



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE MECÂNICA

JESSÉ JÊNESES OLIVEIRA CAMINHA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM PARA AVALIAÇÃO
DO FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO**

MOSSORÓ

2019

JESSÉ JÊNESES OLIVEIRA CAMINHA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM PARA AVALIAÇÃO
DO FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Nogueira Cavalcante.

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C183a Caminha, Jessé Jêneses Oliveira.
Aplicação da técnica de correlação de imagem para
avaliação do fator concentração de tensão / Jessé
Jêneses Oliveira Caminha. - 2019.
57 f. : il.

Orientador: Fabrício José Nogueira Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Correlação de imagem digital. 2. Fator
concentrador de tensão. 3. Aliviadores de tensão.
I. Cavalcante, Fabrício José Nogueira, orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JESSÉ JÊNESES OLIVEIRA CAMINHA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM PARA AVALIAÇÃO
DO FATOR CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Defendida em: 22 / 03 / 2019.

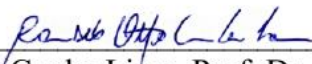
BANCA EXAMINADORA



Fabrício José Nogueira Cavalcante, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Rômulo Pierre Batista dos Reis, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Ramsés Otto Cunha Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Tudo é possível para quem acredita, para quem tem fé. Sempre em primeiro lugar, está o meu Deus, que tornou tudo isso possível, que me deu forças para continuar, sempre me superando e aprendendo com os erros. Obrigado por sempre está comigo em todos os momentos da minha vida.

Dedico com muita felicidade, todas as conquistas a minha família. Dona Fransquinha (avó) que esteve me guiando e ensinando todos os dias desde que nasci, me dando forças até mesmo nos momentos que nem eu mesmo tinha como continuar, tudo que sou hoje e o que aprendi de bom foi por sua causa. Obrigado pelas orações, pelos concelhos, pelas broncas, pelos abraços quando chego de viagem, pelas várias e várias vezes que fez o impossível só para me ver tentando crescer como pessoa. Espero de dar em dobro tudo isso.

Dona Lucivânia (mãe), a qual torcia por mim mesmo estando longe, mesmo com dificuldades, meus dias sempre melhoram quando te abraço, obrigado por cuidar de mim sempre, palavras não cabem nesse papel para descrever meu sentimento de amor por ti.

Senhor Reginaldo (pai), minha inspiração e fonte de esperança, homem o qual me espelho e luto para retribuir ao menos um décimo do que me ofereceu em minha vida. Nunca esquecerei o quanto sou por mim, me dando sustento e conforto para que pudesse estudar em outra cidade.

Uma pessoa que me abrigou dentro do coração quando eu precisava, foi minha linda irmã Tatiane Aline, me fazendo sorrir mesmo nos momentos mais complicados. Obrigado por fazer parte de tudo isso.

Não posso esquecer da pessoa mais amável, simpática e amiga, que me dá apoio sempre, minha irmã Maria Isnara, com seu lindo sorriso me alegro cada momento que passo contigo.

RESUMO

A engenharia busca a cada dia evoluir suas tecnologias para elevar a segurança dos projetos. Na área de resistência dos materiais, a grande preocupação é construir componentes de maneira a resistir aos esforços aplicados nos mesmos. Construções mecânicas estão inevitavelmente sujeitas aos efeitos concentradores de tensão, tais como furos, entalhes, rasgos entre outros. Com base nisso, estudos relativos à agentes aliviadores de tensão, dependentes da posição de aplicação, vêm sendo desenvolvidos com intuito do prolongamento da vida útil das construções mecânicas. A técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) é uma técnica de extensometria óptica, inovadora e bastante precisa, que permite medir as deformações diante de um carregamento e pode ser aplicada para verificar níveis de tensão localizada. O fator de concentração de tensão é a razão das tensões máxima e média na menor seção transversal de um elemento, sendo um tópico muito relevante na mecânica, principalmente em projetos que estudam carregamentos localizados em descontinuidades superficiais. A literatura aborda diversas formas de se encontrar o fator de concentração de tensão, e a técnica de CID pode apresentar resultados satisfatórios dos valores das tensões para determinação desse fator. Com resultados precisos, o projeto de elementos de máquinas evolui ainda mais, com a convicção do que poderá vir a acontecer devido algum carregamento indesejado, sendo mais notável a utilização de aliviadores de tensão em locais específicos do elemento. Esse trabalho apresenta um estudo referente a utilização desse método óptico para análise do fator concentração de tensão em descontinuidades superficiais de elementos mecânicos, tendo como objetivo geral: Analisar o fator concentração de tensão em barras de aço com altos carregamentos axiais através do uso da técnica CID e como objetivos específicos: Revisitar a literatura geral descrevendo as principais definições que permitam compreender a mecânica dos sólidos e a Técnica de Correlação de Imagem Digital; Caracterizar os procedimentos e equipamentos que foram utilizados para o método; Utilizar o software MATLAB® para corte das imagens da câmera de alta resolução; Processar o código CorreliQ4®, fornecendo dados para análise e Comparar os resultados obtidos através do método de CID com os da literatura utilizada. Metodologicamente o presente estudo foi realizado a partir de experimentos com base no método CID descrito na literatura, apresentando como principais resultados a possibilidade de determinar campos de deslocamentos de forma eficiente, precisa e rápida, apesar de um custo mais elevado devido os equipamentos e necessários.

Palavras-chave: Correlação de Imagem Digital. Fator concentração de tensão. Aliviadores de tensão.

ABSTRACT

Engineering seeks to evolve its technologies each day to increase design safety. In the mechanics of materials field, the greatest concern is to build components in order to resist the applied forces. Mechanical constructions, are inevitably subjected to stress-concentrating effects, such as holes, notches, rips, among others. Based on this, studies on stress relieving agents, depending on the application position, have been developed with the purpose of extending the lifespan of mechanical constructions. The Digital Image Correlation (DIC) is an optical extensometry technique, innovative and very accurate, which allows strain measurement before a load and can be applied to verify levels of localized stress. The stress concentration factor is the ratio of the maximum and average stresses in the smallest cross section of an element, being a very relevant topic in mechanics, especially in projects that study localized loads in superficial discontinuities. The literature addresses several ways of determining the stress concentration factor, and the CID technique can present satisfactory results of stress values to determine this factor. With precise results, machine elements design evolve further, with the conviction of what might happen due to some unwanted loading, the most notable being the use of stress relievers at specific locations of the element. This work presents a study about the use of this optical method on the analysis of stress concentration factor in surface discontinuities of mechanical elements, having as general objective, to analyse the stress concentration factor on steel bars with high axial loads through the use of the CID technique and, as specific objectives: to revise the general literature describing the main definitions that allow to understand the mechanics of the solid and the Digital Image Correlation Technique; to characterize the procedures and equipment used for the method; to use MATLAB® software to crop high-resolution camera images; to process the CorreliQ4® code, providing data for analysis and to compare the results obtained through the CID method with those of the used literature. Methodologically, the present study was carried out from experiments based on the CID method described in the literature, presenting as main results the possibility to determine displacement fields efficiently, accurately and quickly, despite having a higher cost due to the necessary equipment.

Keywords: Digital Image Correlation. Stress concentration factor. Stress relievers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de forças agindo sobre uma área seccionada de um sólido.....	17
Figura 2 – Elemento sujeito a tração e compressão.....	18
Figura 3 – Tensão em uma barra de seção transversal A sujeita a uma força axial P.....	19
Figura 4 – Representação do princípio de Saint-Venant.	20
Figura 5 – Barra pura sob tração e distribuição de tensão na mesma.....	20
Figura 6 – Forças opostas aplicadas transversalmente numa barra AB	21
Figura 7 – Corte aplicado no ponto C de uma barra AB.	21
Figura 8 – Peça carregada com tensão cisalhante puro e com flexão.....	22
Figura 9 – Representação do estado plano de tensões.....	23
Figura 10 – Representação de uma barra submetida à uma força axial.	24
Figura 11 – Distribuição de tensão numa barra com filetes de rebaixo.	25
Figura 12 – Analogia fluxo-tensão.	26
Figura 13 – Linhas de força em componentes sob tração ou flexão.....	26
Figura 14 – Gráfico de concentração de tensão em placa com furo no centro.....	27
Figura 15 – Gráfico de concentração de tensão em placa com entalhe.....	28
Figura 16 – Formas de alívio da concentração de tensão.	26
Figura 17 – Modificações de projeto para reduzir a concentração de tensões em um canto agudo.	29
Figura 18 – Exemplo para redução de concentração de tensão por modificações na geometria do elemento.	29
Figura 19 – Exemplos para redução de concentração de tensão por modificações na geometria do elemento.	29
Figura 20 – Exemplos de forma de alívio geométrico de tensão.....	30
Figura 21 – Mudança no formato do furo para uma elipse para alívio de tensões.....	30
Figura 22 – Aliviadores numa placa com furo central	31
Figura 23 – Placa com furo central.....	32
Figura 24 – Gráfico para o fator geométrico de concentração de tensão numa placa com furo central em tração axial.....	33
Figura 25 – Acessórios utilizados para realização da técnica de CID.....	35
Figura 26 – Lado esquerdo: a) 4 Padrões selecionados. Lado direito: b) Primeiro padrão destacado em imagem registrada subsequentemente.....	36
Figura 27 – Matriz pixel de 16x16 com alvos.	37

Figura 28 – Lado esquerdo: a) Sinal de + na matriz 10x10 pixels. Lado direito: b) Leitura da intensidade luminosa em cada pixel pela matriz CCD.	38
Figura 29 – Lado esquerdo: a) Nova posição do sinal de +. Lado direito: b) Leitura da intensidade luminosa em cada pixel pela matriz CCD da nova posição do sinal de +.	39
Figura 30 – Lado esquerdo: a) Padrão 6x6 pixels de intensidade luminosa do centro do sinal de +. Lado direito: b) Padrão 6x6 pixels encontrado.	39
Figura 31 – Comparação da ZOI da imagem da imagem original com a imagem transformada.	40
Figura 32 – Exemplo de textura para técnica CID.	41
Figura 33 – Armação da câmera Canon® EOS 60D no tripé.	42
Figura 34 – Código PVC_S_03_cut_image.m utilizado para corte das imagens.	43
Figura 35 – Visualização da deformação do corpo de prova 01 no tempo 5s na direção 1 ou direção x	44
Figura 36 – Imagem selecionada para análise dos deslocamentos.	44
Figura 37 – Barra chata 1”x1/4 utilizada no ensaio de tração.	45
Figura 38 – Máquina de Ensaio Modelo DL10000.	46
Figura 39 – Corpo de prova usinado antes de receber a descontinuidade no centro.	46
Figura 40 – Corpo de prova nas medidas da norma ASTM E8 (1992).	47
Figura 41 – Imagens cortadas pelo MATLAB®.	51
Figura 42 – Gráficos de cada primeira imagem dos ensaios mostrando a ZOI válida para análise.	52
Figura 43 – Visualização dos campos de deformação 1-1 para auxiliar nas análises e selecionar as áreas do <i>guage</i>	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões de todos os corpos de prova e suas especificações.	47
Tabela 2 – Seção transversal em mm ² dos corpos de prova.	48
Tabela 3 – Tensões máximas e médias pelos dados fornecidos pela máquina de ensaios de tração.	49
Tabela 4 – Dados resultantes do código <i>guage</i> do programa CorreliQ4®.....	50
Tabela 5 – Os fatores K para cada dado encontrado com a máquina de ensaios, a técnica de CID e pela literatura.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

K – Fator concentrador de tensão.

CID – Correlação de Imagem Digital

$\sigma_{méd}$ – Tensão média

$\tau_{méd}$ – Tensão de cisalhamento média.

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima.

K_T – Fator de concentração de tensão teórico.

E – Módulo de elasticidade.

K_t – Fator de concentração de tensão elástica.

σ_{nom} – Tensão nominal

CCD – charge-coupled device.

HD – Hard Disk.

R – Red.

G – Green.

B – Blue.

ZOI – *Zone of Interest* ou Zona de Interesse.

EPI's – Equipamentos de Proteção Individual.

SAE – Society of Automotive Engineers.

CP – Corpo de Prova.

K_{CID} – Fator concentrador de tensão pelos dados da técnica CID.

LISTA DE SÍMBOLOS

® - Marca Registrada

Δ - Delta

σ – Tensão

ε – Deformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Mecânica dos sólidos.....	17
3.1.1	Conceito de tensão	17
3.1.2	Tensão normal.....	18
3.1.3	Tensão de cisalhamento	21
3.1.4	Estado plano de tensão e deformação	22
3.1.5	Concentração de tensão.....	21
3.1.6	Formas de minimizar a concentração de tensão.....	28
3.1.7	Fator concentração de tensão	31
3.2	Correlação de imagem digital.....	33
3.2.1	Conceituando a técnica CID	34
3.2.2	Preparação do método	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Dimensões do espécime.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO....	54
5.1	Resultados usando os programas no MATLAB®.....	51
5.2	Discussão	54
6	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Juntamente com a necessidade de se construir o primeiro mecanismo para ser utilizado em atividades rurais, ou para comércio, transporte de materiais e serviços, apareceram também diversos problemas relacionados a manutenção, segurança e necessidade de melhorias nesses mecanismos. Os projetos que surgiam para facilitar os trabalhos humanos, sofreram diversas mudanças devido aos problemas associados a cargas elevadas nos componentes, ou falhas por fadiga, que levaram ao aprimoramento, otimizando os equipamentos e selecionando os materiais ideais para as aplicações de esforços mediante a disponibilidade.

O projeto de engenharia pode ser definido como sendo a utilização das diversas técnicas e princípios científicos afim de se definir um método, ou um dispositivo ou mesmo um sistema. E a partir dessa definição, nesse trabalho serão estudadas as influências de descontinuidades superficiais, que podem passar despercebidos em alguns casos por serem detalhes simples, e que aparentemente não influenciaram caso o elemento venha a falhar, mas que se não forem aplicadas corretamente, podem causar quebras de componentes e acidentes graves a depender da sua importância no projeto. Essas falhas mecânicas estão associadas ao fato de existir concentração de tensão em locais específicos das descontinuidades, sendo possível estudá-las com a ajuda do fator concentração de tensão (NORTON, 2013).

O fator concentração de tensão (K) é bastante utilizado nos estudos de resistência dos materiais. O fator de concentração permite identificar: As tensões em áreas onde a descontinuidade reduz a quantidade de material que está sujeita a tensões mais elevadas que em regiões com uma maior quantidade de material (FRANQUETTO, 2007).

