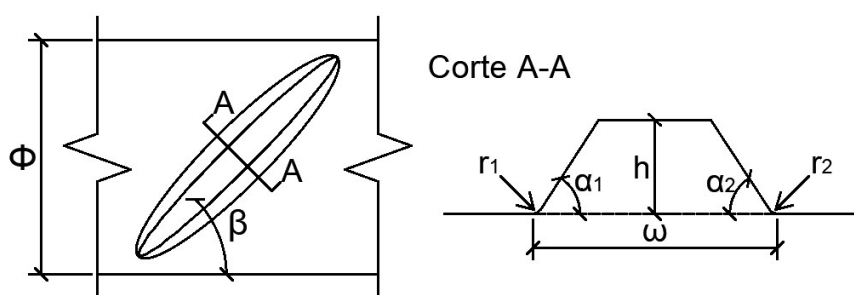


Figura 8: Ilustração da nervura
Fonte: Adaptado de Zheng e Abel, 1998.

O FreeCAD é um software de código aberto, gratuito e que está em desenvolvimento desde 2002 (FreeCAD, 2020). É um modelador 3D paramétrico utilizado para análises estruturais, que foi projetado para diversas finalidades, como design de produto, engenharia mecânica e arquitetura (FreeCAD, 2020).

O FreeCAD, como diversos aplicativos de design modernos, por exemplo o REVIT ou CATIA, baseia-se no conceito de Workbench (Bancada de trabalho). Uma bancada de trabalho pode ser considerada como um conjunto de ferramentas especialmente agrupadas para realizar uma determinada tarefa.

Neste trabalho são utilizadas principalmente duas bancadas: uma para modelizar a geometria exata utilizando NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline) e uma segunda para fazer a análise de elementos finitos. Neste último, a bancada para fazer a análise de elementos finitos utiliza alguns softwares externos para gerar a malha e resolver o sistema de equações. Estes softwares são o Gmsh e o Calculix, respectivamente (FEM Calculix, 2020).

A análise das tensões, obtidas pelo MEF, foi realizada ao longo da borda 1 da nervura transversal, conforme indicado na Figura 9 e os valores de K_t foram determinados nessa região.

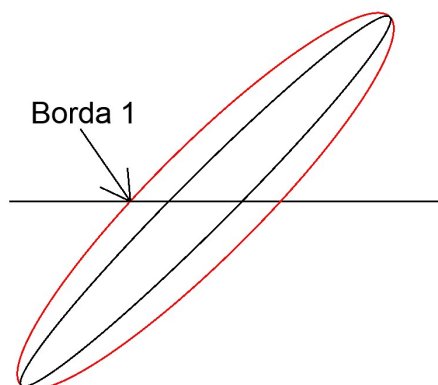


Figura 9: Indicação da zona crítica
Fonte: Autoria própria, 2021.

3.1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Existem algumas possibilidades de representações geométricas como Curva de Bézier, B-splines e NURBS (GONÇALVES, 2016). As curvas Bézier e B-spline são curvas paramétricas polinomiais e não podem representar de forma precisa curvas simples como o círculo, que é a geometria base da barra de aço (MINETTO, 2003).

A mais amplamente utilizada em projetos de engenharia são as NURBS (Curvas B-Splines racionais não uniformes). Além de existir vários algoritmos numéricos para geração de objetos NURBS, este é conveniente para representação de forma exata de todas as seções cônicas, e também para modelagem de superfícies de forma livre (GONÇALVES, 2016), como cascos de navio e carenagens de automóveis e aeronaves por exemplo, as quais são de difícil equacionamento matemático, pois não podem ser representadas com boa fidelidade por elementos geométricos simples (PINTO, 2010).

O FreeCAD, software utilizado neste trabalho, fornece ferramentas para criar superfícies utilizando NURBS. Como a geometria da nervura é composta de diferentes cônicas, o NURBS é utilizado para sua representação. E então, a nervura é unida a um cilindro para modelizar a barra, como pode ser observado na Figura 10. O comprimento do cilindro adotado foi 40mm.

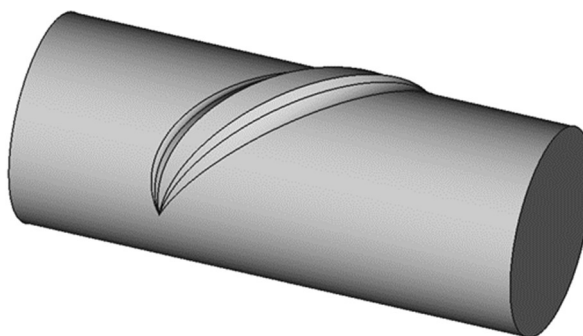


Figura 10: Modelo elaborado para análises
Fonte: Autoria própria, 2021.

As propriedades mecânicas do material foram consideradas segundo a NBR 8800 (2008): Módulo de Young (E) de 200GPa e o Coeficiente de Poisson é 0,30.

As condições de contorno consideradas para os modelos podem ser observadas na Figura 11. Foi definida uma restrição de deslocamento na direção x na face esquerda do cilindro e uma restrição de deslocamento nas três direções em um ponto da face esquerda, localizado na parte central da borda inferior. Foi aplicada uma tensão uniformemente distribuída de 1MPa na face direita.

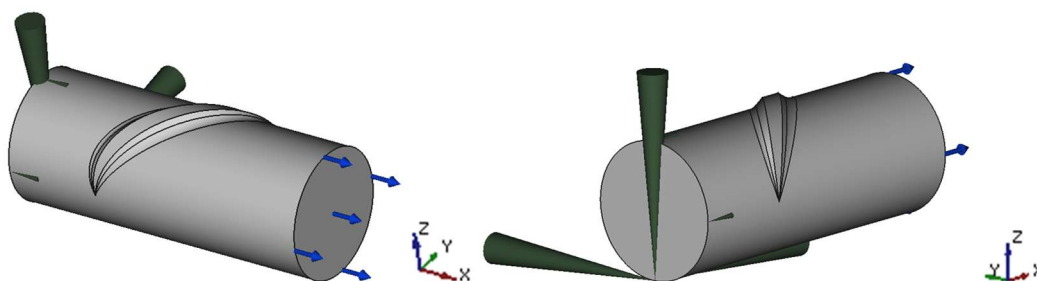


Figura 11: Condições de contorno do modelo
Fonte: Autoria própria, 2021.

A malha dos modelos foi gerada utilizando o Gmsh. Para a malha, na Figura 12, foram utilizados elementos de segunda ordem tetraédricos. Segundo Norton (2013), os elementos de segunda ordem têm melhor capacidade de representar os contornos de geometrias complexas.

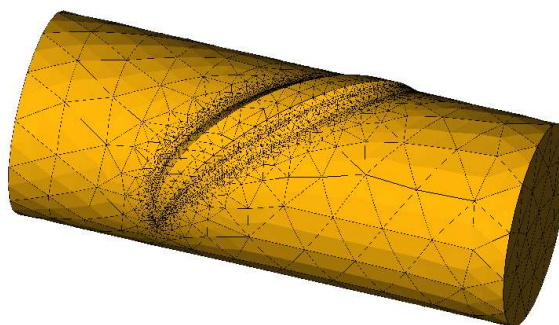


Figura 12: Malha do modelo
Fonte: Autoria própria, 2020.

Os cálculos foram realizados através da ferramenta Calculix. A convergência da malha foi verificada para se obter uma densidade de malha otimizada. Essa verificação é apresentada na seção 4 deste trabalho.

Os valores de K_t foram determinados por meio das tensões obtidas ao longo das nervuras. K_t foi calculado utilizando-se a eq. 2, onde σ_{max} foi admitida como a maior tensão principal na direção x , mesma direção do carregamento aplicado, dividido pela tensão aplicada.

