

1 Introdução

Em indústrias e projetos de pesquisa, a análise de tensões em componentes e peças estruturais tem um papel importante no controle do funcionamento de vários tipos de estruturas. Todavia, componentes estruturais complexos requerem um processo de análise de tensões capaz de lidar com formas geométricas e tipos de carregamento que não são triviais.

Segundo o princípio de Saint-Venant, as fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais só são válidas nas regiões da peça que fiquem longe de transições bruscas de geometria e dos pontos de aplicação das cargas concentradas. Conseqüentemente, as tensões calculadas por estas fórmulas correspondem a valores nominais, os quais desprezam os efeitos das descontinuidades geométricas (Castro e Meggiolaro, 2009).

De modo geral, componentes mecânicos precisam de descontinuidades ou variações de seção como furos, ombros, rasgos, entre outros, os quais comumente estão associados à funcionalidade da peça. Estes detalhes geométricos são geralmente chamados entalhes, alguns exemplos são mostrados na Fig. 1.1.

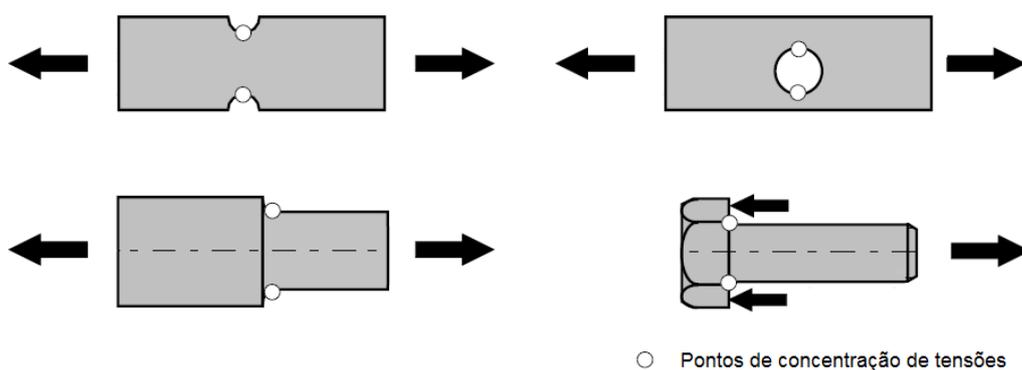


Figura 1.1 Exemplos de regiões com concentração de tensão provocadas pela geometria da peça, com indicação dos pontos críticos (Rosa, 2002).

Sob a ação de cargas, a presença de um entalhe altera significativamente a distribuição de tensões na peça, ocorrendo pontos onde há uma intensificação local do campo de tensões. Estes pontos são vistos como prováveis pontos

críticos, formando o que chamamos de áreas de concentração de tensão, onde a máxima tensão, σ_m , atuante pode ser várias vezes superior à tensão nominal, σ_n , calculada naquela seção da peça (Budynas *et al.*, 2011).

Se as tensões locais se mantiverem dentro do domínio elástico, o seu valor pode ser estimado com base no fator de concentração de tensões, K_t :

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \quad (1.1)$$

Se o estado de tensão local for próximo ou superior à resistência ao escoamento do material, dá-se início ao aparecimento de deformações plásticas irreversíveis que, na presença de carregamentos cíclicos, podem levar à iniciação de trincas por fadiga e, eventualmente, ao colapso estrutural da peça.

Assume-se que o fator de concentração de tensões, K_t , definido para o comportamento elástico, deixa de ter aplicabilidade direta quando se atingem deformações plásticas junto ao entalhe. Assim, dois fatores elastoplásticos de concentração são definidos, um para as tensões, K_σ , e outro para as deformações, K_ϵ (Castro e Meggiolaro, 2009):

$$K_\sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \quad (1.2)$$

$$K_\epsilon = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_n} \quad (1.3)$$

Os fatores K_σ e K_ϵ são iguais apenas no caso linear-elástico uniaxial, pois após o início do escoamento na raiz do entalhe, o fator de concentração de tensões, K_σ , tende a diminuir e o fator de concentração de deformações, K_ϵ , tende a crescer como ilustrado na Fig.1.2.