A elaboração de projetos mecânicos é visionária, sempre evoluindo para um melhor aproveitamento dos componentes utilizados, resultando em produtos mais leves, seguros e resistentes ao tempo. Mesmo passando por um processo de evolução contínua, a presença de descontinuidades tais como furos e entalhes são comuns e, independente do material, sempre haverá tensões elevadas nos contornos dessas descontinuidades. O fator K exprime essa relação da geometria da descontinuidade com a tensão nela desenvolvida. As distribuições de tensão surgem sob um carregamento concentrado, mas também em seções as quais a área de seção transversal muda. Caso o carregamento aplicado na peça ultrapasse seu limite de escoamento, muitos outros componentes do projeto serão comprometidos (HIBBELER, 2000). É nesse sentido que se estuda o fator K em elementos mecânicos. Essas descontinuidades apresentam picos de tensão localizadas, determinadas por equações específicas. Uma das formas de aliviar

essas tensões é se utilizando dos aliviadores de tensão colocadas em pontos estratégicos. Esse trabalho aborda algumas das formas apresentadas na literatura de como aliviar a concentração de tensão, com foco em utilizar a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) para analisar a o fator concentrador de tensão.

1.1 Justificativa

As técnicas são as mais diversas para analisar as tensões nos elementos, e recentemente com o desenvolvimento da técnica de CID no âmbito da engenharia, que vem mostrando ser eficiente para resolver essa questão devido a fidelidade dos resultados apresentados com baixa margem de erro, com relação as demais técnicas. Além da precisão, a técnica também tem a vantagem de não entrar em contato com o corpo estudado, pois existem algumas complicações quando se trata de instalação de equipamentos para ensaios, onde pode ocorrer a ruptura brusca do corpo de prova, ou expor o componente mecânico à altas temperaturas põem em risco de dano os equipamentos de ensaio.

Essa técnica foi posta como ferramenta principal para o estudo do fator K , devido sua fácil utilização, disponibilidade dos equipamentos necessários, precisão nos resultados e para determinar melhores formas de aliviar a tensão devido as descontinuidades.

A importância científica aqui presente se dá ao entendimento correto dos campos de tensões decorrente da geometria associada ao elemento estrutural e as forças aplicadas, sendo condições necessárias para estudos de novas tecnologias para prevenir ou reparar estruturas. Sendo um método tecnicamente rápido devido a qualidade dos seus resultados e material empregado para execução, sendo uma ótima opção para análise de tensões. Contudo essa pesquisa é de caráter descritivo, com apresentação de análises qualitativas e quantitativas. Justificando-se enquanto uma possibilidade de determinar campos de deslocamentos de forma eficiente, precisa e rápida.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o fator concentração de tensão por barras de aço com altos carregamentos axiais através do uso da técnica CID.

2.2 Objetivos específicos

Revisitar a literatura geral descrevendo as principais definições que permitam compreender a mecânica dos sólidos e a Técnica de Correlação de Imagem Digital;

Caracterizar os procedimentos e equipamentos que foram utilizados para o método;

Utilizar o software MATLAB® para corte das imagens da câmera de alta resolução;

Processar o código CorriliQ4®, fornecendo dados para análise;

Comparar os resultados obtidos através do método de CID com os da literatura utilizada.

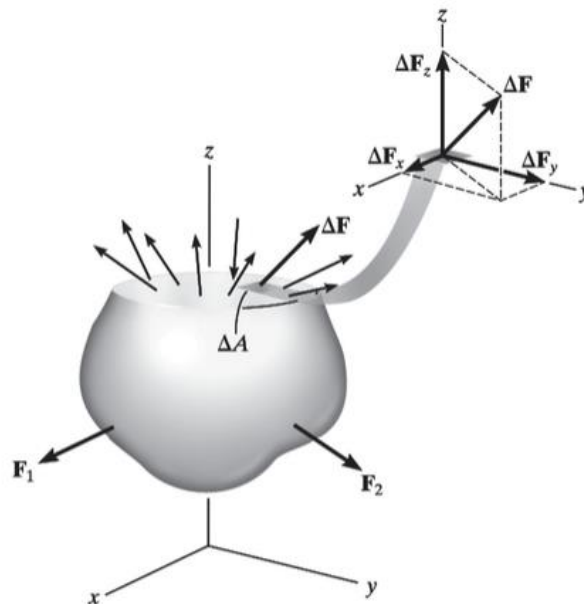
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mecânica dos sólidos

3.1.1 Conceito de tensão

Para a definição de tensão, pode ser considerado um dado sólido de geometria qualquer e material contínuo e em equilíbrio das forças, como representado na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição de forças agindo sobre uma área seccionada de um sólido.



Fonte: Hibbeler (2010).

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1)$$

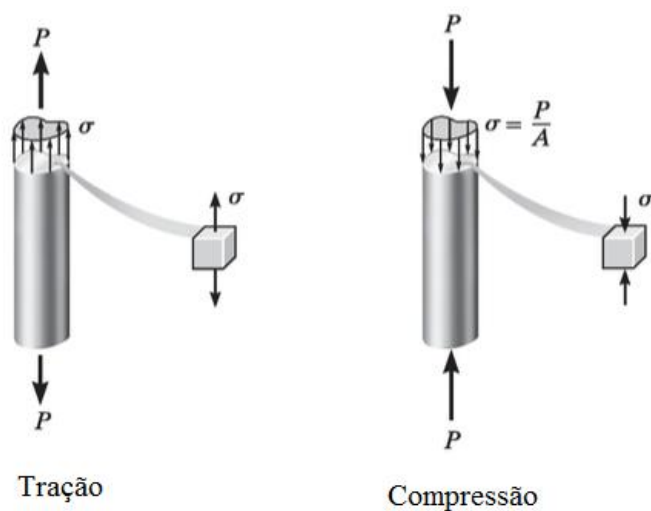
Com base na figura acima, analisando uma região infinitesimal ΔA na superfície de corte feito por um plano π paralelo ao eixo xy , observa-se um conjunto de forças distribuídas decorrente do equilíbrio do sólido. Destacando uma força ΔF na superfície da área infinitesimal em análise ΔA , e decompondo-a em componentes nos eixos xyz , Hibbeler (2010) explica que quanto menor a área ΔA , menor serão as componentes de ΔF , e define a tensão como o quociente entre força e a área que tende a um valor finito de acordo com a Equação 1.

Por tanto é observado que tensão ou tensão mecânica se refere a distribuição de forças por unidade de área em torno de um ponto dentro de um corpo rígido.

A tensão, que foi base de estudos desse trabalho, é uma medida de intensidade das forças internas agindo entre as partículas de uma seção transversal, no interior de um corpo que surgem devido a forças aplicadas externamente como reação.

A força por unidade de área que age perpendicularmente a ΔA , será a tensão normal, podendo ser uma tensão de tração ou compressão de acordo com a atuação da força normal sobre a área, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Elemento sujeito a tração e compressão.



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

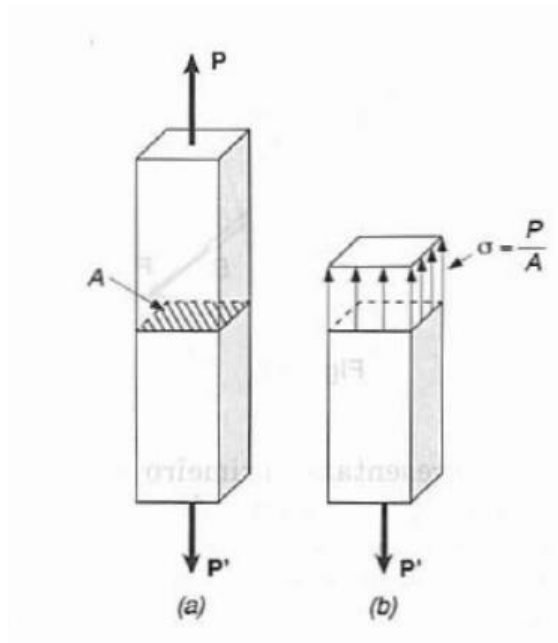
As componentes da tensão que agem no plano paralelo à área seccionada são definidas como tensão de cisalhamento. Essa tensão tangencial é um tipo de tensão gerada por forças aplicadas em sentidos opostos, porém em direções semelhantes no espécime em análise e será mais detalhada em seguida.

3.1.2 Tensão normal

Para que seja possível visualizar a atuação de tensão normal em um corpo ou elemento mecânico, é mostrado um exemplo de uma barra que sofre a ação de duas forças em suas extremidades, na Figura 3. Nesse exemplo, a tensão atuante nada mais é do que a força por

unidade de área ou intensidade das forças distribuídas sobre uma seção transversal, onde a tensão normal é aquela que atua perpendicularmente sobre uma seção transversal devido os esforços provocados no corpo (BEER, 1995)

Figura 3 – Tensão em uma barra de seção transversal A sujeita a uma força axial P.

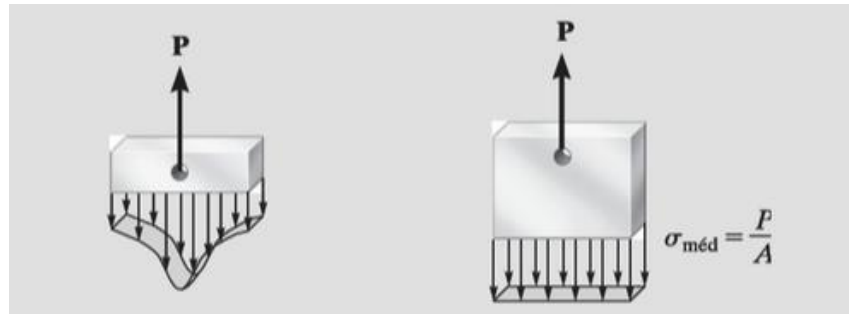


Fonte: Beer (1995).

Essas tensões podem atuar na direção perpendicular ou normal, com tendência a puxar desse estado de carga ou com tendência a empurrar as áreas infinitesimais. Beer (1995) adota a representação em geral como um cubo e as forças atuantes representadas como setas nas faces para simbolizar a direção na qual a força está sendo aplicada.

Com as informações de material utilizado na fabricação da barra, e o diâmetro para calcular sua área de seção transversal, revela-se a tensão normal na região desejada. Esse resultado será útil para que seja assimilado com tabelas que indicam a tensão máxima admissível para aquela situação de material e área da seção. Se o valor encontrado for menor que a admissível na literatura, então não ocorrerá falhas mecânicas devido a esse fator. Baseando nas definições e no princípio de Saint-Venant, que segundo Hibbeler (2010) ocorre quando um carregamento é aplicado em um ponto sobre um corpo que desenvolve uma distribuição uniformemente distribuída em regiões afastadas do ponto de aplicação (Figura 4).

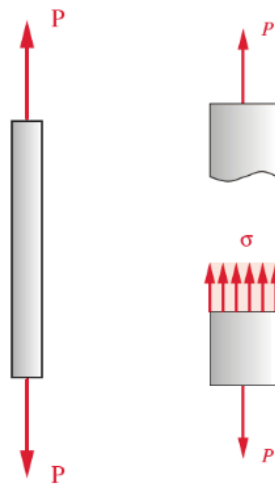
Figura 4 – Representação do princípio de Saint-Venant.



Fonte: Hibbeler (2010).

Concluindo-se que a distribuição de tensão ao longo da seção transversal do elemento é constante, apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Barra pura sob tração e distribuição de tensão na mesma.



Fonte: Norton (2013).

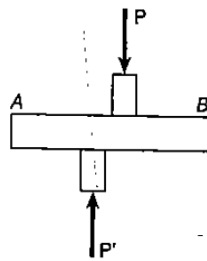
A figura 5 representa a aplicação de força Axial numa barra de material contínuo de como a tensão se distribui ao longo da mesma. Sendo quantificada pela Equação 2.

$$\sigma_{méd} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

3.1.3 Tensão de cisalhamento

Diferentemente da tensão normal que tinha suas forças e tensões correspondentes na direção normal à área da seção transversal da barra, o cisalhamento acontece quando se têm duas forças em sentido opostos sendo aplicadas transversalmente; ocorre cisalhamento na Figura 6. O cisalhamento pode ser considerado como sendo um tipo de tensão gerada devido a forças em sentidos opostos, mas em direções semelhantes em um dado material em análise. Norton (2013) completa definindo que a tensão de cisalhamento tende a deformar o elemento infinitesimal em formato romboidal.

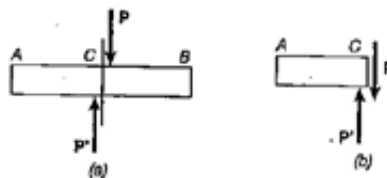
Figura 6 – Forças opostas aplicadas transversalmente numa barra AB



Fonte: Beer (1995)

Considerando a Figura 7 onde tem-se uma barra AB, um corte transversal no meio da barra chamada de ponto C, tal que seja possível analisarmos a seção AC, percebe-se que existe uma força interna de intensidade P de sentido contrário a P', e essa força é chamada de força cortante, ao dividir a área da seção por essa força teremos a tensão de cisalhamento na seção (BEER, 1995), que pode ser escrita como mostrado na Equação 3.

Figura 7 – Corte aplicado no ponto C de uma barra AB.



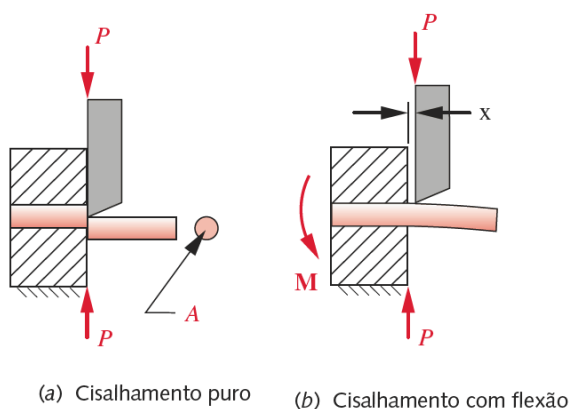
Fonte: Beer (1995)

$$\tau_{méd} = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Vale destacar que essa força de corte varia da superfície até o interior do elemento, sendo assim a tensão de cisalhamento ao longo dessa área assume valores diferentes a tensão de cisalhamento média ($\tau_{méd}$). O cisalhamento pode ser puro ou com flexão, onde o primeiro ocorre quando as forças estão no mesmo plano, isto é, se tomarmos como exemplo uma tesoura, as lâminas não poderiam ter folga no momento do corte, mesmo com um bom fio de corte se houver uma folga suficiente ocorrerá cisalhamento por flexão. Na prática sempre existirão pequenas folgas, e as forças não estarão no mesmo plano, e mesmo pequenas folgas podem fazer com que as tensões de cisalhamento aplicadas sejam menores que as tensões de flexão.

A seguir, na Figura 8, Norton (2013) representa esse fenômeno com uma barra fixada por mordentes e um elemento cortante, e na primeira situação (Figura 8 – a) tem-se que a lâmina é imprensada contra os mordentes, com isso eliminando alguma folga e ocorrendo cisalhamento puro devido as forças estarem no mesmo plano. Já na segunda situação (Figura 8 – b) aparece uma folga entre os mordentes e a lâmina, de distância x e forçando o aparecimento de um braço de momento M , e as forças P tornam-se binárias e com isso um cisalhamento com flexão.