Com os fatores de concentração de tensão determinados foi realizada a comparação dos valores máximos de K_t entre os modelos para verificar a influência dos parâmetros geométricos como o raio, a altura e a largura da nervura e o diâmetro do cilindro. Além disso foram identificadas as zonas onde os valores de K_t são máximos.

3.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Para este trabalho, foi analisada a influência de 4 parâmetros geométricos: raio, altura e largura da nervura e diâmetro da barra. Os valores utilizados neste trabalho para os parâmetros geométricos da nervura baseiam-se na geometria de uma barra de aço real fornecida em Zheng e Abel (1999). Esses valores são apresentados na Tabela 5.

Como não é fornecida a inclinação das nervuras em relação ao eixo longitudinal β em Zheng e Abel (1999), foi adotado o valor mínimo definido pela NBR 7480 (2007) de 45° para todos os modelos.

Tabela 5 – Características geométricas de uma barra real

Φ (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	α_1 (°)	α_2 (°)	h (mm)	ω (mm)
16	1,10	1,87	40,8	42,0	1,02	4,28

Fonte: Adaptado de Zheng e Abel, 1999.

A geometria original do artigo de Zheng e Abel (1999), apresenta dois valores de raio r e dois valores de ângulo de flanco α , conforme apresentado na Tabela 5. Para obter uma nervura simétrica, o valor de α_1 e α_2 foi adotado igual a 42° para todos os modelos. À exceção dos modelos onde a influência do raio foi analisada, os raios r_1 e r_2 foram considerados igual a 1mm, o que permitiu a modelagem de alturas menores.

A norma brasileira, ABNT NBR 7480 (2007), não define um valor limite para a largura de base da nervura, e nem sua relação com a altura (a única definição é que a altura mínima das nervuras deve ser 4% do valor do diâmetro). Neste trabalho, nenhum valor inferior ao mínimo foi considerado, para os modelos com diâmetro igual a 16mm, a altura mínima é de 0,64mm. Ao variar o diâmetro, foi considerada uma altura de 1mm, que é o valor mínimo para $\Phi=25$ mm, maior diâmetro analisado.

Para analisar a influência do raio, os valores variaram conforme apresentado na Tabela 6, sendo $r=0,8$ mm o menor valor viável para realizar a análise de convergência, devido ao custo computacional.

Para analisar a influência da altura da nervura, os valores da altura variaram conforme apresentado na Tabela 7, de 0,64mm a 1,8mm, sendo o valor mínimo apresentado pela ABNT NBR 7480 (2007) e valor máximo possível devido os demais parâmetros geométricos, respectivamente. A largura da nervura foi mantida em 4,8mm nos modelos 9 a 15 e em 6mm nos modelos 16 a 20, sendo o primeiro da geometria de Zheng e Abel (1999) e o segundo um valor aleatório adotado para analisar a influência.

Para analisar a influência da largura da nervura, os valores da largura variaram conforme apresentado na Tabela 8, de 2,5mm até 6mm, sendo o primeiro o valor mínimo para a altura da geometria de Zheng e Abel (1999) e o segundo um valor aleatório adotado. Adotou-se 3 alturas diferentes:

- 0,64mm: valor mínimo da ABNT NBR 7480 (2007)
- 1,02mm: valor encontrado na geometria de Zheng e Abel (1999)

• 1,73mm: valor obtido através da relação apresentada no artigo de Zheng e Abel (1998), $r/h=1,08$, adotando o raio de 1,87mm (Zheng e Abel, 1999). Para esta altura, o valor mínimo da altura devido os demais parâmetros geométricos é 4mm.

Na análise do diâmetro, os valores adotados variaram de 10 a 25mm, com os demais parâmetros geométricos conforme fornecidos na Tabela 9.

Tabela 6 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise do raio

Modelos	Φ (mm)	r (mm)	h (mm)	ω (mm)
1	16	0,8	1,02	4,28
2	16	1,0	1,02	4,28
3	16	1,2	1,02	4,28
4	16	1,4	1,02	4,28
5	16	1,6	1,02	4,28
6	16	1,8	1,02	4,28
7	16	2,0	1,02	4,28
8	16	2,2	1,02	4,28

Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 7 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise da altura da nervura

Modelos	Φ (mm)	h (mm)	ω (mm)
9	16	0,64	4,28
10	16	0,8	4,28
11	16	1,0	4,28
12	16	1,2	4,28
13	16	1,4	4,28
14	16	1,6	4,28
15	16	1,8	4,28
16	16	0,64	6
17	16	0,8	6
18	16	1,0	6
19	16	1,2	6
20	16	1,4	6
21	16	1,6	6
22	16	1,8	6

Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 8 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise da largura da nervura

Modelos	Φ (mm)	h (mm)	ω (mm)
23	16	0,64	2,5
24	16	0,64	3
25	16	0,64	3,5
26	16	0,64	4
27	16	0,64	4,5
28	16	0,64	5
29	16	0,64	5,5
30	16	0,64	6
31	16	1,02	2,5
32	16	1,02	3
33	16	1,02	3,5
34	16	1,02	4
35	16	1,02	4,5
36	16	1,02	5
37	16	1,02	5,5
38	16	1,02	6
39	16	1,73	4
40	16	1,73	4,5
41	16	1,73	5
42	16	1,73	5,5
43	16	1,73	6

Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 9 – Parâmetros geométricos dos modelos para análise do diâmetro

Modelos	Φ (mm)	h (mm)	ω (mm)
44	10	1,02	4,28
45	12,5	1,02	4,28
46	16	1,02	4,28
47	20	1,02	4,28
48	22	1,02	4,28
49	25	1,02	4,28

Fonte: Autoria própria, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser observado na Figura 13, a zona de transição entre a superfície livre do cilindro e o raio da nervura é uma região de concentração de tensões. Os valores de K_t , determinados neste trabalho, foram obtidos nessa zona, ao longo da borda 1 indicada na Figura 13.

Neste trabalho foi analisada a influência do raio, da largura e da altura da nervura e do diâmetro do cilindro nos valores de K_t . Foram determinadas as regiões com K_t igual ou superior a 95% do $K_{t,máx}$, as chamadas zonas de pico. Essa porcentagem foi a mesma adotada por Rocha et. al (2016). O $K_{t,máx}$ corresponde ao máximo valor obtido nas curvas geradas de K_t .

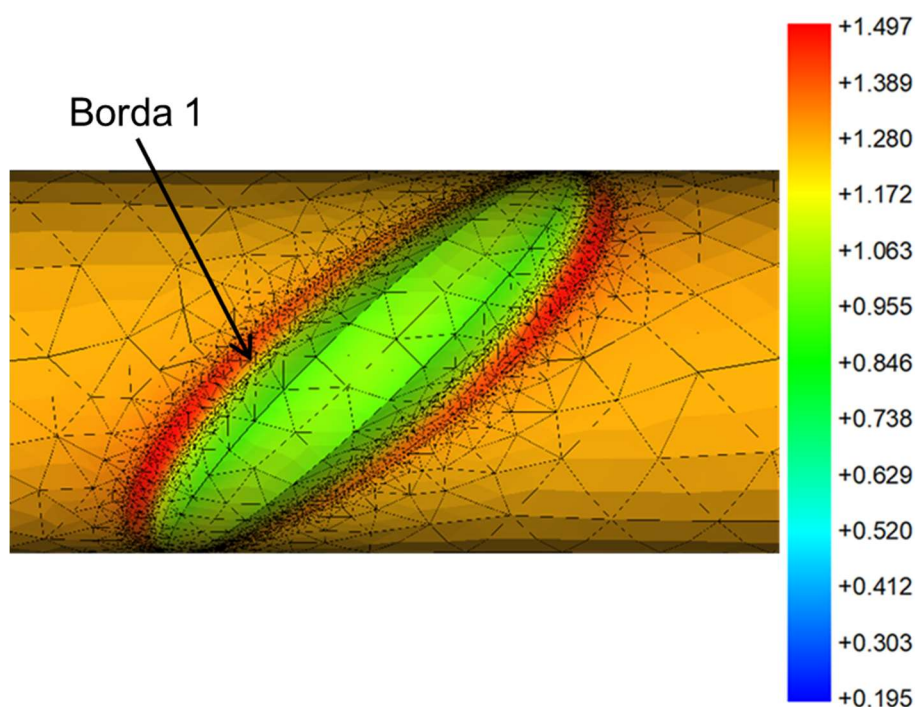


Figura 13: Zona de concentração de tensão (valores de tensões em MPa)
Fonte: Autoria própria, 2021.

A convergência da malha foi verificada ao longo da borda 1 para os modelos 1 e 2, indicados na Tabela 6. Esses modelos apresentam os menores valores de raio, $r=0,8\text{mm}$ e $r=1,0\text{mm}$, respectivamente, sendo este último raio também utilizado nos demais modelos 9 a 49.

Na Figura 14, são fornecidas as curvas de K_t obtidas na borda 1, para o modelo 1. O eixo das ordenadas representa os valores de K_t e o eixo das abscissas

representa a distância normalizada da borda 1, sendo 0 o ponto inferior e 1 o ponto superior como indicado na Figura 15. Os valores da legenda na Figura 14 indicam o tamanho dos elementos da malha utilizada para a análise de convergência. As curvas de K_t convergiram para um tamanho do elemento menor ou igual a 0,2mm. O tamanho dos elementos de 0,2mm foi então adotado para todos os modelos.

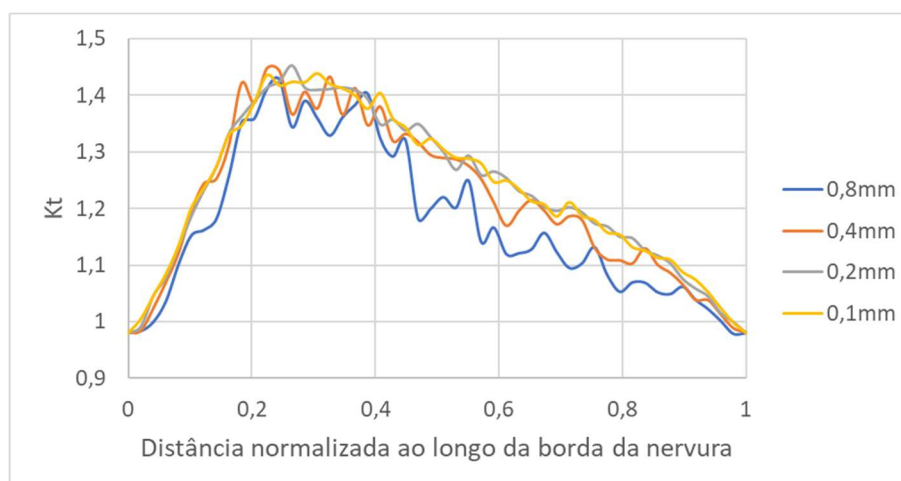


Figura 14: Convergência da malha para o raio da nervura $r=0,8\text{mm}$
Fonte: Autoria própria, 2021.

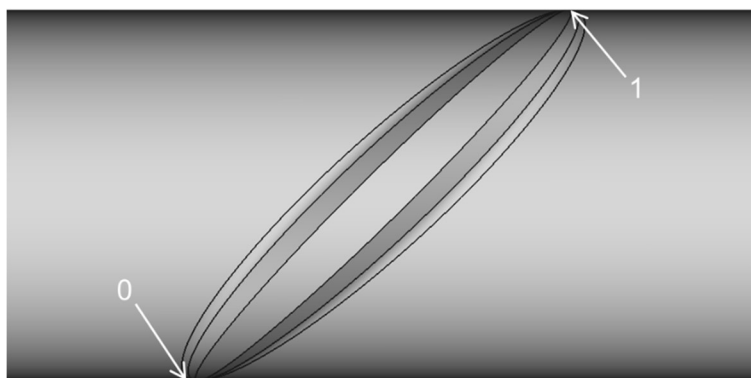


Figura 15: Indicação das posições 0 e 1 presentes no eixo x dos gráficos
Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 14 pode-se observar que, próximos aos pontos 0 e 1 da borda 1, não há concentração de tensão. Esse comportamento, também observado em Rocha et. al (2016), foi semelhante em todos os modelos analisados neste trabalho.

4.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAI0

As curvas de K_t obtidas ao longo da borda 1 para os raios variando de 0,8mm a 2,2mm são fornecidos na Figura 16.

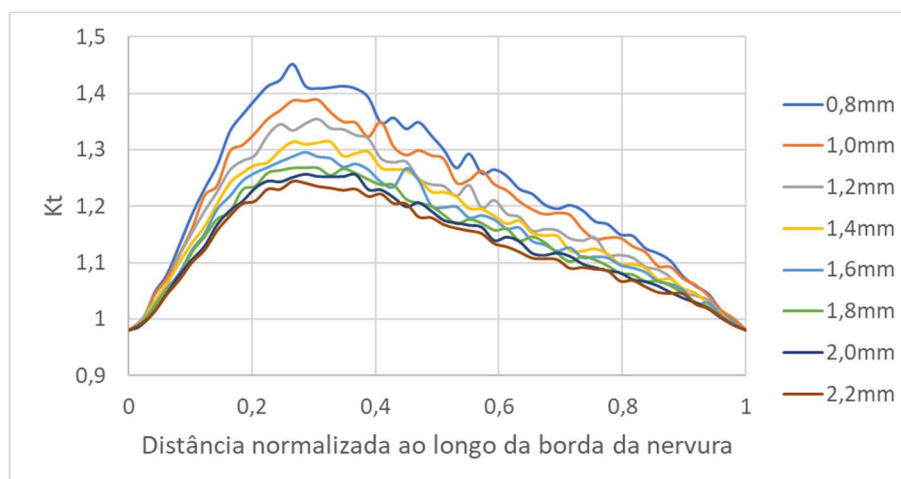


Figura 16: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 1 a 8
Fonte: Autoria própria, 2021.

Os valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 1 a 8 e sua posição ao longo da borda 1 estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 1 a 8

Modelos	r (mm)	$K_{t,máx}$	Posição de $K_{t,máx}$
1	0,8	1,45	0,27
2	1,0	1,39	0,31
3	1,2	1,35	0,31
4	1,4	1,31	0,33
5	1,6	1,30	0,29
6	1,8	1,27	0,29
7	2,0	1,26	0,29
8	2,2	1,24	0,27

Fonte: Autoria própria, 2021.

Observando os valores fornecidos na Tabela 10, verificou-se que o aumento do raio resultou na redução dos valores de $K_{t,máx}$, como também obtido por Rocha et. al (2016). Esses valores tiveram uma redução de 14,3% com o aumento do raio de 0,8mm a 2,2mm. Já a posição do $K_{t,máx}$ entre os modelos foi pouco influenciada pelo aumento do raio e se manteve praticamente no mesmo ponto.

Em Rocha et. al (2016), observa-se maiores valores de $K_{t,máx}$ em comparação aos obtidos nesse trabalho. Isso pode ter acontecido porque os valores de raio

considerados em Rocha et. al (2016) foram menores, de 0,2mm e 0,4mm. O raio de 0,2mm, por exemplo, levou a valores de $K_{t,máx}$ igual a 2,09 para barra de 16mm de diâmetro, 44% maior do que o obtido com o menor raio analisado nesse trabalho.

Em Rocha et. al (2016), há um modelo semelhante ao modelo 1 indicado na Tabela 10 (mesmo raio e diâmetro e pouca diferença nos demais parâmetros), que apresenta um $K_{t,máx}=1,53$, apresentando uma diferença de apenas 5%. A posição do $K_{t,máx}$ e a localização da zona de pico obtida por Rocha et. al (2016) são semelhantes as identificadas na Figura 17 para r igual a 0,8mm.