Figura 8 – Peça carregada com tensão cisalhante puro e com flexão.



Fonte: Norton (2013)

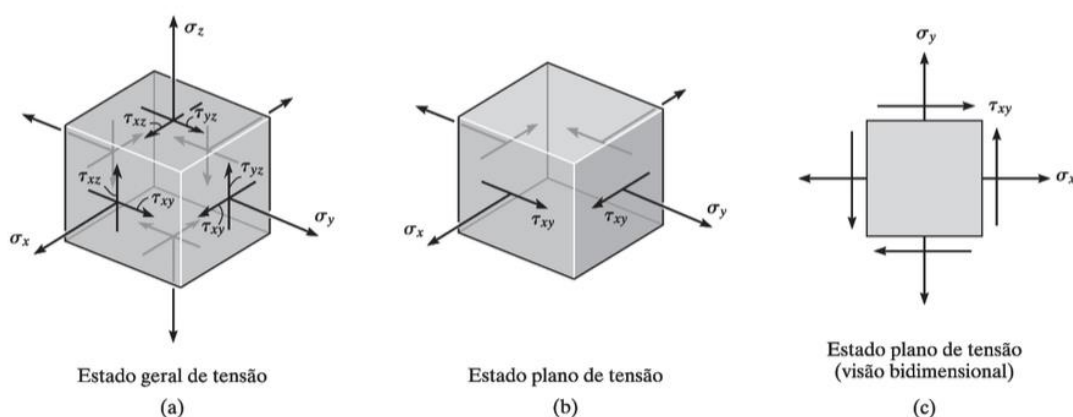
Os exemplos de tensão de cisalhamento mostradas até o momento, são cisalhamentos simples, pois necessitam apenas de uma área da seção transversal pra romper a peça. O cisalhamento duplo ocorre quando duas áreas estão cisalhando para que se rompa a peça. Uma tensão de cisalhamento puro é bastante difícil de acontecer (NORTON, 2013).

3.1.4 Estado plano de tensão e deformação

Os engenheiros frequentemente fazem aproximações ou simplificações das cargas sobre um corpo de modo que a tensão produzida em um elemento estrutural ou mecânico possa ser

analisado em um único plano. Por exemplo, uma chapa fina pode apresentar um estado de tensão plano em regiões distantes de sua extremidade ou pontos de fixação. De acordo com Hibbeler (2010), o estado geral de tensão no plano é representado pela combinação de duas componentes de tensão normal e uma componente de tensão de cisalhamento, que age nas quatro faces do elemento infinitesimal, bem representado na Figura 9.

Figura 9 – Representação do estado plano de tensões.



Fonte: Hibbeler (2010).

Como Hibbeler (2010) demonstra através da Figura 9 – b, no estado plano de tensão existirá uma direção onde a tensão será zero, que no caso apresentado na Figura 9 é a direção z , assim como as tensões cisalhantes na Figura 9 – c serão zero.

Quando se trata de deformação e deslocamento, mesmo estando diretamente relacionados, são definidas de formas distintas. A deformação acontece devido a variações no corpo em dimensões ou forma, por aquecimento ou decorrente de forças externas, onde os vários pontos desse corpo se deslocam uns em relação aos outros. Mas quando é levado em consideração um determinado referencial, na mudança de posição dos pontos materiais do corpo, tem-se deslocamento. (PEREIRA, 2014)

Para deformação tem-se variação de comprimento (grandeza escalar) e para deslocamento determinasse módulo, sentido e direção (grandeza vetorial).

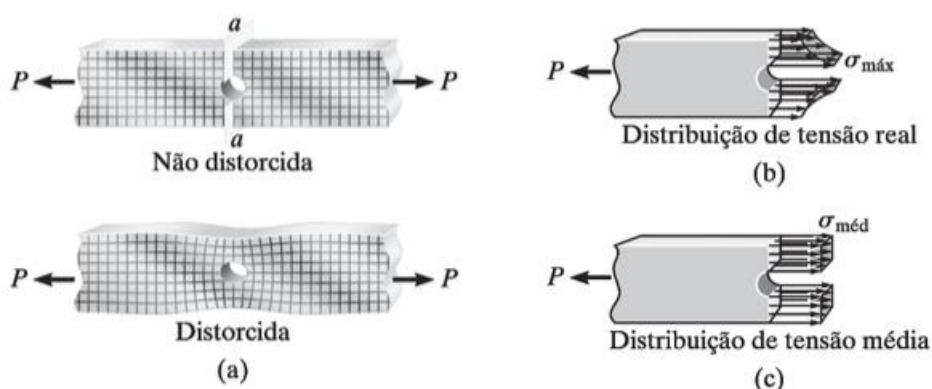
3.1.5 Concentração de tensão

Os estudos sobre distribuição de tensão em elementos submetidos a carregamentos, formulam equações para os projetos de componentes mecânicos, apoiando-se na ideia de que as áreas de seção transversal desses componentes são totalmente uniformes. Porém, a maioria

dos elementos de máquinas reais possuem elementos que alteram a constância da área. A existência de furos, entalhes, rasgos, chanfros, entre outros elementos, causam concentrações de tensão localizadas. Budynas (2002) define concentração de tensão como um “grande gradiente de tensão numa pequena região da estrutura”.

Uma representação apresentada por Hibbeler (2010) de distribuição de tensão numa placa com furo central, a qual está sujeita a forças de tração uniaxiais, é mostrada na Figura 10.

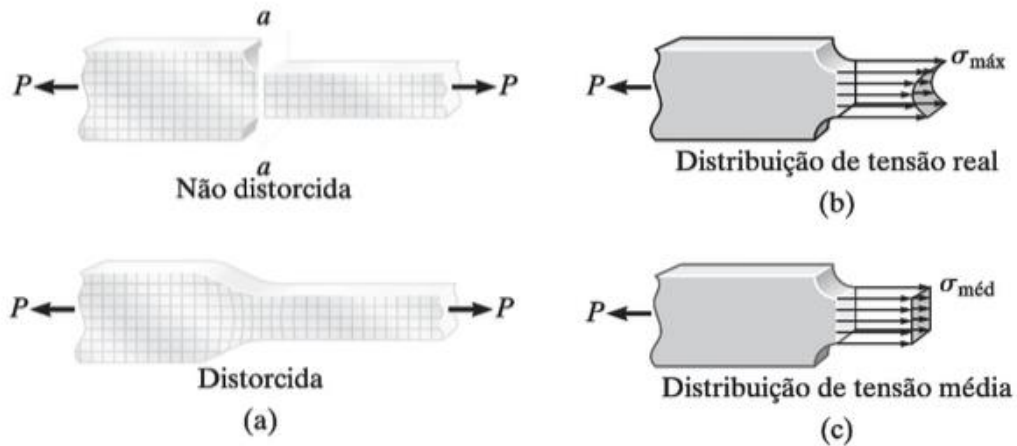
Figura 10 – Representação de uma barra submetida à uma força axial.



Fonte: Hibbeler (2010).

Nota-se que quanto mais próximo da descontinuidade, maior é a tensão, tendendo a $\sigma_{máx}$ (Figura 10 – b), isto é, na seção $a-a$ se encontra a menor área, e como consequência nesse plano ocorrerá a tensão máxima. Caso o material não se comporte como de maneira linear elástica, não pode ser aplicada a teoria da elasticidade. A aplicação dessa teoria, de que a tensão será maior em áreas de seção transversal menores, aplicasse para os demais casos de descontinuidades superficiais, como por exemplo filete de rebaixo, furos excêntricos, entalhes em V ou U, entre outras descontinuidades presentes no vasto campo da engenharia. A figura 11 representa a distribuição da tensão e deformação superficial ocorrendo em uma barra com descontinuidade em forma de filete.

Figura 11 – Distribuição de tensão numa barra com filetes de rebaixo.



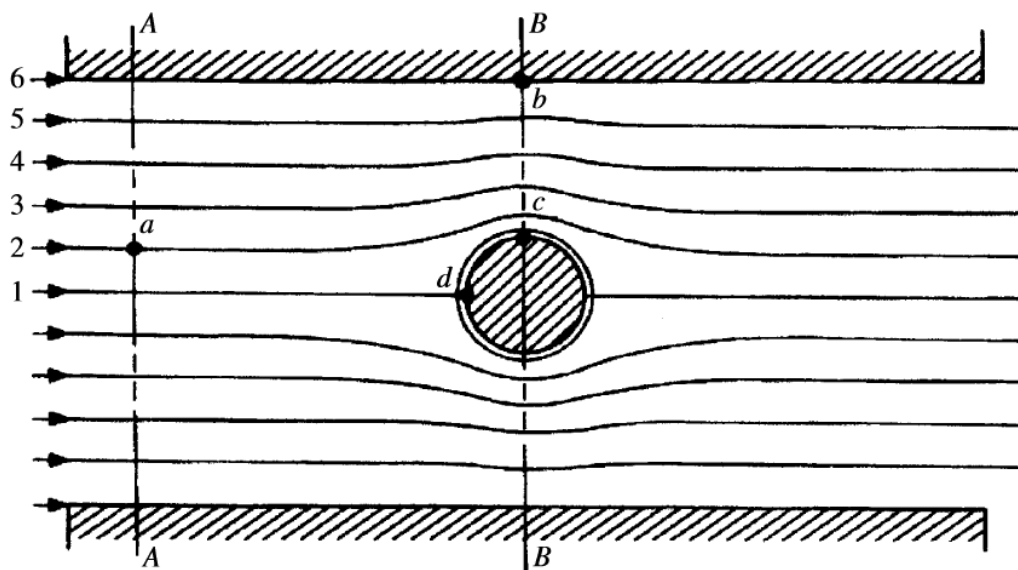
Fonte: Hibbeler (2010).

O fenômeno da concentração de tensão é representado pelo fator de concentração de tensão K que, segundo Hibbeler (2010), é escrito como sendo a razão entre as tensões máxima e média que agem sobre a menor seção transversal, como mostra a Equação 4. O subscrito T, segundo Young e Budynas (2002), significa que esse fator de concentração de tensão depende, para seu valor, apenas da geometria da peça, isto é, o material do qual o corpo é formado não influencia no resultado final. Com isso entende-se que esse número representa o fator de concentração de tensão teórico.

$$K_T = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{e}d}} \quad (4)$$

Para explicar o que acontece, Young e Budynas (2002), apresenta uma analogia do fluxo de um fluido ideal com a tensão, apontando semelhanças em suas equações. Ele mostrou que as cargas aplicadas uniformemente são substituídas por um campo de escoamento uniforme de fluido. A Figura 12 ao longo da seção A-A, o escoamento é uniforme e devido a simetria o escoamento também é uniforme na saída do canal. No entanto, como as partículas tem uma certa aproximação na seção B-B, as linhas de corrente se ajustam para se deslocar no obstáculo circular. Nessa seção as partículas atingem a velocidade máxima no ponto c e em seguida desaceleram para sua velocidade uniforme.

Figura 12 – Analogia fluxo-tensão.

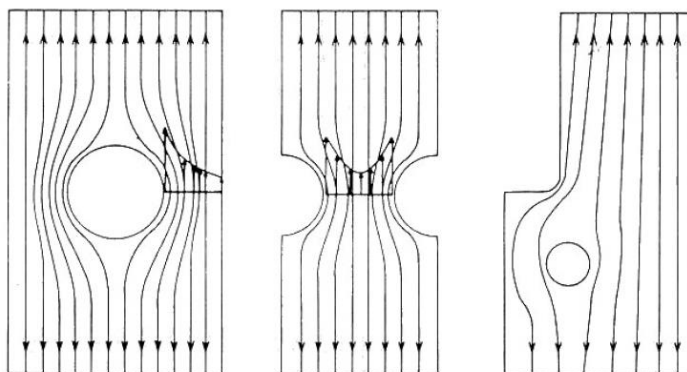


Fonte: Budynas (2002).

Essa representação é análoga a uma placa carregada em tensão com um furo central. Imaginando a Figura 12 como sendo uma placa com um furo no centro, a concentração de tensão seria máxima na borda do furo, localizado no ponto *c* na Figura 12. A tensão no ponto *b* será inferior à tensão aplicada, e para o ponto *d* acontecerá compressão perpendicular à direção axial da tensão aplicada.

As linhas de força, podem explicar o fenômeno concentração de tensão, cuja peça seria o meio por onde as linhas de força passam, pois, todos os esforços que são aplicados em alguma região da peça tendem a sair por outras regiões. Alguns exemplos de linhas de força em elementos são mostrados na Figura 13 (FRANQUETTO, 2007).

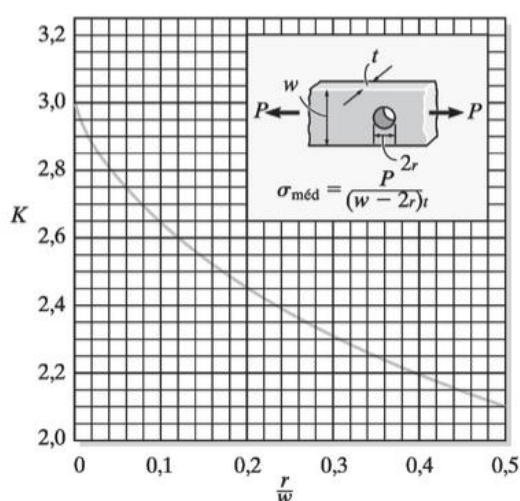
Figura 13 – Linhas de força em componentes sob tração ou flexão.



Fonte: Franquetto (2007).

A geometria da peça será responsável por definir o valor de K . Em geral, os valores específicos de K são apresentados em gráficos e em manuais relacionados à análise de tensão como na Figura 14 e Figura 15, respectivamente. O fator de concentração de tensão é um valor ideal com base no comportamento linear elástico que depende somente das proporções das dimensões do elemento e do tipo de descontinuidade. Analiticamente, os problemas de concentração de tensão são difíceis de serem resolvidos, daí se faz necessário a utilização de técnicas numéricas ou experimentais para resultados precisos e rápidos. Hibbeler (2010) apresenta dois tipos de representações para K (Figura 14 e Figura 15), os quais foram determinados com base em um carregamento estático, considerando que a tensão no material não ultrapassa o limite de proporcionalidade.

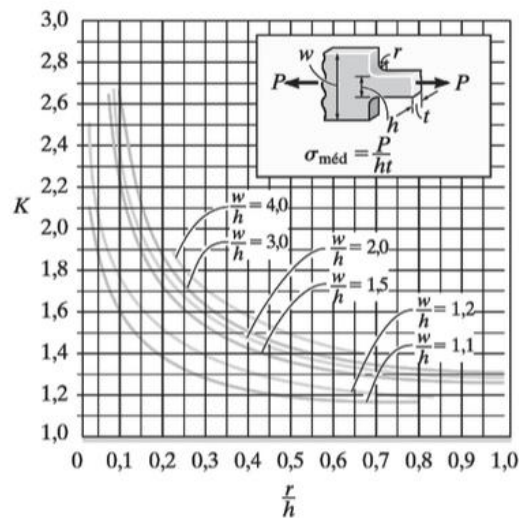
Figura 14 – Gráfico de concentração de tensão em placa com furo no centro.



Fonte: Hibbeler (2010).

Na figura 14 existe uma representação para determinar o fator K de barras com furo central sofrendo carregamento axial. Esse gráfico determina aproximadamente o valor de K através das medidas raio (r) e largura (w).

Figura 15 – Gráfico de concentração de tensão em placa com entalhe.



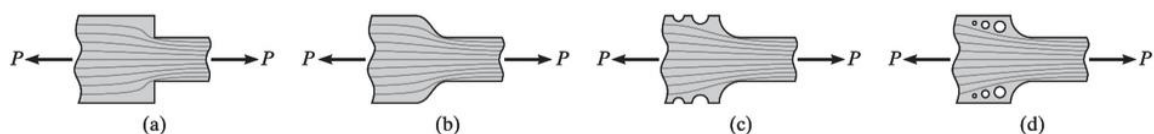
Fonte: Hibbeler (2010).

Na figura 15 em comparação com a figura 14, muda a descontinuidade, que nesse caso é um rebaixo. O fator K é determinado através da relação geométrica de raio (r) e altura (h) do rebaixo com a dimensão de largura (w)

3.1.6 Formas de minimizar a concentração de tensão

Todo projeto requer a utilização de peças com geometrias complexas de acordo com a função designada para a mesma. Norton (2013) diz que o projetista sempre encontra o problema de concentração de tensões em seções que possuem variações abruptas de forma ou dimensões. Na maioria dos casos, quando mais agudo for o canto (Figura 16 – a) e mais brusca a variação da dimensão, maior será a concentração de tensão. Tendo em mente as relações que contribuem para o aumento de concentração de tensão, Hibbeler (2010) conclui que evitando essas variações abruptas na seção transversal, e utilizando um raio de transição entre as superfícies, a concentração de tensão diminuirá consideravelmente.

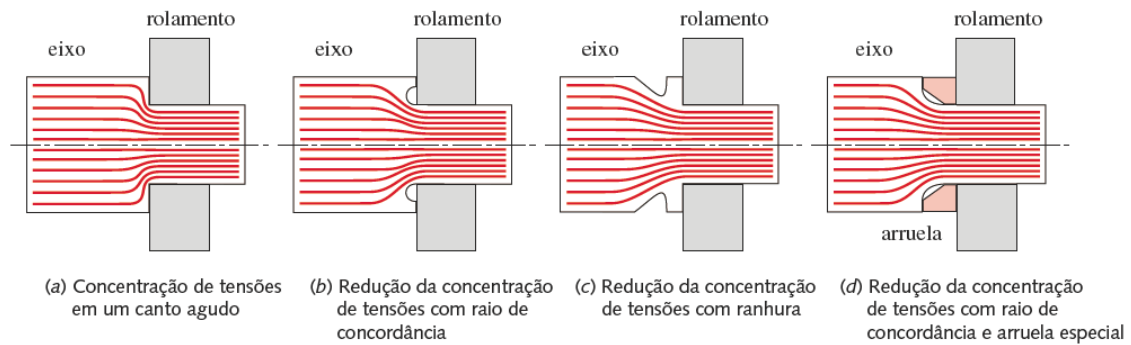
Figura 16 – Formas de alívio da concentração de tensão.



Fonte: Hibbeler (2010).

Também pode ser feito ranhuras ou furos nas zonas de transição como mostrado nas Figuras 17 – c e 17 – d.

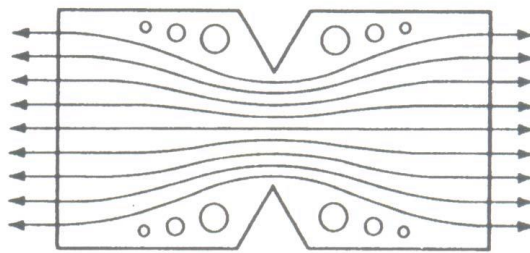
Figura 17 – Modificações de projeto para reduzir a concentração de tensões em um canto agudo.



Fonte: Norton (2013).

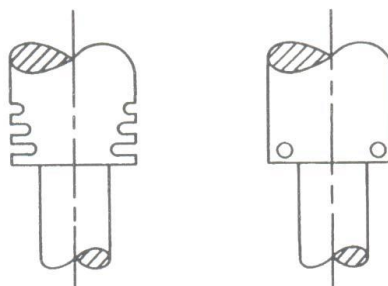
As Figura 18, Figura 19 e Figura 20 mostram a utilidade da analogia de fluxo de força para fornecer um modo de melhorar qualitativamente um projeto com elementos de geometrias diversas, por meio da redução de concentração de tensões. A colocação de furos altera o fluxo das linhas de força, permitindo uma redução do K (YOUNG, 2002).

Figura 18 – Exemplo para redução de concentração de tensão por modificações na geometria do elemento.



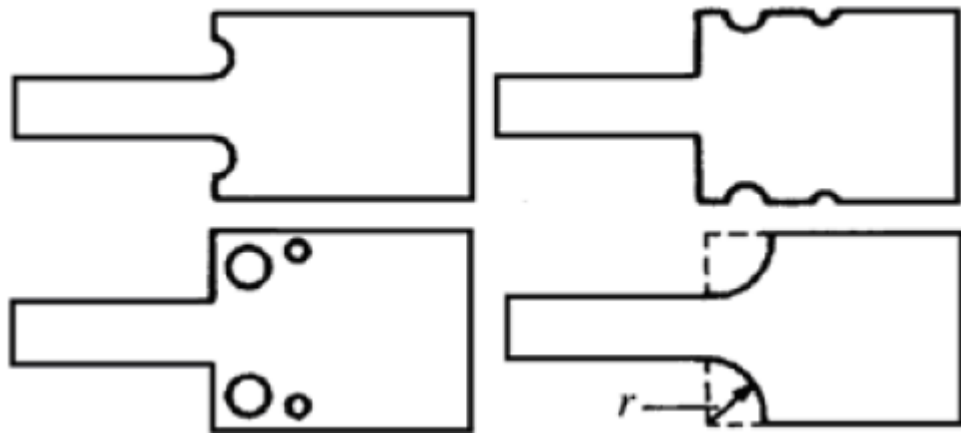
Fonte: Marshek (1987).

Figura 19 – Exemplos para redução de concentração de tensão por modificações na geometria do elemento.



Fonte: Marshek (1987).

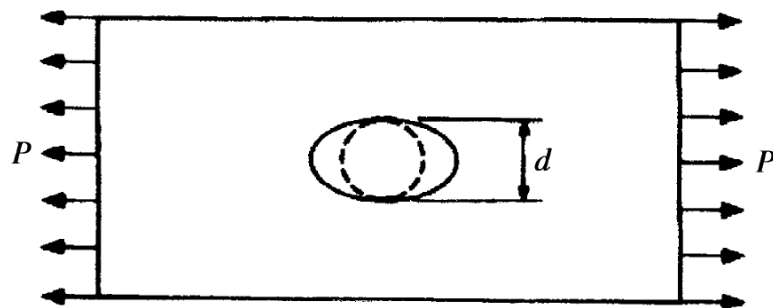
Figura 20 – Exemplos de forma de alívio geométrico de tensão.



Fonte: Young e Budynas (2002).

Voltando para o exemplo em que se tem um furo central numa placa, trazendo a analogia para um fluxo de um fluido que contorna um obstáculo, o problema seria o aumento rápido da velocidade adquirida pelo fluido nas seções menores em sua passagem. Budynas (2002) sugere mudar o formato do obstáculo, de circular para elíptico, o que melhora a transição de fluxo para a seção crítica, representado na Figura 21.

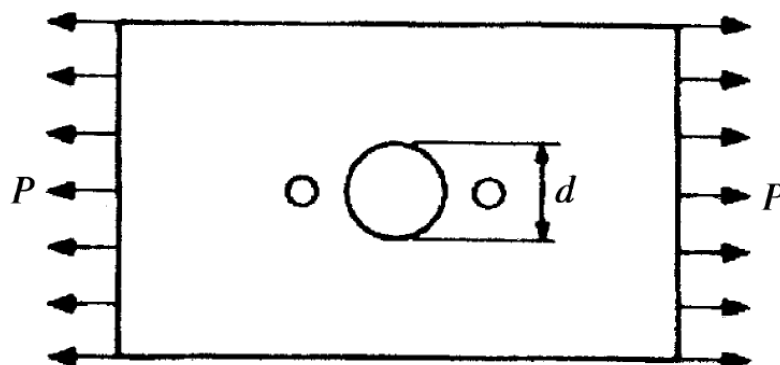
Figura 21 – Mudança no formato do furo para uma elipse para alívio de tensões.



Fonte: Young e Budynas (2002).

Na Figura 22 os furos feitos numa mesma linha de ação e próximos o suficiente para aproximar-se de uma elipse, é uma saída mais conveniente e prática.

Figura 22 – Aliviadores numa placa com furo central



Fonte: Young e Budynas (2002).

Dessa forma a tensão será melhor distribuída e não se concentrará em um lugar somente, essa solução pode ser aplicada em outras situações semelhantes, como em entalhes, rasgos, rebaixos ou qualquer descontinuidade que se provoque tensões concentradas como foi apresentado, e cada uma dessas soluções pode ser aplicada de forma a depender da necessidade do projeto, se é possível a retirada de material e se existem lugares mais favoráveis para aplicação dos aliviadores.

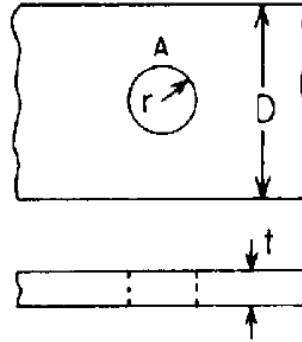
3.1.7 Fator concentração de tensão

Para se encontrar o fator concentração de tensão de algum espécime em solicitação mecânica, podem ser usados gráficos, simulação por elementos finitos, fórmulas numéricas ou mesmo testes experimentais. Todos esses modos fornecem bons resultados para utilizar no projeto que se deseja pesquisar e implementar. A utilização de gráficos e fórmulas numéricas são bem úteis quando se deseja algo a curto prazo, e autores como Hibbeler (2010), Norton (2013) e Budynas (2002) apresentam fórmulas simples acompanhadas de gráficos que facilitam na determinação desses dados.

Na Figura 23 é apresentado um elemento de material não especificado com furo central em tração com as medidas bem determinadas para aplicação nas equações apresentadas pelos autores Young e Budynas (2002). A Equação 6, que demonstra o fator de concentração de tensão elástica na faixa estática (K_t) exatamente para essa situação, multiplica a tensão nominal (σ_{nom}) e tem como resultado a tensão máxima ($\sigma_{máx}$), como mostra a Equação 6. O material não influencia na determinação dessa constante, mas as medidas devem ser bem especificadas para que não se tenha uma porcentagem de erro elevada, pois deve-se considerar que no

experimento se tem diversos fatores que dificultam a aproximação de um resultado perfeito, devido a isso é necessário realizar testes com controle rigoroso.

Figura 23 – Placa com furo central



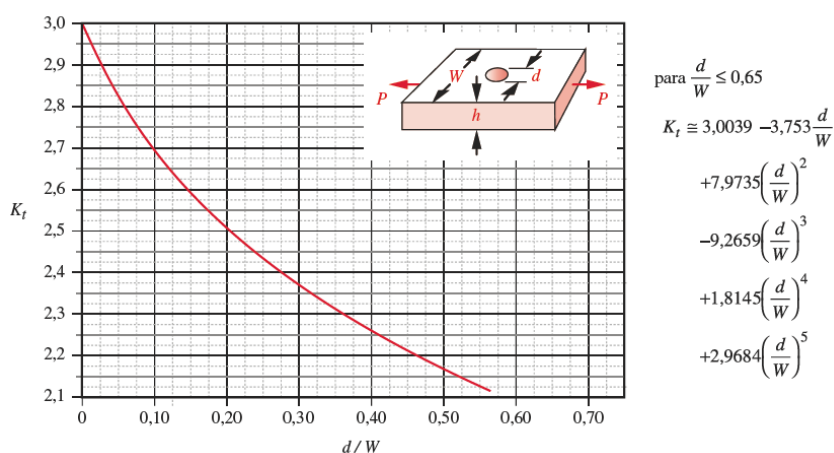
Fonte: Budynas (2002).

$$K_t = 3,00 - 3,13 \left(\frac{2r}{D} \right) + 3,66 \left(\frac{2r}{D} \right)^2 - 1,53 \left(\frac{2r}{D} \right)^3 \quad (5)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{t(D - 2r)} \quad (6)$$

É possível também se utilizar de gráficos como apresenta Norton (2013) na Figura 24, que chama o K_t de fator geométrico de concentração de tensão, nesse caso tem-se uma precisão um pouco inferior. Aqui é mostrado para a mesma situação anterior, uma placa com furo central e também para uma situação em que a relação de razão do diâmetro do furo com a largura da placa seja maior que ou igual a 0,65, dessa forma utiliza-se as equações dispostas pelo autor, que foram calculadas através de experimentos e pesquisas matemáticas, referenciadas na sua obra, desenvolvidas para adequar-se o mais próximo possível dos dados apontados na literatura para cada caso específico (PILKEY, 2008).

Figura 24 – Gráfico para o fator geométrico de concentração de tensão numa placa com furo central em tração axial.



Fonte: Norton (2013).

3.2 Correlação de Imagem Digital

A utilização de técnicas avançadas para determinar os esforços numa determinada situação em um corpo qualquer, tem colocado os resultados de ensaios mecânicos em um nível elevado quando se trata de precisão nos resultados. A CID é o exemplo mais recente e consegue através de um código computacional determinar campos de deslocamentos e deformações sofridos numa superfície por meio de imagens registradas da superfície em estudo antes e depois de um carregamento aplicado.

Técnicas extensométricas, como o uso de extensômetros de resistência elétrica, tem a restrição de fornecer dados de deformações somente em pontos específicos, pois os componentes são colocados em pontos estratégicos na superfície estudada. Para eliminar essa limitação, surgiram as técnicas ópticas, tais como a interferometria holográfica ou Holografia e a técnica de Moiré. Contudo essas técnicas possuem também restrições, pois são realizadas em ambiente controlados com iluminação especial, isolamento de vibração e eliminação de ruídos. E atualmente a técnica CID vem ganhando espaço nas medições de deformação devido não se restringir como as técnicas citadas, pois não necessita de componentes ópticos, mas requer a utilização de uma câmera de alta resolução disposta de uma lente focal de desempenho satisfatório e livre de distorções (BARRETO JUNIOR, 2008).