Na Figura 17 estão indicadas as posições de $K_{t,máx}$ para cada modelo e representadas as zonas ao longo da borda 1

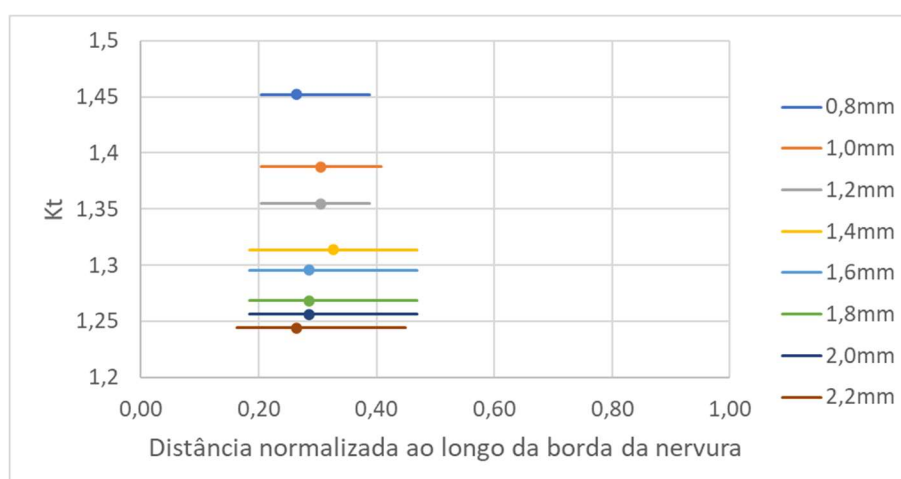


Figura 17: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico
Fonte: Autoria própria, 2021.

Como pode ser observado na Figura 17, o tamanho das zonas de pico entre os modelos com raio de 0,8mm a 1,2mm, se manteve praticamente constante e ocupou cerca de 20% da borda 1. Ao observar os demais modelos, com raio de 1,4mm a 2,2mm, também há o mesmo comportamento, porém, ocupando 30% da borda 1. A influência do aumento do raio no tamanho das zonas de pico foi mais perceptível na variação do modelos com raio de 1,2mm para o modelo com raio de 1,4mm, onde o aumento foi de 50%.

4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ALTURA

As curvas de K_t obtidas ao longo da borda 1 para os modelos 9 a 15 e os modelos 16 a 22 são fornecidos nas Figura 18 e 19, respectivamente.

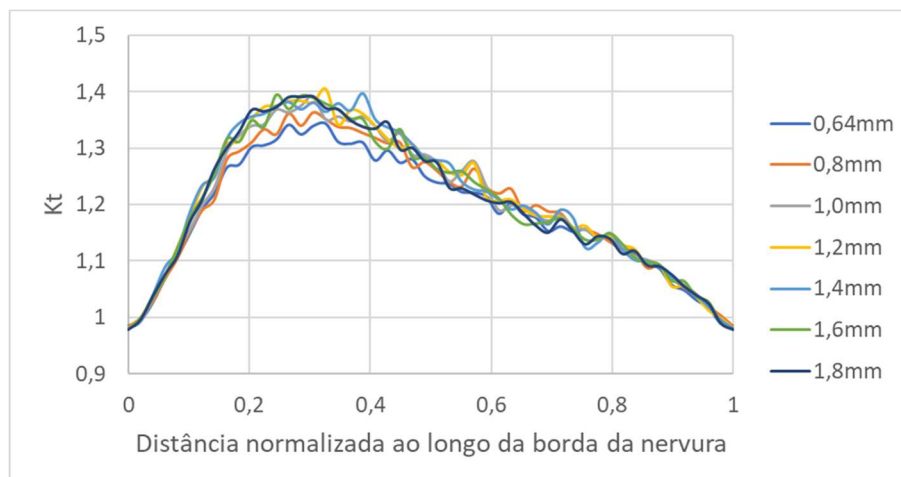


Figura 18: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 9 a 15
Fonte: Autoria própria, 2021.

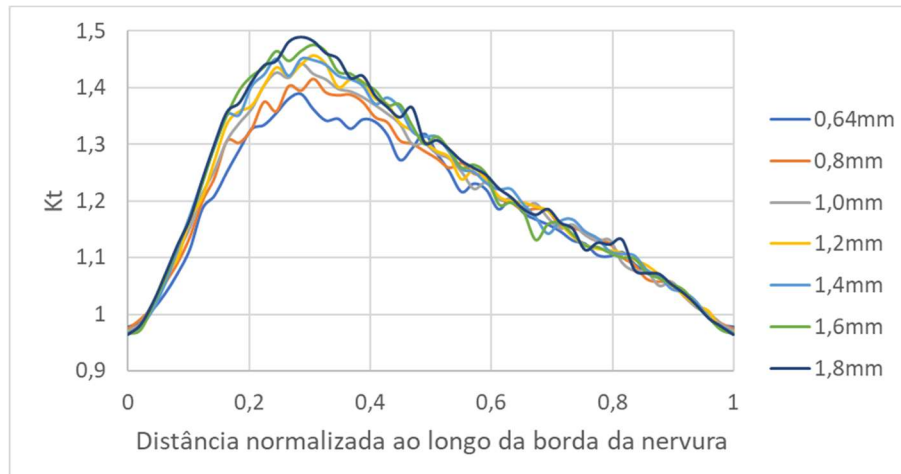


Figura 19: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 16 a 22
Fonte: Autoria própria, 2021.

Os valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 9 a 22 e sua posição ao longo da borda 1 estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 9 a 22

Modelos	h (mm)	ω (mm)	$K_{t,máx}$	Posição de $K_{t,máx}$
9	0,64	4,28	1,34	0,33
10	0,8	4,28	1,36	0,31
11	1,0	4,28	1,39	0,31
12	1,2	4,28	1,40	0,33
13	1,4	4,28	1,40	0,39
14	1,6	4,28	1,40	0,24
15	1,8	4,28	1,39	0,31
16	0,64	6	1,39	0,29
17	0,8	6	1,42	0,31
18	1,0	6	1,44	0,29
19	1,2	6	1,46	0,31
20	1,4	6	1,45	0,24
21	1,6	6	1,48	0,31
22	1,8	6	1,49	0,29

Fonte: Autoria própria, 2021.

Para os modelos 9 a 15, o aumento da altura de 0,64 a 1,2mm resultou em um pequeno aumento nos valores de $K_{t,máx}$, mas entre 1,4 a 1,8mm o valor de $K_{t,máx}$ se manteve constante. Já para os modelos 16 a 22, o aumento da altura da nervura resultou no aumento dos valores de $K_{t,máx}$ de até 7,23%, não influenciando de forma tão significativa. A posição do $K_{t,máx}$ entre os modelos teve pouca influência e se manteve praticamente no mesmo ponto.

A influência da altura no K_t obtido por Rocha et. al (2016) foi mais significativa, de 14 a 21%. Vale ressaltar que os valores de raio considerados nos modelos de Rocha et. al (2016), são bem menores que os presentes nos modelos 9 a 22, sendo possível, neste caso, que esses valores de raio tenham influenciado de forma mais significativa nos resultados de Rocha et. al (2016) que os observados neste trabalho (segundo a autora, o raio e a altura são os principais parâmetros que influenciam $K_{t,máx}$). Mais análises são necessárias utilizando, por exemplo, menores valores de raio para as geometrias propostas nos modelos aqui estudados.

Em Rocha et. al (2016), há dois modelos semelhantes aos modelos 12 e 22 indicados na Tabela 11 (mesmo raio e diâmetro e pouca diferença nos demais parâmetros), que apresentam um $K_{t,máx}=1,53$ e 1,99, respectivamente. A maior diferença no valor de $K_{t,máx}$, é de aproximadamente 25%, encontrada para o modelo 22 deste trabalho. Isso pode ter acontecido porque o modelo de Rocha et. al (2016) possui uma relação ω/h menor.