Ao longo dos últimos anos, desde que a técnica foi criada, pesquisadores Dos Santos; De Codes, Nonato (2014), entre outros que se dedicaram a técnica CID modificando os códigos

de análise de imagens e melhorando os equipamentos envolvidos na execução, com o intuito de torna-la mais simples de se aplicar, além de fornecer resultados mais confiáveis (RODRIGUES, 2014).

3.2.1 Conceituando a técnica CID

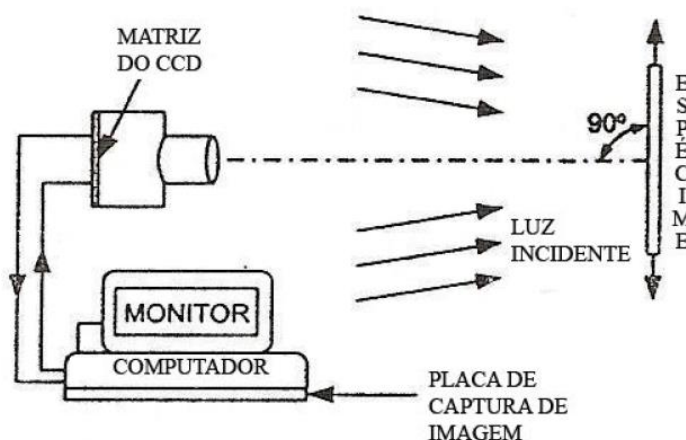
Como é descrito pelo nome da técnica, consiste num método óptico para apresentar campos de deslocamentos por imagens processadas sequencialmente, capturadas a uma determinada frequência (SKARŻYŃSKI, 2011). Essa técnica é utilizada sem contato direto, é flexível e de integração fácil com a máquina de ensaios mecânicos (PEREIRA, 2010).

O método óptico-numérico foi desenvolvido de modo a se utilizar de câmeras digitais com boa resolução (SHARPE, 2008). Uma das maiores vantagens desse método, que além de ser relativamente simples, por utilizar equipamento que exige somente o básico do conhecimento, é possível determinar os campos de deslocamento e as deformações com a estrutura em operação (CALDEIRA, 2013). Com isso, conclui-se que qualquer tipo de componente pode ser analisado, sem depender do material que é constituído.

Encontrar uma quantidade considerável de correlação entre regiões limitadas na superfície do espécime, é seu objetivo inicial, quando o mesmo se encontra nos estados de não deformado e de deformado. A superfície tem que ser tratada para que seja gerada um padrão aleatório, fazendo uso da câmera de alta resolução as imagens são capturadas e posteriormente processadas por um algoritmo computacional específico de correlação de imagens, tendo como resultado as os campos de deslocamentos.

A concepção do método é simples, no qual uma câmera é posta de tal forma a capturar imagens da superfície a ser estudada, assim como mostrado na Figura 25. Luzes colocadas estrategicamente e numa distância apropriada para enquadramento correto do espécime, conforme Barreto Junior (2008) apresenta na Figura 25, a imagem é armazenada no HD por meio da placa de captura de vídeo, dispositivo no qual a digitalização dos sinais analógicos da CCD ou Dispositivo de Carga Acoplada (*Charge-Coupled Device*) são processados.

Figura 25 – Acessórios utilizados para realização da técnica de CID.



Fonte: Barreto Junior (2008).

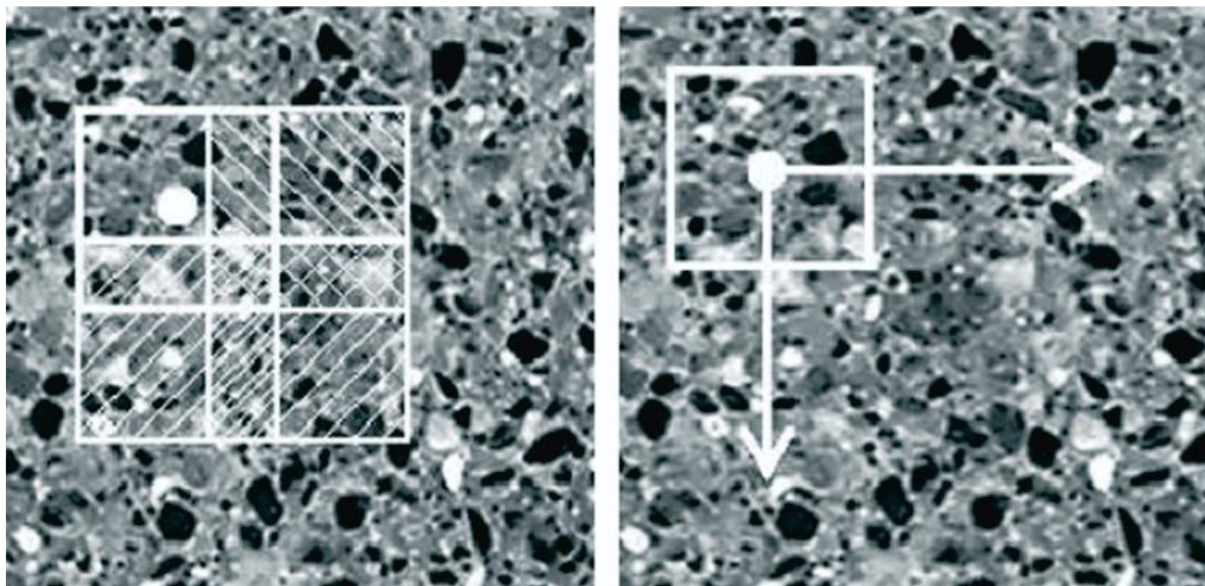
Essa técnica usa padrões de texturas artificiais ou naturais, de modo a se ter pontos de texturas únicos que transmitem informações da superfície em análise para o computador (SUTTON, 2000). Como já mencionado, as imagens são capturadas por meio de câmeras de alta resolução, as quais possuem sensores sensíveis a luz, os pixels. Três números estão associados a cada pixel, de acordo com a quantidade de luz refletida do objeto fotografado. A luminosidade ou brilho é representado pela componente de cor Y, a tonalidade de azul pela componente Cb e a tonalidade de vermelho por Cr. Esse sistema interpreta intensidades diferentes de luz, assim como grava padrões de escalas de cinza, tornando cada ponto único em toda a superfície.

Três funções são essenciais para o bom funcionamento da técnica de CID, de acordo com Skarżyński (2011). O campo de intensidade da imagem, função de correlação e função de interpolação, são as funções, onde a primeira atribui aos pontos individualmente no plano bidimensional da imagem, um valor escalar, que determina Y, isto o quanto a luz está intensa naquele ponto no espaço físico. Níveis de cinza, numa imagem de 8 bits, são numericamente representados de 0 a 255, onde 0 é completamente preto e 255 é completamente branco.

Ao selecionar a área de interesse, subconjuntos são escolhidos, também chamados de padrões, como apresentado por SKARŻYŃSKI (2011) na Figura 26, onde 4 padrões são determinados, na Figura 26 o primeiro padrão pode ser observado, e de acordo com a imagem sequencialmente anterior, pouco ou nenhum deslocamento é notado, concluindo que não houve alteração nas posições cartesianas. A deformação é encontrada de acordo com a comparação de

imagens registradas subsequentemente pela câmera, que se posiciona numa distância fixa e com o seu eixo perpendicular à superfície do espécime.

Figura 26 – Lado esquerdo: a) 4 Padrões selecionados. Lado direito: b) Primeiro padrão destacado em imagem registrada subsequentemente.



Fonte: Skarzynski (2011).

Por meio da função correlação entre duas distribuições sucessivas da intensidade da luz em duas imagens digitais, um vetor é encontrado para cada padrão. A partir da primeira imagem, a função relaciona todos os padrões de cinza com a segunda imagem e calcula os deslocamentos existentes.

O sensor CCD é responsável apenas pela medição de intensidade de luz na imagem, que pode ser útil para produzir fotos nas texturas preto e branco, mas não coloridas. Normalmente o sensor é envolto por um filtro com seções do tamanho de pixels azuis, vermelhos e verdes, e a câmera recebe imagens que são formadas pelo mosaico dessas três cores. Posteriormente, um algoritmo é aplicado pela máquina capaz de estimar a cor ideal para cada pixel, sempre com base no nível de cor dos quadrados adjacentes. Por exemplo, se um determinado pixel aparece verde, o software da câmera é capaz de calcular a intensidade de vermelho e azul ao redor desse pixel, para assim encontrar a cor certa para ele. De certa forma essa estratégia acaba funcionando, já que os detalhes significativos de uma imagem costumam ser muito maiores do que os pixels do sensor, (HAMMACK, 2012).

De acordo com a Norma ISO/TC42N:1998, o armazenamento da imagem é percebido pela conversão do espaço de cor R-G-B para o espaço de cor Y-Cb-Cr, conforme mostrado pelas equações (7), (8) e (9).

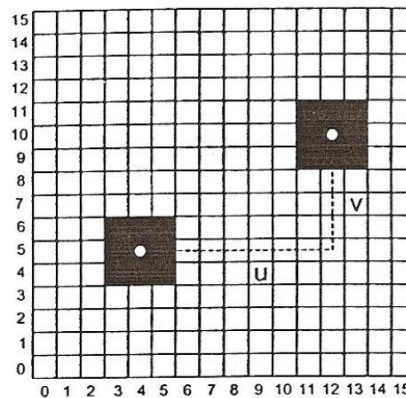
$$Y = 0,2989R + 0,5866G + 0,1145B \quad (7)$$

$$C_b = 128 - 0,168736R - 0,331264G + 0,5B \quad (8)$$

$$C_r = 128 + 0,5R - 0,418688G + 0,081312B \quad (9)$$

Para que a técnica atinja resultados satisfatórios, a textura do padrão na superfície do corpo de prova deve está bem visível e bem distribuídas de forma que seja possível a análise dos pontos pelo programa CorreliQ4®. Para explicar como o programa encontra esses pontos e determina a deformação, é apresentado um exemplo simples, representado na Imagem 27, no qual uma matriz quadrada de 16 pixels no eixo x e 16 pixels no eixo y, representa a matriz do CCD após registrar a intensidade de luz incidente no pixel, que chega a marca de mil pixels por linha e mil ou mais pixels por imagem (BARRETO JUNIOR, 2008).

Figura 27 – Matriz pixel de 16x16 com alvos.



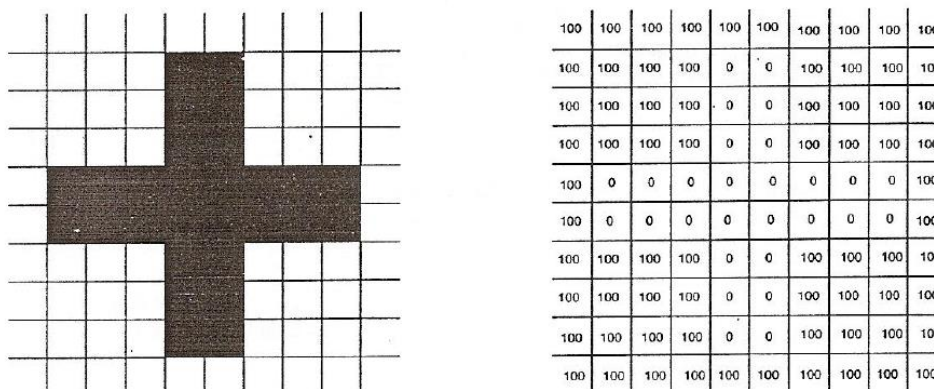
Fonte: Barreto Junior (2008).

Essa matriz possui um alvo de 3x3 pixel, em duas posições diferentes, que serão usados para mostrar a deformação que ocorreu. Antes da deformação o alvo de encontra representado na posição inferior ligeiramente no canto esquerdo da matriz, e o ponto branco que representa seu centro tem localização $x = 4 \text{ pixels}$ e $y = 5 \text{ pixels}$. O alvo se move no plano durante a deformação, e a nova posição do centro é $x = 12 \text{ pixels}$ e $y = 10 \text{ pixels}$, assim pode-se

determinar as componentes de deslocamento do centro, sendo elas $u = 12 - 4 = 8 \text{ pixels}$ e $v = 10 - 5 = 5 \text{ pixels}$. Portanto, conclui-se que a matriz de pixel tomada como exemplo, apresentou informações suficientes para determinar as componentes de deslocamento (u e v) no plano (BARRETO JUNIOR, 2008).

Diferentemente do exemplo anterior, que o centro do alvo é determinado facilmente, na Figura 30 tem-se um alvo que se assemelha a realidade, no qual o alvo não é centralizado em um pixel. Representado por um sinal de + e formado por dois conjuntos de pixels $2 \times 8 \text{ pixels}$ atravessados um com relação ao outro. O sinal de + preto é localizado na matriz $10 \times 10 \text{ pixels}$ na Figura 28-a, e na Figura 28-b é mostrado a digitalização da matriz CCD, que é a leitura de intensidade de luz para cada pixel, retornando valor 0 para ausência de luz e 100 para os pixels com luz.

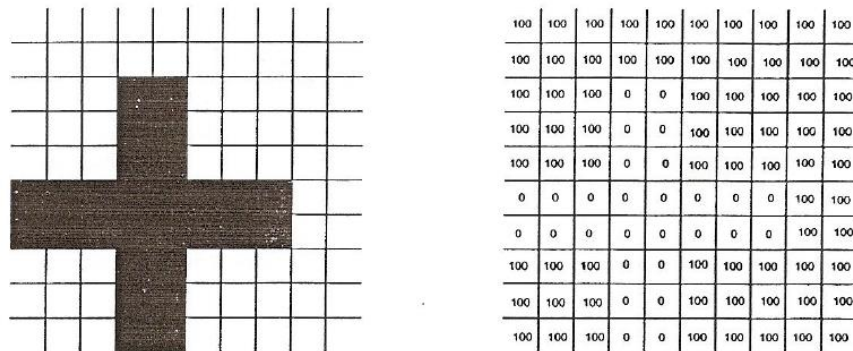
Figura 28 – Lado esquerdo: a) Sinal de + na matriz $10 \times 10 \text{ pixels}$. Lado direito: b) Leitura da intensidade luminosa em cada pixel pela matriz CCD.



Fonte: Barreto Junior (2008).

De modo a exemplificar uma deformação com esse tipo de situação, suponha que o espécime está deformado, onde o sinal de + move um pixel para baixo e para a esquerda, se comparado a matriz original. Com isso é formada uma nova matriz de intensidade de luz para os pixels, de acordo com a posição do sinal de + após o deslocamento, representado a seguir na Figura 29. A grande questão nessa situação é encontrar os dados de luminosidade referente a nova posição do sinal de +, e esse problema é resolvido utilizando o método CID. Um subconjunto de pixels que rodeiam o alvo, englobando suas características principais do padrão de intensidade de luz, é a fase inicial do processo.