Nas Figuras 20 e 21, estão indicadas as posições dos valores de $K_{t,máx}$ para cada modelo e representadas as zonas de pico ao longo da borda 1.

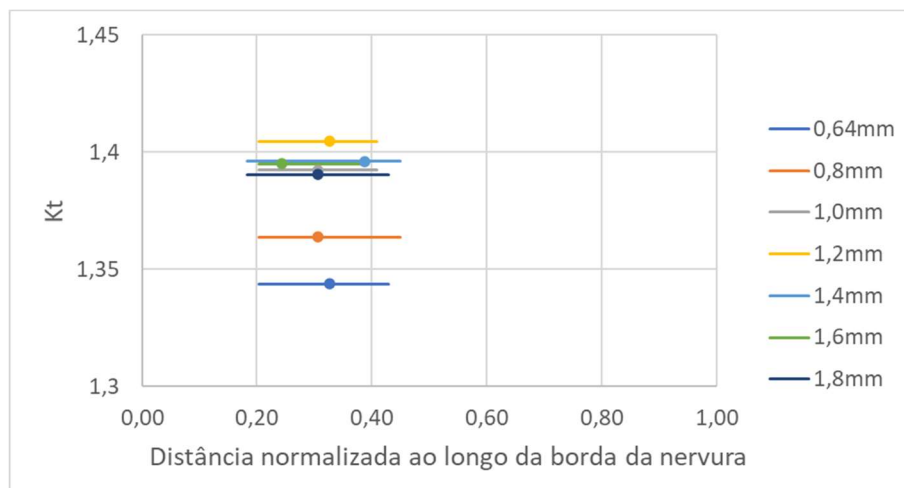


Figura 20: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 9 a 15
Fonte: Autoria própria, 2021.

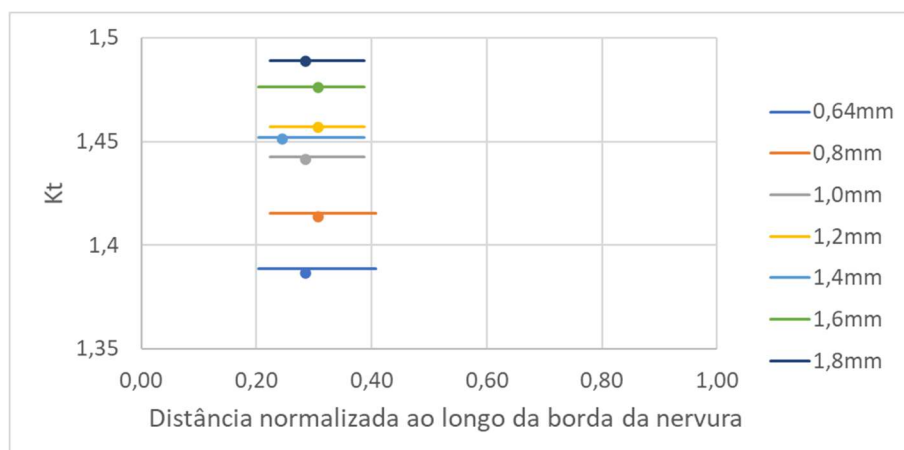


Figura 21: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 16 a 22
Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 20 observa-se que o aumento da altura leva a uma pequena variação no tamanho das zonas de pico, as quais ocupam de 22 a 28% do tamanho da borda 1. Esse comportamento é semelhante ao observado na Figura 21, onde as zonas de pico ocupam de 18 a 22%. Entretanto, comparando-se as Figuras 20 e 21, pode-se perceber que o aumento da largura reduziu as zonas de pico em aproximadamente 30%

4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LARGURA

As curvas de K_t obtidas ao longo da borda 1 para os modelos 23 a 43 com larguras variando de 2,5mm a 6mm são fornecidas nas Figuras 22 a 24, para $h=0,64\text{mm}$, $h=1,02\text{mm}$ e $h=1,73\text{mm}$, respectivamente.

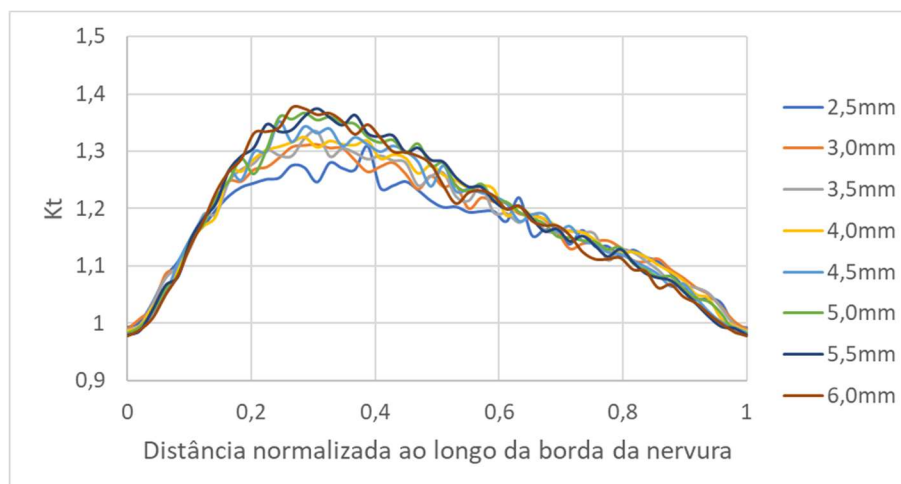


Figura 22: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 23 a 30
Fonte: Autoria própria, 2021.

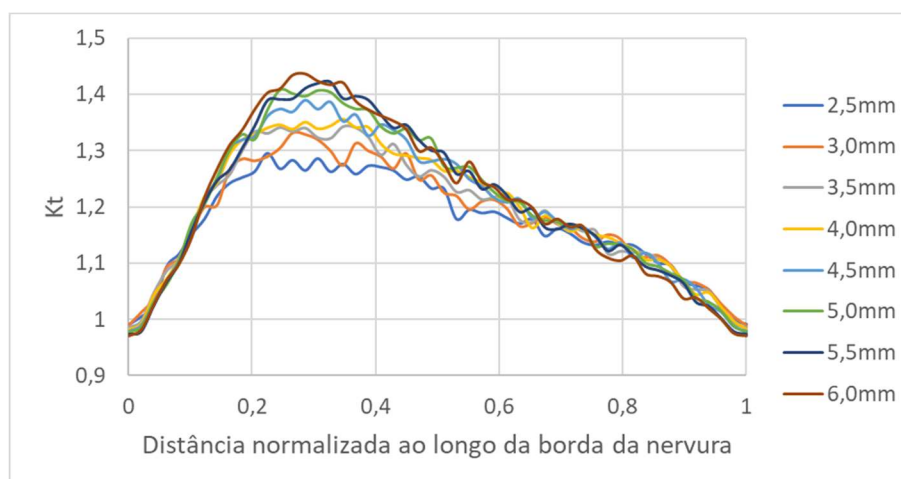


Figura 23: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 31 a 38
Fonte: Autoria própria, 2021.

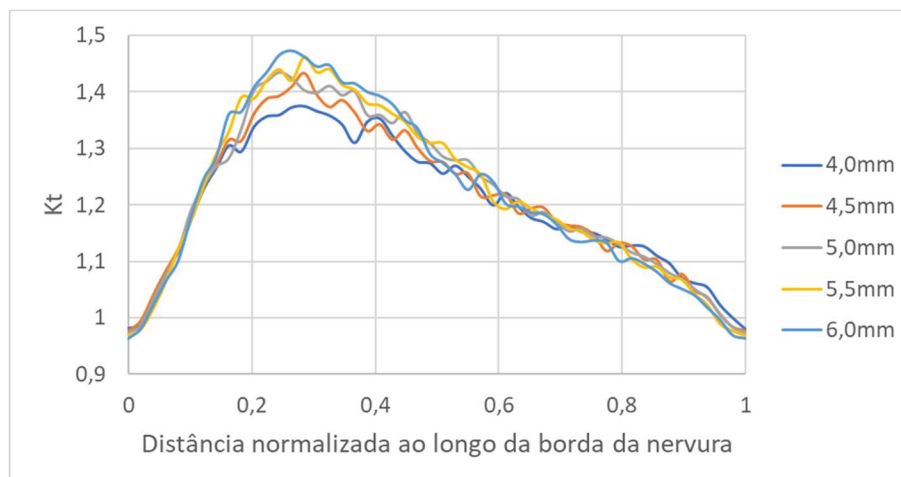


Figura 24: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para modelos de 39 a 43
Fonte: Autoria própria, 2021.

Os valores de $K_{t,máx}$ e sua posição ao longo da borda 1 estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 23 a 43

Modelos	h (mm)	ω (mm)	$K_{t,máx}$	Posição de $K_{t,máx}$
23	0,64	2,5	1,31	0,39
24	0,64	3	1,31	0,31
25	0,64	3,5	1,33	0,31
26	0,64	4	1,32	0,29
27	0,64	4,5	1,35	0,24
28	0,64	5	1,37	0,29
29	0,64	5,5	1,37	0,31
30	0,64	6	1,38	0,27
31	1,02	2,5	1,30	0,22
32	1,02	3	1,33	0,27
33	1,02	3,5	1,34	0,35
34	1,02	4	1,36	0,35
35	1,02	4,5	1,39	0,29
36	1,02	5	1,41	0,24
37	1,02	5,5	1,42	0,33
38	1,02	6	1,44	0,29
39	1,73	4	1,37	0,29
40	1,73	4,5	1,43	0,29
41	1,73	5	1,43	0,24
42	1,73	5,5	1,46	0,29
43	1,73	6	1,47	0,27

Fonte: Autoria própria, 2021.

O aumento da largura da nervura resultou no aumento dos valores máximos de K_t , como também obtido por Zheng e Abel (1999). Os valores máximos de K_t tiveram um aumento de 5,11% para $h=0,64$ mm e 10,92% para $h=1,02$ mm com o aumento da largura de 2,5mm a 6mm. Para $h=1,73$ mm, o aumento foi de 7,19% com

o aumento da largura de 4mm para 6mm. Com isso é possível concluir que a influência da largura é maior quando a altura da nervura é maior.

Nas Figuras 25 a 27, estão indicadas as posições dos valores de $K_{t,max}$ para cada modelo e representadas as zonas de pico da borda 1.

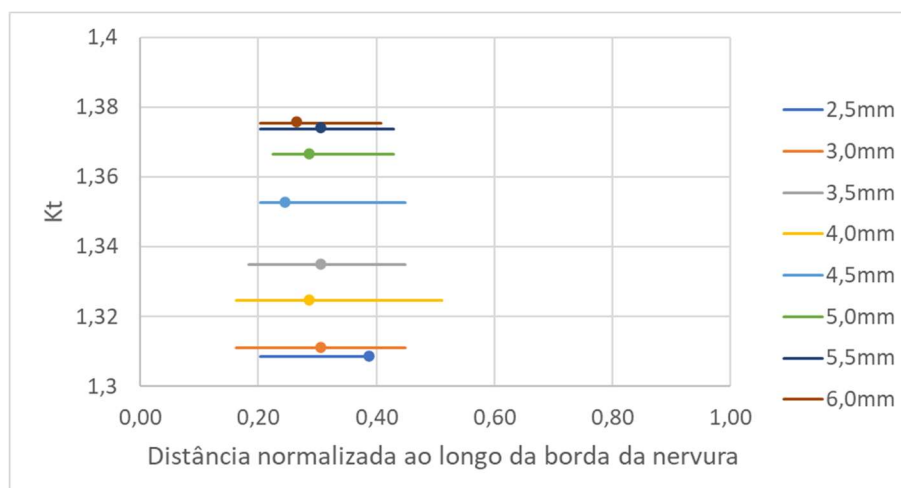


Figura 25: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 23 a 30
Fonte: Autoria própria, 2021.

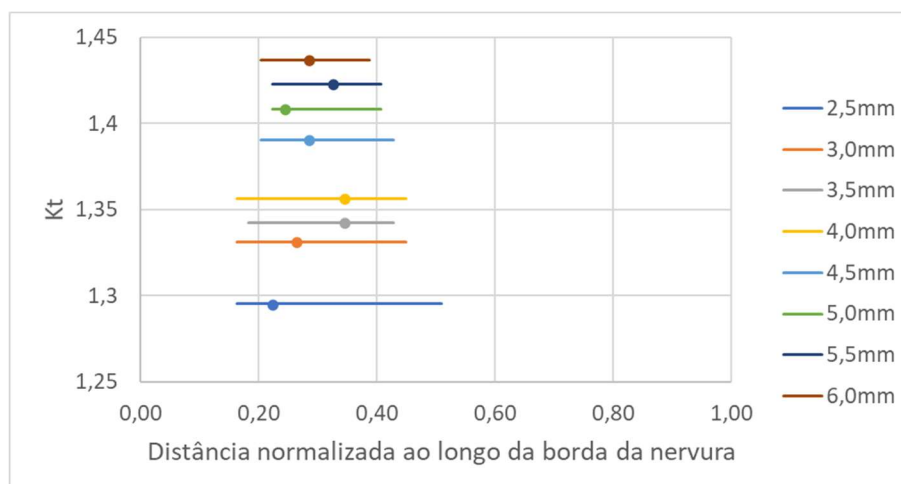


Figura 26: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 31 a 38
Fonte: Autoria própria, 2021.

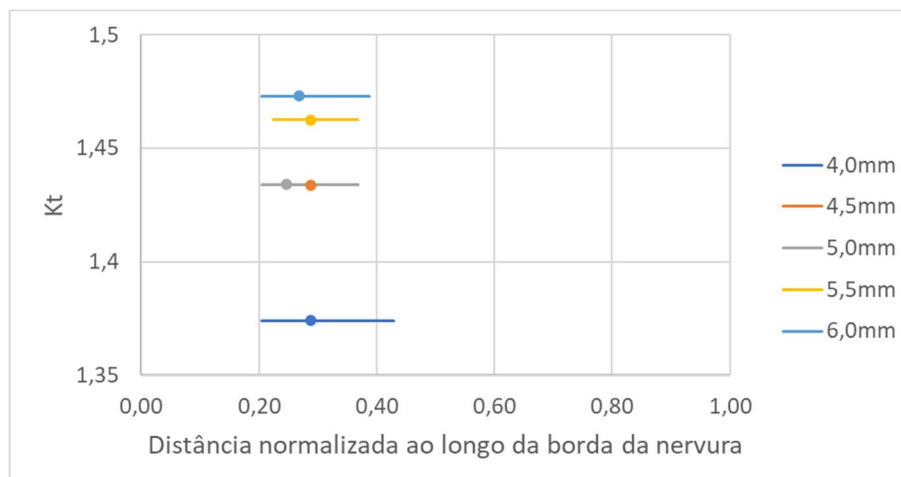


Figura 27: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 39 a 43
Fonte: Autoria própria, 2021.

Em função da variação dos resultados apresentados pelas Figuras 25, 26 e 27 não é possível obter uma conclusão precisa sobre a influência da variação da largura no tamanho da zona de pico. A variação do tamanho da zona de pico foi de 22 a 36% do tamanho da borda 1 para $h=0,64\text{mm}$, 20 a 36% para $h=1,02\text{mm}$ e 16 a 24% para $h=1,73\text{mm}$.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO

As curvas de K_t obtidas ao longo das nervuras para os modelos 44 a 49, com diâmetros variando de 10mm a 25mm são fornecidas na Figura 28. Como a norma brasileira define que a altura mínima é 4% do diâmetro, nesse trabalho foi adotada a altura de 1mm, que corresponde a 4% da barra de 25mm, que é o maior diâmetro analisado. Desta forma, foi possível manter a mesma altura em todos os modelos.