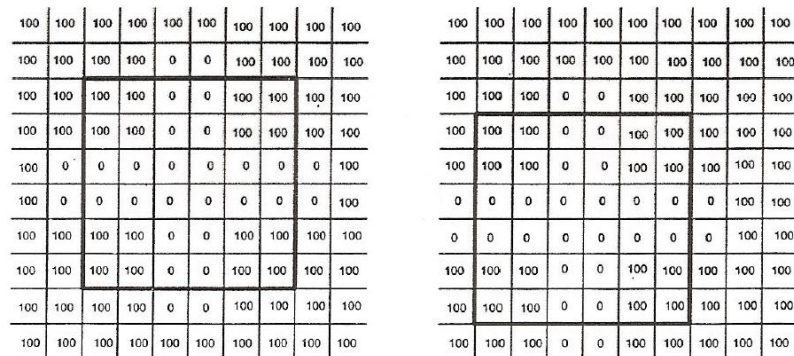
Figura 29 – Lado esquerdo: a) Nova posição do sinal de +. Lado direito: b) Leitura da intensidade luminosa em cada pixel pela matriz CCD da nova posição do sinal de +.



Fonte: Barreto Junior (2008).

Na Figura 30, esse subconjunto é um bloco de *6x6 pixels*, no centro do sinal de +. Esse padrão é comparado com a imagem após a deformação para ser encontrado o mesmo bloco de intensidade de luz. O centro do alvo é determinado a partir do momento que é encontrado o padrão, determinando as componentes de deslocamento em pixels (BARRETO JUNIOR, 2008)

Figura 30 – Lado esquerdo: a) Padrão 6x6 pixels de intensidade luminosa do centro do sinal de +. Lado direito: b) Padrão 6x6 pixels encontrados.

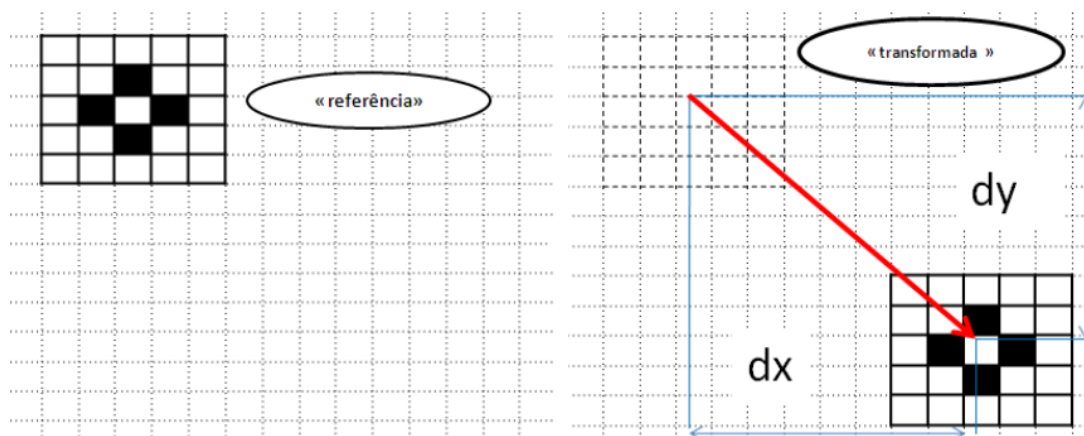


Fonte: Barreto Junior (2008).

Utilizando o programa CoriliQ4®, essa textura de escala de cinza é determinada pela zona de interesse, do inglês *Zone of Interest*, ou simplesmente ZOI. Essa ferramenta é usada para que não se tenha resultados errôneos devido a quantidade de pixels numa imagem com o mesmo valor na escala de cinza, a qual varia de 0 a 255. A ferramenta nesse caso atua como sendo a região com uma quantidade de pixels conhecida cujo centro é a origem dos vetores *i* e *j*. A ZOI de referência é determinada na imagem de referência ou imagem antes da deformação, a ZOI transformada é encontrada na imagem após a deformação ou imagem transformada, como

pode ser visto na Figura 31. Usando e mesmo conceito dos alvos apresentados anteriormente, a qual se tem um subconjunto de interesse englobando as informações relevantes, é comparada então com a imagem transformada ou após a deformação superficial devido um carregamento aplicado (BENTES, 2010).

Figura 31 – Comparação da ZOI da imagem da imagem original com a imagem transformada.



Fonte: Bentes (2008).

3.2.2 Preparação do método

A utilização do método se dá primeiramente com o tratamento superficial, onde deve ser realizada uma pintura com tintas preto e branco. Os padrões mostrados anteriormente são excelentes para se determinar os deslocamentos, mas caso sejam aplicados alvos iguais em toda a superfície, a técnica se confunde com tantos alvos idênticos. Barreto Junior (2008, p. 49), exemplificou a situação, supondo que um conjunto de 1000 quadrados foram determinados sobre a superfície a ser analisada, e imagens foram registradas antes e depois da deformação, afirma que: “O experimento seria um fracasso, porque seria impossível distinguir um quadrado dos outros 999.”. Então, para resolver isso, cada alvo na superfície deve ter sua forma específica, única para se diferenciar das demais, assim a técnica conseguirá localizar o alvo corretamente. A Figura 32 mostra um exemplo de textura com alvos únicos.

Figura 32 – Exemplo de textura para técnica CID.



Fonte: Barreto Junior (2008).

A formação desse alvo pode ser feita com técnicas de pintura simples, como por exemplo a usada nesse trabalho experimental, uma tinta preta fosca é pulverizada na superfície do espécime, recobrindo-a completamente, e em seguida pulverizando levemente tinta branca ou tinta que reflita a luz. Aqui foi usado tinta branca em spray.

A câmera deve estar posicionada para capturar as melhores imagens da superfície durante o ensaio, e conectada em um computador com programa específico para o modelo da mesma, para controlar o início de cada foto tirada, pois deve estar sincronizada com a máquina de tração para os dados não serem dispersos. A máquina de ensaios de tração fornece dados de força em newtons e deformação em milímetros para cada tempo em segundos, e as análises das imagens depende do tempo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente sessão será apresentado o processo de preparação dos espécimes (Barras de aço SAE 1020, adquiridas por doação da empresa Casa da Cerâmica com sede em Russas/CE, especializada na fabricação de máquinas de mineração) qual material utilizado e as descontinuidades inseridas nos mesmos. Foram utilizadas as máquinas de usinagem da Universidade Rural do Semiárido (UFERSA) em Mossoró-RN, do departamento de Engenharia Mecânica, com supervisão do técnico responsável do laboratório, seguindo todas as normas de segurança, utilizando os equipamentos de segurança individual (EPI's).

A câmera utilizada foi uma EOS 60D da marca Canon®, montada em um tripé na altura que enquadrasse a superfície do corpo de prova a ser analisada, e que a lente estivesse perpendicular à essa superfície. Na Figura 33, pode ser observado a armação da câmera para realização do ensaio.

Figura 33 – Armação da câmera Canon® EOS 60D no tripé.



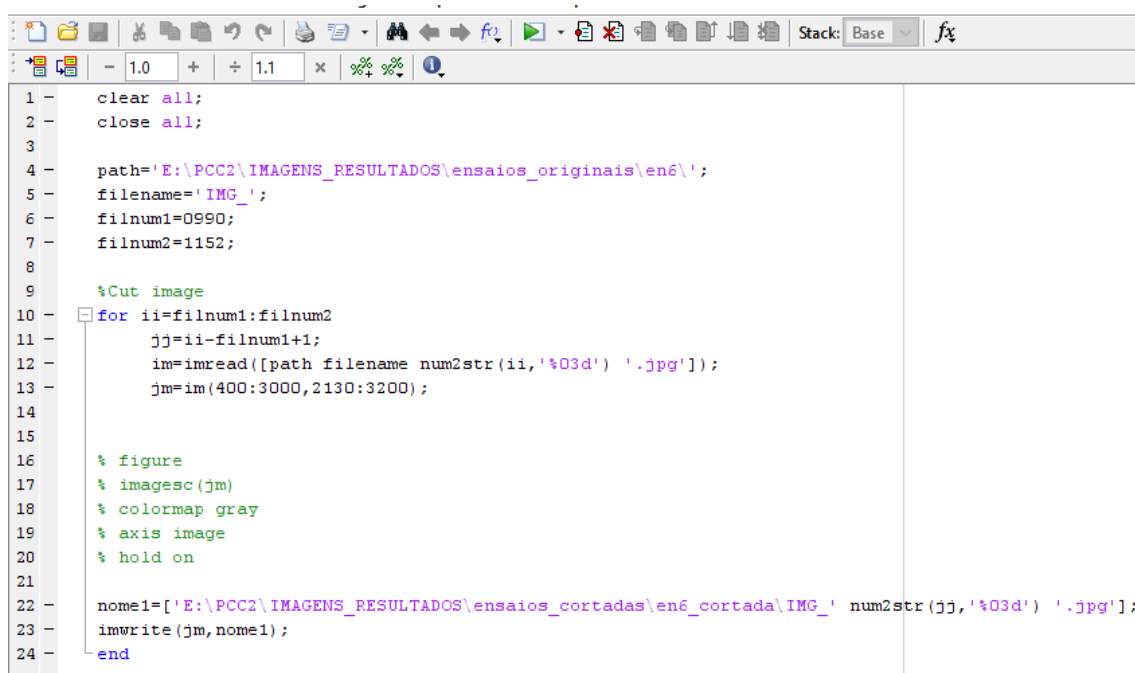
Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com o modelo da câmera utilizada, foi instalado o software disponibilizado pelo fabricante (EOS Utility®), que de acordo com o site do fabricante¹ facilita a transferência de imagens da câmera EOS para o computador. Pode transferir todas as imagens em simultâneo

¹ Disponível em: <<https://www.usa.canon.com/internet/portal/us/home/support/details/cameras/eos-dslr-and-mirrorless-cameras/dslr/eos-60d/eos-60d?subtab=downloads-software>> Acesso em 24 de março de 2019.

ou selecionar imagens individuais para transferência, controlando então o momento de cada foto, que no caso desse experimento foi de 5 segundos entre as fotos. O código de programação PVC_S_03_cut_image.m desenvolvido por Codes (para o tratamento das imagens, no software MATLAB® facilitou o processo de corte, mostrado na Figura 34, pois é importante que se tenha somente as informações da superfície do espécime na fotografia a ser analisada, sendo cortada elementos como as garras e a parede que aparece ao fundo.

Figura 34 – Código PVC_S_03_cut_image.m utilizado para corte das imagens.



```

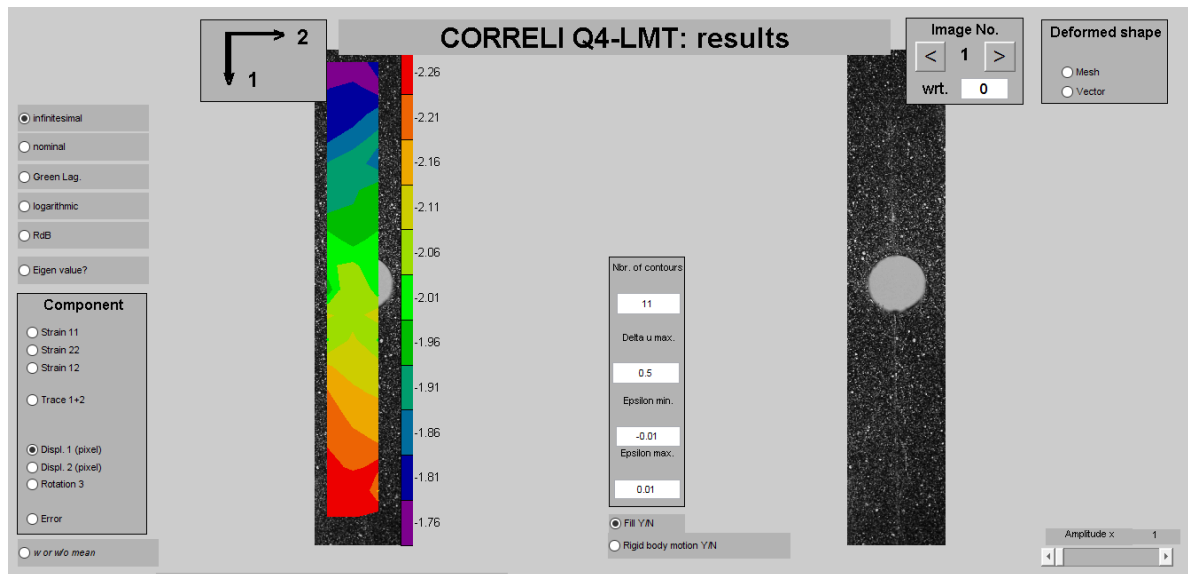
1 - clear all;
2 - close all;
3
4 - path='E:\PCC2\IMAGENS_RESULTADOS\ensaios_originais\en6\';
5 - filename='IMG_';
6 - filnum1=0990;
7 - filnum2=1152;
8
9 - %Cut image
10 - for ii=filnum1:filnum2
11 -     jj=ii-filnum1+1;
12 -     im=imread([path filename num2str(ii,'%03d') '.jpg']);
13 -     jm=im(400:3000,2130:3200);
14
15
16 - % figure
17 - % imagesc(jm)
18 - % colormap gray
19 - % axis image
20 - % hold on
21
22 - nome1=['E:\PCC2\IMAGENS_RESULTADOS\ensaios_cortadas\en6_cortada\IMG_' num2str(jj,'%03d') '.jpg'];
23 - imwrite(jm,nome1);
24 - end

```

Fonte: Autoria própria (2019).

O software MATLAB® também foi usado para analisar as texturas das imagens através do programa CorreliQ4®, o qual foi encontrado a porcentagem válida para a ZOI de cada imagem para que o programa pudesse executar corretamente a técnica CID. Foi encontrado que a ZOI 128 (de tamanho 128 pixels) tenha a maior porcentagens de valores válidos para os ensaios. Todos os ensaios foram realizados com a ZOI de tamanho 128 pixels. Um arquivo com os dados dessa análise são salvos no HD do computador, e na mesma janela do programa CorreliQ4® pode ser selecionada a opção *visualization* para analisar esses resultados, a Figura 35 mostra o resultado do ensaio do corpo de prova 01 no tempo 5s, para que entenda-se como se comportou o corpo de prova ao ser carregado, e quais regiões teve os melhores resultados para serem analisados com o comando *gauge*. A escala de cores ao lado é dada em pixels, sendo 1 pixel = 0.0002645833 metros.

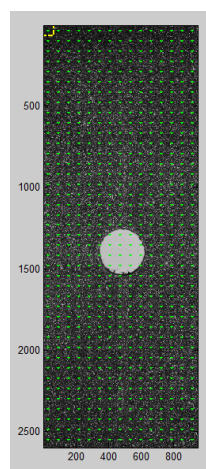
Figura 35 – Visualização da deformação do corpo de prova 01 no tempo 5s na direção 1 ou direção x



Fonte: Autoria própria (2019).