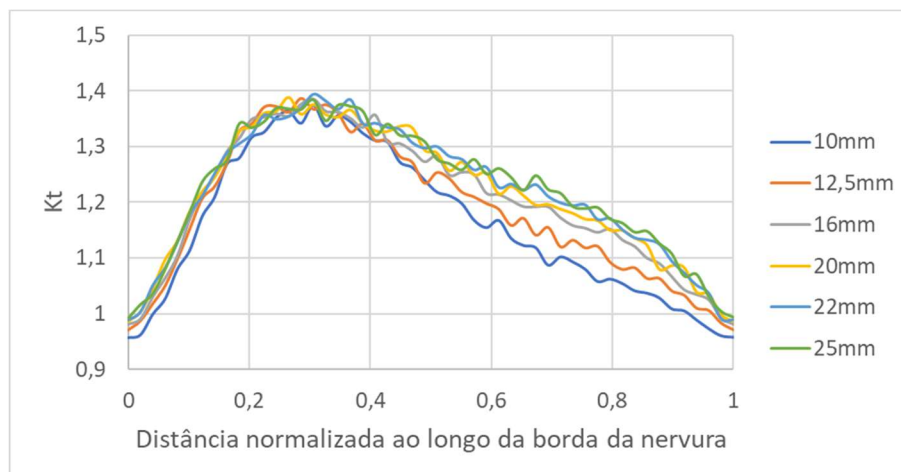


Figura 28: Curvas de K_t ao longo da borda 1 para os modelos 44 a 49
Fonte: Autoria própria, 2021.

Os valores de $K_{t,máx}$ e sua posição ao longo da borda 1 estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de $K_{t,máx}$ para os modelos 44 a 49

Modelos	Φ (mm)	$K_{t,máx}$	Posição de $K_{t,máx}$
44	10	1,37	0,31
45	12,5	1,39	0,29
46	16	1,39	0,31
47	20	1,39	0,27
48	22	1,39	0,31
49	25	1,39	0,31

Fonte: Autoria própria, 2021.

O aumento do diâmetro praticamente não influenciou no aumento dos valores máximos de K_t , diferente do obtido por Rocha et. al (2016). Para a autora, o aumento do diâmetro resultou no aumento dos valores de K_t em até 14% conforme o diâmetro aumentou de 10 para 16mm e até 18% para o diâmetro aumentando de 16 a 26 mm.

É importante salientar que na análise de K_t realizada por Rocha et. al (2016), os valores foram definidos com base na norma CEN (2005), onde o aumento do diâmetro é acompanhado do aumento da altura. Neste caso, o estudo da influência do diâmetro de Rocha et. al (2016) não corresponde a situação dos modelos deste trabalho, nos quais a altura se manteve fixa.

Na Figura 29, estão indicadas as posições dos valores de $K_{t,máx}$ para cada modelo e representadas as zonas de pico da borda 1.

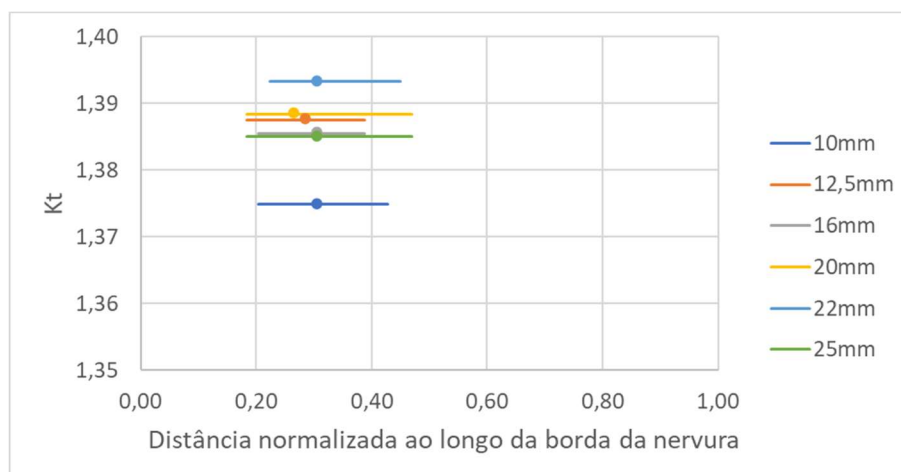


Figura 29: Posição dos valores de pico de K_t e das zonas de pico para os modelos 44 a 49
Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 29, observa-se que o aumento do diâmetro praticamente não influenciou no tamanho das zonas de pico. A variação do tamanho foi de 20% a 30% do tamanho da borda 1.

4.5 ANÁLISE GERAL

Após analisar a influência de cada parâmetro de forma individual, é possível indicar que os principais parâmetros geométricos da nervura que afetam os valores de $K_{t,máx}$ são o raio e a largura, pois foram os parâmetros que influenciaram em mais de 10%. Os valores de $K_{t,máx}$ na região do raio de transição podem ser significativamente reduzidos com o aumento do raio e a redução da largura.

A Figura 30 apresenta uma relação entre o valor máximo de K_t e a largura da nervura, sendo que cada curva representa uma altura. Atingindo uma variação máxima de 13,72%.

A largura e a altura da nervura estão diretamente relacionadas, pois quanto maior a altura, mais a largura influencia nos valores de $K_{t,máx}$, como pode ser observado na Figura 30.

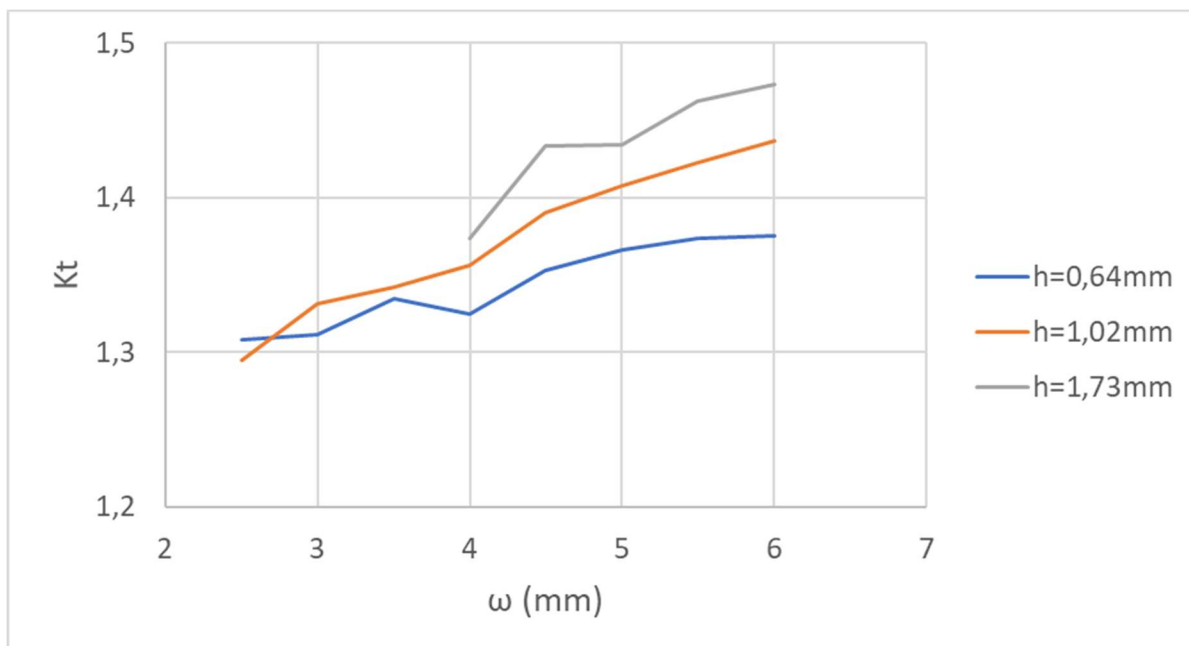


Figura 30: Influência da largura e da altura da nervura no aumento do K_t
Fonte: Autoria própria, 2021.