Após a visualização das regiões que foram analisadas, é utilizado o comando *gauge* no MATLAB® dentro do programa CorriQ4®, para encontrar cada deformação nos eixos x e y. O comando pede então para determinar a região da imagem que deve ser feito o processo de análise, como apresentado na Figura 36, optou-se para a área que se encontrava a descontinuidade, pois as maiores tensões se encontravam nessas proximidades.

Figura 36 – Imagem selecionada para análise dos deslocamentos.



Fonte: Autoria própria (2019).

Após esses procedimentos, é retornado o valor de cada deformação de imagem para imagem. De modo que é possível determinar os parâmetros necessários para encontrar o fator concentrador de tensão.

4.1 Dimensões do espécime

Construções mecânica, projetos de máquinas, e diversos componentes estruturais utilizados para fins mecânicos, de movimentos ou processos industriais por exemplo, tem sua composição em aço, e pensando no mercado de aço disponível ao consumidor, seja ele industrial ou comum, em lojas especializadas, escolheu-se o aço SAE 1020 laminado em barras chatas de sessão transversal 1"x1/4 (uma polegada de largura por um quarto de polegada de espessura). E para demonstrar a descontinuidade, um furo qualquer foi feito no centro da barra representado na Figura 37.

Figura 37 – Barra chata 1"x1/4 utilizada no ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2019).

Seis barras foram usinadas utilizando uma máquina de corte fresadora para determinar um comprimento de 200 mm, esse comprimento foi calculado de acordo com as especificações da máquina de ensaios modelo DL10000, eletromecânica, marca EMIC de tração, do Laboratório de Ensaio Mecânicos da UFERSA como pode ser identificado na figura 38.

Figura 38 - Máquina de ensaios modelo DL10000



Fonte: Autoria Própria (2019)

Ela tem um limite de distância para fixar as extremidades do corpo de prova nas garras de 50 mm, por segurança e acompanhamento do técnico responsável pelo laboratório de ensaios mecânicos, optou-se por 45 mm para cada extremidade, uma vez que a máquina comporta até 50mm, como marcado na Figura 39.

Três barras foram novamente usinadas, utilizando uma fresadora da marca Diplomat® 3001 FvF 2000, na empresa Casa da Cerâmica® localizada em Russas/CE, para adquirir as dimensões especificadas da norma ASTM E8 (1992), como apresentado na Figura 39. A fresadora em questão só aceitava comandos manuais, portanto as peças têm pequenas variações em suas medidas finais.

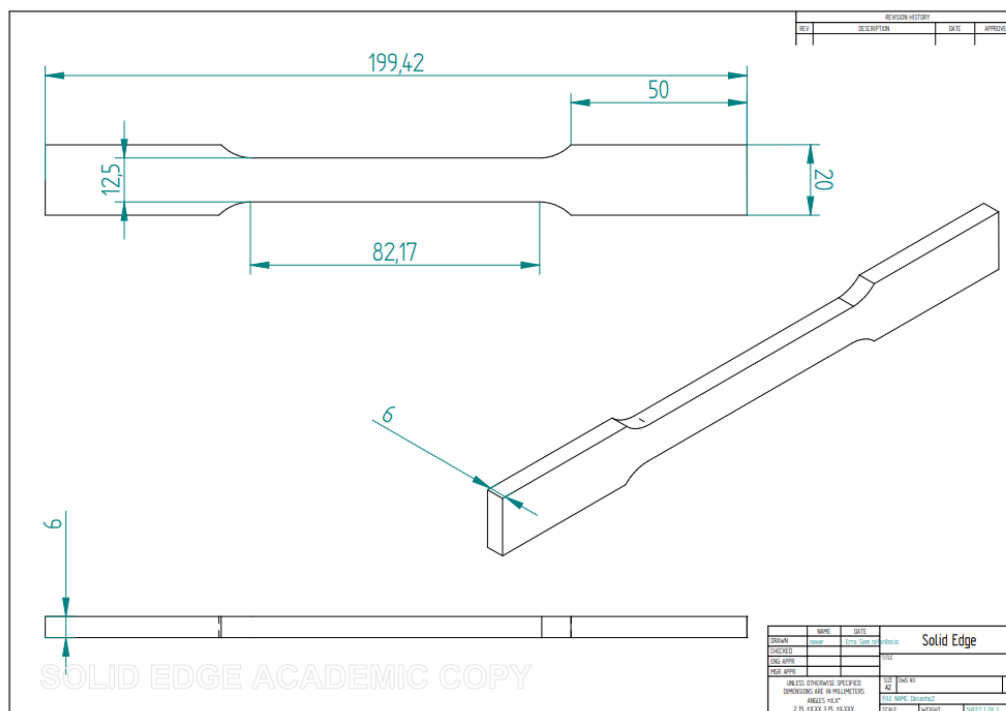
Figura 39 – Corpo de prova usinado antes de receber a descontinuidade no centro.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 40 é mostrada as medidas base de acordo com a norma ASTM E8 (1992).

Figura 40 – Corpo de prova nas medidas da norma ASTM E8 (1992).



Fonte: Autoria própria (2019).

A Tabela 1 descreve as medidas para cada corpo de prova ou CP. Todas as barras usinadas passaram por processo de furação, utilizando uma furadeira de coluna Clark® FC 34A, no laboratório de usinagem da UFERSA/RN, usando uma broca helicoidal em aço rápido de 6 mm de diâmetro.

Tabela 1 – Dimensões de todos os corpos de prova e suas especificações.

	De acordo com a norma ASTM E8				Somente cortado	
Dimensões (mm)	CP_01	CP_02	CP_03	CP_04	CP_05	CP_06
Compr. útil	74	76	80	110	109	111
Largura	12,2	12,4	12,2	25,4	25,4	25,4
Espessura	6	6	6	6,35	6,35	6,35

Fonte: Autoria própria (2019).

A partir desses dados da Tabela 1, é possível determinar o valor da seção transversal de cada corpo de prova, mostrados na Tabela 2 para determinação da tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para determinação do K_T . CP é o corpo de prova correspondente.

Tabela 2 – Seção transversal em mm² dos corpos de prova.

	<i>Seção transversal (mm²)</i>
<i>CP_01</i>	37,2
<i>CP_02</i>	38,4
<i>CP_03</i>	37,2
<i>CP_04</i>	123,19
<i>CP_05</i>	123,19
<i>CP_06</i>	123,19

Fonte: Autoria própria (2019).

Lembrando que existe um furo no centro da peça, portando esse furo de 6 mm em todas as peças que deve ser considerado no momento do cálculo da área da seção transversal da barra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados experimentais analisados foram os valores de força x deformação coletados na máquina de tração, os quais são informados assim que o corpo de prova rompe. A máquina informa os dados de deformação em milímetros e força em newtons para cada instante de tempo em segundos. Com esses dados é possível determinar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{e}d}$ para cada corpo de prova. A Tabela 3 mostra esses dois dados para cada CP's. Com isso calcula-se K_T para todos os CP's desses dados fornecidos pela máquina.

Tabela 3 – Tensões máximas e médias pelos dados fornecidos pela máquina de ensaios de tração.

	<i>Tensões em Mpa</i>		
	$\sigma_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{m\acute{e}d}$	K_T
<i>CP_01</i>	617,956	166,650	3,708
<i>CP_02</i>	253,125	65,198	3,882
<i>CP_03</i>	529,946	173,458	3,055
<i>CP_04</i>	414,376	164,992	2,511
<i>CP_05</i>	446,156	239,767	1,860
<i>CP_06</i>	444,687	221,801	2,004

Fonte: Autoria própria (2019).

Para relacionar os dados fornecidos pela técnica CID, que são os dados de deformação, foi usado a fórmula do módulo de elasticidade juntamente com a Lei de Hooke, referenciada por Mascia (2006). A Equação 10 mostra o módulo de elasticidade (E), daí podemos relacionar com a Equação 4 (K_T) resultando dessa forma no fator de concentração pela técnica CID (K_{CID}).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

Com essas informações juntamente com os dados fornecidos pela máquina de ensaios mecânicos, podemos determinar os valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ e deformação máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$) devido o código “gauge” no programa CorrilQ4®, o módulo de elasticidade e o K_{CID} , sendo possível formar a Tabela 4, cujo os dados de deformação são da direção 1-1 de acordo com o eixo mostrado anteriormente.

Tabela 4 – Dados resultantes do código *guage* do programa CorreliQ4®.

	<i>Guage $\varepsilon_{m\acute{a}x}$</i>	<i>Guage E (Mpa)</i>	<i>Guage $\sigma_{m\acute{a}x}$ (Mpa)</i>	<i>$\sigma_{m\acute{e}d}$ (Mpa)</i>	<i>K_{CID}</i>
CP_01	0,43788032	1863,399716	815,946064	392,3971749	2,079388
CP_02	0,001062772	113884,0929	121,0328138	56,56761301	2,139613
CP_03	0,000937378	77049,18474	72,22423073	39,00715307	1,851564
CP_04	0,000867738	227245,407	197,1894023	80,81385551	2,440044
CP_05	0,43788032	1212,74536	531,0373261	215,6566065	2,462421
CP_06	0,070858808	7260,911064	514,499503	217,0662998	2,370241

Fonte: Autoria própria (2019).

Na coluna *Guage $\varepsilon_{m\acute{a}x}$* (coluna 1), observa-se os resultados de deformação no sentido 1-1, que variam de acordo com a tensão máxima registrada na coluna *Guage $\sigma_{m\acute{a}x}$* . Observa-se que as tensões mais elevadas, no CP_01 e CP_05, resultaram nas maiores deformações. Na coluna *Kcid*, tem-se o quociente da tensão máxima com tensão média.

Após várias interações e aplicando as fórmulas corretamente em cada corpo de prova, pode-se então montar a Tabela 5 que apresenta os dados com relação a máquina de ensaios mecânicos, as interações realizadas pela técnica CID e com as dimensões do espécime, sendo esse último a referência da literatura para comparação dos demais fatores. O Erro1 corresponde a K_T e o Erro2 ao K_{CID} .

Tabela 5 – Os fatores K para cada dado encontrado com a máquina de ensaios, a técnica de CID e pela literatura.

	K_T	K_{CID}	K_t	Erro1 (%)	Erro2 (%)
CP_01	3,708096	2,079388	2,163904	71,36139	3,905709
CP_02	3,882376	2,139613	2,169071	78,98794	1,358091
CP_03	3,055172	1,851564	2,163904	41,18797	14,43411
CP_04	2,511492	2,440044	2,444691	2,732469	0,190074
CP_05	1,860788	2,462421	2,444691	23,88453	0,725231
CP_06	2,163904	2,370241	2,444691	11,48559	3,045371

Fonte: Autoria própria (2019).

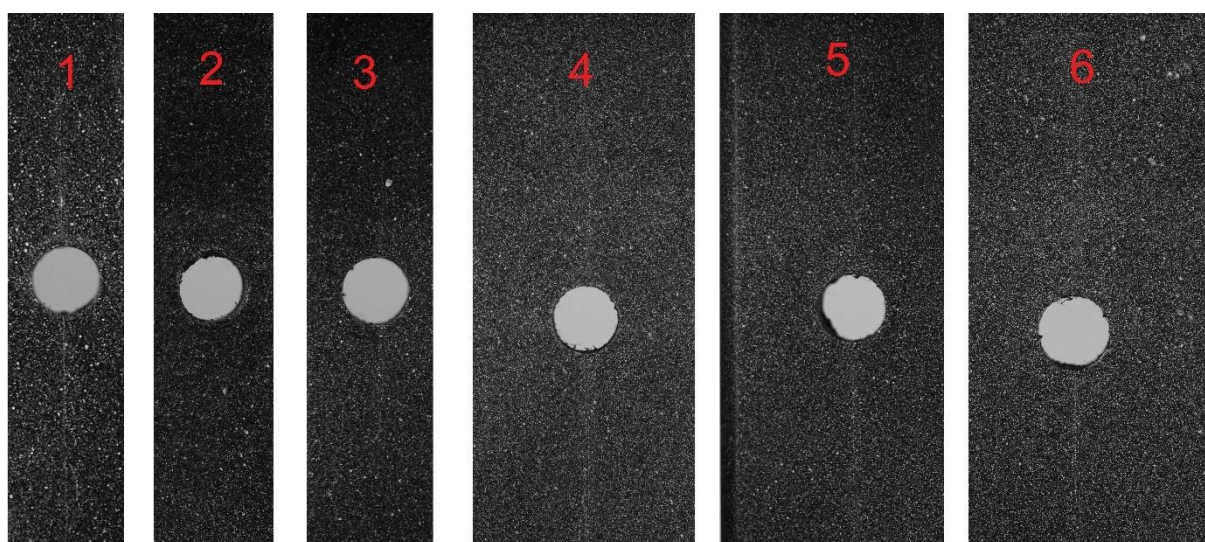
De acordo com os resultados encontrados para K_T , observa-se que existe uma diferença considerável quando comparado aos resultados de K_t , associando um erro que varia de 2,732%

no CP_04 a 78,987% no CP_02. Já para a coluna correspondente ao Kcid, verificou-se uma aproximação maior com um erro variando de 0,19% no CP_04 a 3,905% no CP_01.

5.1 Resultados usando os programas no MATLAB®

Figura 39 corresponde as imagens cortadas usando o código PVC_S_03_cut_image.m apresentado na Figura 34.

Figura 41 – Imagens cortadas pelo MATLAB®.

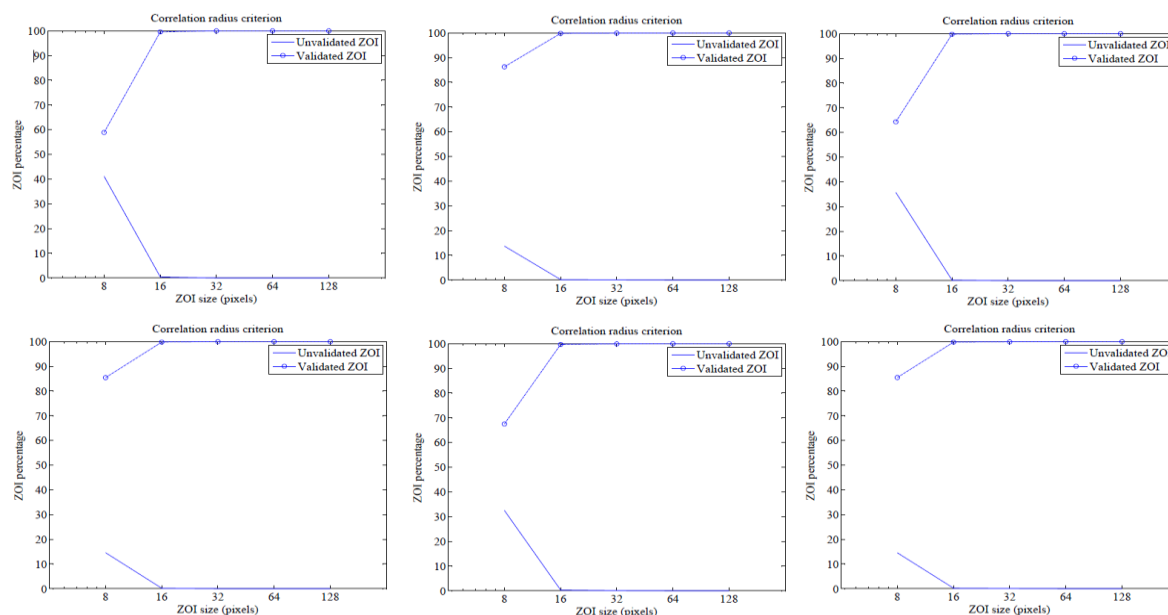


Fonte: Autoria própria (2019)

A textura das imagens é fortemente influenciada pela luminosidade, com o intuito de melhorar a luz incidente na superfície, usou-se lâmpadas LED posicionadas estrategicamente para evitar sombra devido os equipamentos.

A determinação das ZOI é diretamente dependente da textura em questão, pois é a partir de uma boa textura que o programa consegue analisar uma área satisfatória para que se tenha resultados esperados entre as interações. Na Figura 41 são organizados da esquerda para a direita, as ZOI de cada primeira imagem cortada, determinando assim o tamanho de cada ZOI para as interações. Determinou-se então 128 pixels para todas. Em cada gráfico têm-se duas linhas que determinam se a ZOI está válida e sua porcentagem.

Figura 42 – Gráficos de cada primeira imagem dos ensaios mostrando a ZOI válida para análise.



Fonte: Autoria própria (2019).

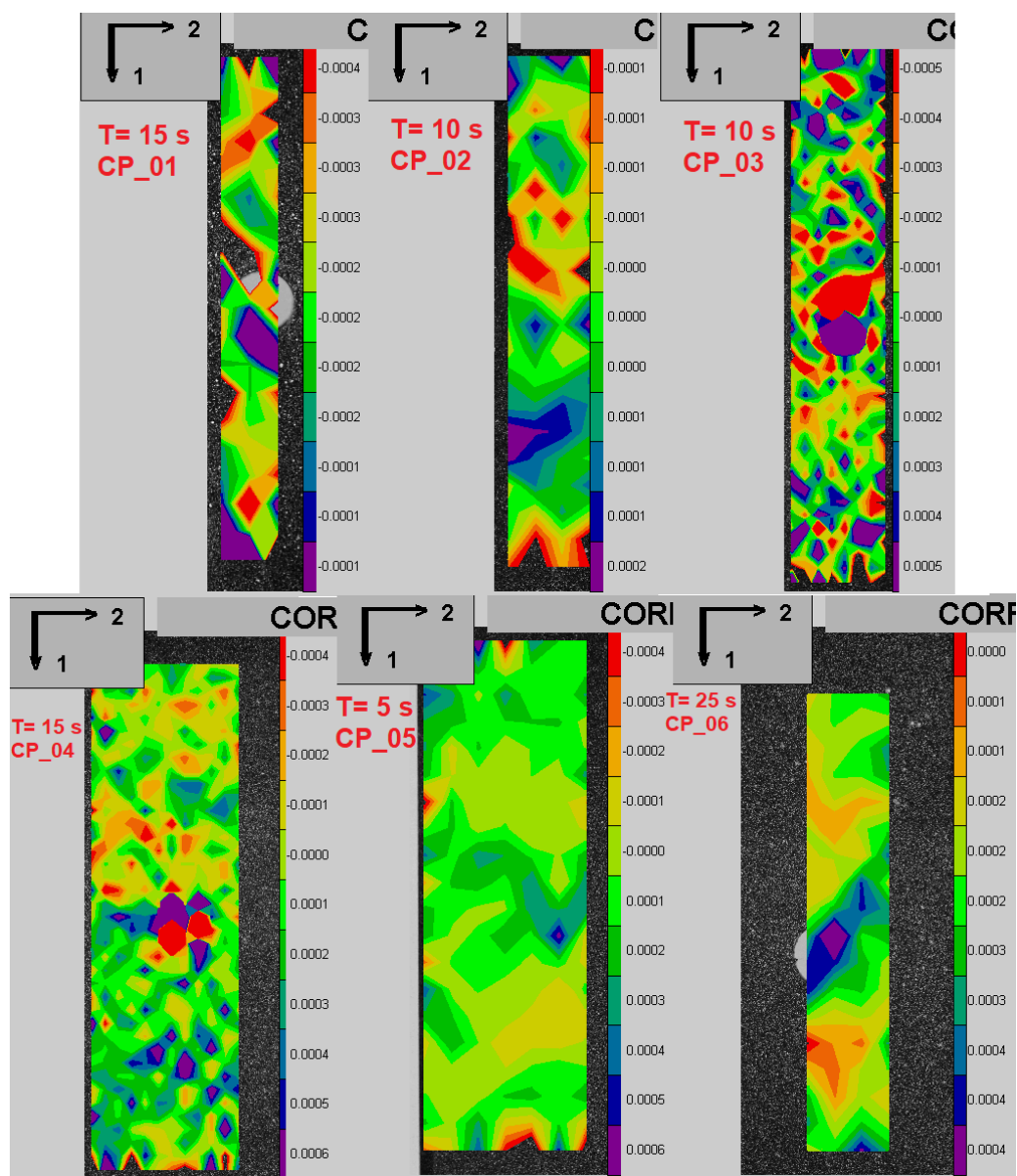
A Figura 42 apresenta informações dos campos de deformações que o programa CorriliQ4® conseguiu reconhecer na imagem de referência. As imagens estão organizadas da esquerda para a direita dentro da Figura 42, indicando o primeiro ensaio no canto superior esquerdo e o último no canto inferior direito, é descrito na imagem o tempo que a imagem foi registrada e o CP correspondente.

Quando mais imagens são analisadas menor é a área que o programa consegue reconhecer e analisar, devido erros ou variações tão bruscas que os alvos antes memorizados são perdidos pois não tem a mesma escala de cinza por exemplo.

A visualização do que o programa está fazendo, ajuda a perceber como se comporta a superfície do elemento, já que existe uma descontinuidade, percebe-se variações de deformação maiores nas suas proximidades. Os dados da escala são dados em pixels.

O último passo no processo usando o MATLAB® seria a criação do guage de cada conjunto de interações, para que não ocorra erro de leitura nessa etapa, deve-se selecionar a área dentro da imagem que esteja colorida, pois significa que dentro dessa área o programa tem dados, fora dela não é possível determinar as deformações.

Figura 43 – Visualização dos campos de deformação 1-1 para auxiliar nas análises e selecionar as áreas do guage.



Fonte: Autoria própria (2019).

O CP_02 no tempo 10 segundos, pode-se visualizar a deformação de 0,0002 na direção 1, na extremidade inferior e nas proximidades da descontinuidade. Já no CP_03, houve uma deformação de -0,0005 pixels na direção 1 no tempo de 10 segundos, nas proximidades do furo, e 0,0006 pixels em 15 segundos de ensaio no CP_04, também nas redondezas da descontinuidade. No CP_05 com o tempo de 5 segundos, houve -0,0004 pixels nas extremidades superior e inferior na direção 1, mas próximo a descontinuidade teve somente 0,0001 pixels de deslocamento. Por último no CP_06 no tempo de 25 segundos, ocorreu 0,0004 pixels de deslocamento, mas com uma área menor reconhecida pelo software.

5.2 Discussão

Com o rastreamento de pontos individuais de uma amostra é possível o cálculo dos deslocamentos internos da amostra fotografada, de forma com que noções de campo de deformações e tensões desenvolvidas ao longo do corpo de prova possam ser calculadas. O presente trabalho apresentou uma maneira de conseguir determinar os deslocamentos de pontos mediante a técnica de Correlação de Imagens Digitais, analisando e processando imagens sequenciadas, usando a correspondência de pontos.

Para o trabalho, foi preparado dois modelos de corpo de prova, os quais passaram por tratamento superficial, se baseando nos modelos de Barreto Junior (2008). Técnicas de Correlação de Imagens, interpolação bidimensional e computação de alto desempenho foram incorporadas ao trabalho.

A sustentação dos resultados foi feita usando o modelo apresentado na literatura por Young (2002). Os corpos de prova demonstraram comportamento semelhantes nas proximidades do furo ao longo de cada ensaio. O ambiente computacional apresentou bons resultados no cálculo dos campos de deslocamento dentro da região elástica. Mas em especial no corpo de prova 3, observou-se os maiores erros. Nesse caso pôde-se interpretar que a luminosidade apresentada na Figura 42, influenciou na leitura dos pontos específicos na superfície pelo CCD, pois existia sombra devido o mal posicionamento da iluminação artificial.

A máquina universal de ensaios usada nesse trabalho, forneceu o deslocamento da bandeja móvel sendo possível assim, que tornou possível o cálculo dos dados de deformação. No entanto esses dados são imprecisos, de acordo com os valores de tensão máxima na Tabela 3, pois os resultados para o fator de concentração de tensão teórico encontrados nessa etapa divergem consideravelmente quando comparados ao fator geométrico de concentração de tensão.

De forma geral, o trabalho mostrou que o cálculo de deslocamentos usando a técnica de correlação de imagens revela-se uma alternativa viável para análise do fator concentração de tensão. Entretanto, existe uma necessidade de implementação de um algoritmo mais sofisticado, que seja capaz de detectar imagens com menor quantidade de luz incidente. Mesmo assim, resultados bastantes satisfatórios foram obtidos, com o ensaio do corpo de prova 4 atingindo somente 0,19% de erro, o que implica no tipo de precisão que se espera do método CID.

6 CONCLUSÃO

Ao longo do trabalho foi percebido a importância que as técnicas modernas têm no meio acadêmico e também industrial. Cada peça dentro de um projeto mecânico é bem pensada de forma a garantir sua funcionalidade dentro do conjunto todo. E entender como esses materiais mecânicos se comportam em determinadas situações de esforço extremo, contribui para uma melhor adaptação de geometria, aumentando ou diminuindo a resistência desses componentes. O estudo de descontinuidades, é bastante relevante quando se trata de segurança, pois um descuido com os limites de carga suportada pode acarretar em prejuízos que vão além de danos materiais, sempre existe alguma pessoa correndo um risco de acidente, mesmo tomando todas as precauções.

As principais respostas para o problema lançado no início desse trabalho, que seria a comprovação da utilização da técnica CID em determinar o fator concentrador de tensão tomando como referência a literatura, mostrou-se bastante satisfatório, com um erro relativamente baixo, inferior a 5%, que comprova sua performance para essa finalidade. Contudo os resultados que a máquina de ensaios de tração da UFERSA da cidade de Mossoró/RN, mostrou-se com erro bastante elevado, não sendo recomendado o uso completo de seus dados. Supõe-se que o erro está associado a leituras errôneas devido ao escorregamento do espécime observado durante os testes, ou mesmo a capacidade de calcular os dados exatos, indicando a necessidade de estudos acerca da sua eficiência.

Como sugestão de novas pesquisas, pode ser feito um estudo utilizando a técnica CID para analisar os aliviadores de tensão, dos vários exemplos explanados ao longo do trabalho, sendo possível determinar as localizações ideais para cada tipo de descontinuidade e aliviadores. Esse tipo de abordagem contribuirá para uma melhor aplicação da técnica dando margem para evoluções na área acadêmica e abrindo espaço para ideias revolucionárias na mecânica.

REFERÊNCIAS

ASTM, “**Specification for tensile testing of cast ferrous materials**”, American Society for Testing and Materials, USA, E8 specification, 1992.

BARRETO JUNIOR, Erly. **Utilização do método de Correlação de Imagens na caracterização de materiais metálicos e poliméricos**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

BENTES, Hugo Pantoja Hagmann. **Cálculo de deformação através do método de correlação de imagens**. 2010. 63 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

BONIATTI, D. L., Iturrioz, I. (2003) **Análise do Comportamento de Fadiga para Estruturas Submetidas a Temperaturas Elevadas Aliadas a Esforços Cíclicos**. Brasil: UFRGS.

CALDEIRA, L. E. N.; NUNES, L. C. S. **Estudo de fratura em um adesivo flexível usando teste DCB através do método de Correlação de Imagens Digitais**. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2013.

CARVALHO, E. A. (1992) **Determinação de Fatores de Intensificação e Concentração de Tensões para Entalhes do Tipo "V"**. Dissertação, Brasil: PUC-RJ.

DOS SANTOS, Lindemberg Ferreira; DE CODES, Rodrigo Nogueira; NONATO, Erijânio. **Estudo da danificação do polietileno de média densidade utilizando a técnica da correlação de imagens digitais. ANAIS 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Cuiabá – Mato Grosso. 2014.

FRANQUETTO, Paulo Rogério. **Otimização paramétrica de concentradores de tensões clássicos**. 2007. 183p. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

HAMMACK, Bill; RYAN, Patrick; ZIECH, Nick. **Eight Amazing Engineering Stories: Using the Elements to Create Extraordinary Technologies**. Articulate Noise Books, 2012.
HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 637p.

ISO/TC42N 4378, **Photography-Electronic Still Picture Imaging-Removable Memory-Part 2: Image Data Format-TIFF/EP**, Nov. 25, 1998.

LAGE, Carmem Miranda. **Fadiga em estruturas metálicas tubulares soldadas**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

NORTON, Robert L.. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1054p.

PENNAFORT Jr, L. C. G., DE QUEIROZ, W. L. R., DE CODES, R. N., & de Deus, E. P. **Caracterização mecânica do compósito PVC/fibra de coco pelos métodos de emissão acústica e de correlação digital de imagem.** Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 26, n. 1, p. 25-32, 2014.

PEREIRA, J.; Xavier, J.; Morais, J.; Lousada, J.; Pierron, F. (2010). “**On the Evaluation of Elastic Properties of P. Pinaster at the Growth Ring Scale**”. 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental.

PILKEY, Walter D.; PILKEY, Deborah F. **Peterson's Stress Concentration Factors.** 3. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2008. 522 p.

RODRIGUES, Leonardo Dantas. **Aplicação da técnica DIC a espécimes com diferentes formas, materiais e gradientes de deformação.** 2014. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SHARPE, Jr., W. N.: **Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics.** Springer Science-Business Media, LLC New York, (2008).

SKARŻYŃSKI, Ł.; SYROKA, E.; TEJCHMAN, J. **Measurements and Calculations of the Width of the Fracture Process Zones on the Surface of Notched Concrete Beams.** Strain, v. 47, 2011, p. 319-332.

SUTTON, M. A.; McNEILL, S. R.; HELM, J. D.; CHAO, Y. J. **Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision.** Top. Appl Phys, v. 77, 2000, p.323-372.

YOUNG, Warren C.; BUDYNAS, Richard G.. **Roark's Formulas for Stress and Strain.** 7. ed. New York: Mcgraw-hill, 2002. 852p.