Analisando todos os modelos, as zonas mais críticas ao longo da borda 1 foram identificadas na região conforme indicada em vermelho na Figura 31. Essa zona chega a ocupar até 36% dessa borda.

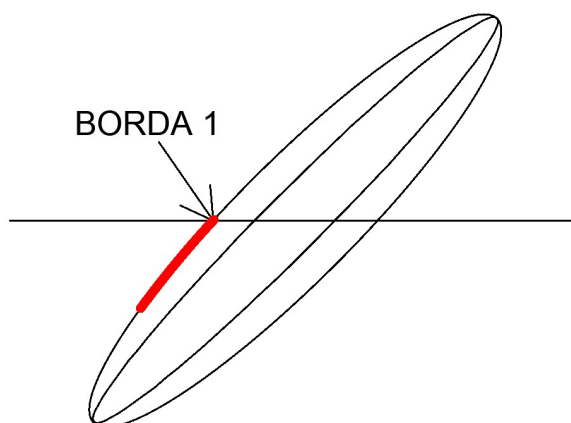


Figura 31: Identificação da zona de pico dos modelos
Fonte: Autoria própria, 2021.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho visou determinar a influência dos parâmetros geométricos das barras de aço nos valores de K_t . Para isso, foram obtidos os valores de K_t ao longo da borda da nervura, com o objetivo de analisar os valores de $K_{t,máx}$, sua posição e identificar as zonas de pico.

Com as análises desenvolvidas, é possível concluir que:

- Os principais parâmetros geométricos que afetaram em mais de 10% os valores de $K_{t,máx}$ foram o raio e a largura.

- A influência do raio, da largura e da altura variou de 7 a 14% e os valores de K_t variaram de 1,24 a 1,49.

- O aumento do raio ocasionou uma diminuição nos valores de K_t e gerou uma pequena variação no tamanho das zonas de pico.

- O aumento da largura provocou um aumento nos valores de K_t e uma redução média de 30% no tamanho das zonas de pico.

- O aumento da altura aumentou o K_t de forma pouco significativa e diâmetro praticamente não tem influência em K_t .

- As zonas críticas chegam a ocupar até 36% da borda ao longo da nervura.

Para trabalhos futuros, sugere-se analisar em outras geometrias de barras reais ou da literatura, a influência dos parâmetros analisados nos valores de $K_{t,máx}$, além do ângulo de flanco α e o ângulo de inclinação da nervura β .

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação.** Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - 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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 615: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon – Steel Bars for Concrete Reinforcement.** 2015

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 706: Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement.** 2001

BRITISH STANDARD. **BS 4449: Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – Bar, coil and decoiled product – Specification.** 2005.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's mechanical engineering design.** 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2011, p. 1109.

Comité Européen de Normalização. **CEN: Steel for the reinforcement of concrete: Weldable reinforcing steel: General.** EN 10080, Brussels, Belgium, 2005.

CONSTRUCTION STANDARD. **CS2: Steel Reinforcing Bars for the Reinforcement of Concrete.** 2012.

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy.** SI metric edition. London: McGraw-Hill Book Company, 1988, p. 1291.

FEM Calculix. Disponível em: https://wiki.freecadweb.org/FEM_CalculiX. Acesso em: 30 set. 2020.

FREECAD. Disponível em: https://wiki.freecadweb.org/Getting_started. Acesso em: 13 ago. 2020.

GONÇALVES, J. E. S. **Leitura e interpretação de arquivos IGES para uso em programas de elementos de contorno**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/14522/1/2016_JoaoEliasSantanaGoncalves_tcc.pdf. Acesso em: 13 ago. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6935: Steel for the reinforcement of concrete — Part 2: Ribbed bars**. 2007.

LARA, R. S. **Análise de concentração de tensões em juntas soldadas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2016/2654-lara-rs-tm-16-pdf>. Acesso em: 26 ago. 2020.

LOSADA, H. F. **Análise de fadiga em próteses odontológicas implanto suportadas sob carregamento multiaxiais**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-07022019-083706/publico/HenryFigueredoLosadaCorr18.pdf>. Acesso em: 27 set. 2020.

LOYOLA, F. M. **Modelagem tridimensional de problemas potenciais usando o método dos elementos de contorno**. 2017. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais e Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/23468>Acesso em: 26 ago. 2020.

MARTHA, L. F. Método dos Elementos Finitos. (Notas de Aula do Curso CIV-2118). ed. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 1994.

MINETTO, C. F. **Um estudo sobre Curvas NURBS**. 2003. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/94376/279991.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 ago. 2020.

MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** ESSS, 2016. Disponível em: <http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 23 ago. 2020.

MORAES, Ademir José. **O Método dos Elementos Finitos e a Engenharia Civil**. Especialize, Cuiabá-MT, v. 01, n. 10, dez. 2015.

MUNIZ, J. G. C; TRENTIN, L. T. **Modelagem computacional da ponte Morandi, em Gênova, utilizando software livre de elementos finitos**. 2019, 87 págs. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Departamento Acadêmico de Construção Civil- UTFPR, Pato Branco, 2019.

NEUPANE, D. **Comparison of Some FEM Codes in Static Analysis**. 2014. 71 f. Bachelor's thesis (Degree Programme in Mechanical Engineering and Production Technology) – HAMK University of Applied Sciences, Riihimäki, 2014.

NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 4671: Steel reinforcing materials**. 2001.

NORMA CHILENA. **NCH 204: Acero – Barras laminadas em caliente para hormigón armado**. 2006.

NORMA MEXICANA. **NMX B-457: Industria siderúrgica - varilla corrugada de acero de baja aleación para refuerzo de concreto - especificaciones y métodos de prueba**. 2013.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. **NTC 2289: Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto.** 2007.

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. **NTE INEN 102: Varillas corrugadas y lisas de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado.** Requisitos. 2015.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada.** 4° ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, p. 1055.

OLIVEIRA, G. B. **Análise da segurança estrutural de uma ponte metálica quanto à fadiga utilizando elementos finitos.** 2019, 96 págs. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Departamento Acadêmico de Construção Civil- UTFPR, Pato Branco, 2019.

PACHECO, A. S. **Avaliação do fator de concentração de tensão presente em um reparo de tubulação de aço AISI 316I.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2013. Disponível em: https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Adriana-Pacheco_Dissertacao_Mestrado.pdf. Acesso em: 26 ago. 2020.

PILKEY, W. D. **Peterson's stress concentration factors.** 2ed. New York: John Wiley and Sons, 1997.

PINTO, T.L.F.C. **Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/14522/1/2016_JoaoEliasSantanaGoncalves_tcc.pdf. Acesso em: 13 ago. 2020.

ROCHA, M. et al. Very high cycle fatigue tests of quenched and self-tempered steel reinforcement bars. **Materials and Structures**, v. 49, n. 5, p. 1723-1732, 2016.

SILVA, F. ROSADO, V. O. G. Biomodelagem Virtual para Diagnóstico e Planejamento Cirúrgico Usando Softwares Livre. **Informática na educação: teoria & prática**, v. 17, n. 1, p. 125-143, 2014.

TILLY, G. P. Fatigue of steel reinforcement bars in concrete: a review. **Fatigue of Engineering Materials and Structures**, v. 2, n. 3, p. 251-268, 1979.

ZHENG, H.; ABEL, A. A. Fatigue properties of reinforcing steel produced by Tempcore process. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, n. 2, p. 157-165, 1999.

ZHENG, H.; ABEL, A. A. Stress concentration and fatigue of profiled reinforcing steels. **International Journal of Fatigue**, v. 20, n. 10, p. 767-773, 1998.