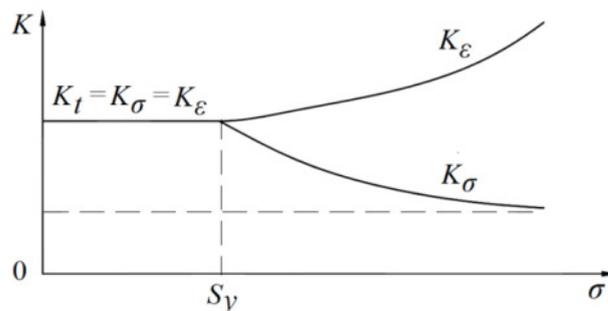


Figura 1.2 Variação K_σ e K_ϵ com a tensão no entalhe.

Portanto, quando os níveis de tensão atingem valores que ultrapassam a resistência ao escoamento do material, a avaliação do ciclo de vida da peça entalhada requer de uma análise elastoplástica que determine os valores reais de tensão e deformação na região do entalhe. Uma análise puramente elástica nestas condições poderia ser extremamente conservadora, em especial se o parâmetro principal para o cálculo de dano for a variação da deformação total.

Em decorrência, há a necessidade de ferramentas adequadas que possibilitem uma avaliação precisa do estado de tensões em pontos críticos de um componente entalhado e de, posteriormente, utilizar corretamente esta informação.

Comumente, esta tarefa é elaborada por métodos analíticos, métodos numéricos e medições experimentais. Não obstante, a medição da tensão não é um procedimento trivial. Um método indireto é medir a deformação e, a partir dela, a tensão no local pode ser calculada usando a lei de Hooke, assumindo um comportamento linear-elástico do material. No entanto, sob condições de escoamento local a relação de proporcionalidade entre a tensão e deformação (i.e. a Lei de Hooke) não é mais válida.

Encontram-se na literatura soluções analíticas clássicas para problemas no regime linear-elástico as quais são utilizadas como referência na validação de modelos numéricos (Timoshenko, 1970; Dally e Riley, 1991). No entanto, soluções de referência analíticas no regime elastoplástico são muito escassas, e conseqüentemente o estudo deste assunto é relevante.

Vários métodos analíticos de aproximação local tais como a regra de Neuber (1961), Molski-Glinka (1985) e Seeger e Heuler (1980) têm sido preferencialmente utilizadas, visando relacionar as tensões e deformações elastoplásticas na raiz do entalhe com as tensões e deformações nominais. Estes métodos de aproximação local são comumente associados a um modelo capaz de quantificar encruamento como, por exemplo, o proposto por Ramberg e Osgood (1943). Contudo, não podem ser utilizados para estimar a distribuição de tensões/deformações em torno do entalhe, pois eles apenas fornecem os valores máximos destas grandezas.

Por outro lado, métodos experimentais permitem a determinação de solicitações a partir de uma medição efetuada diretamente sobre a superfície do material. Entre eles, os extensômetros são os dispositivos mais utilizados para medir solicitações localizadas em uma determinada direção, em termos de

deformações. No entanto, a utilização de extensômetros na medição de altos gradientes está limitada pelo seu tamanho. Embora exista uma tecnologia de extensômetros com dimensões muito reduzidas (e.g. redes de Bragg em fibra óptica), eles apenas forneceriam informações nos pontos do componente onde fossem instalados.

Alternativas ao uso de extensômetros são os métodos ópticos de medição de campos de deslocamento e deformação. A principal vantagem destas técnicas é que a medição não interfere no processo experimental, uma vez que não há nenhum contato com a amostra que está sendo estudada. Além disso, é possível obter medições de campos completos na superfície da peça analisada. Esta característica implica em uma análise mais eficiente, devido à grande quantidade de informações que se obtém em relação às medições pontuais.

Devido à sua simplicidade e versatilidade, a correlação digital de imagens (do inglês *Digital Image Correlation* – DIC) é um dos métodos ópticos mais amplamente utilizados na mecânica experimental. Desenvolvida no início da década de 80 (Sutton *et al.* 1983; Chu *et al.* 1985), a técnica DIC usa procedimentos de rastreamento e registro de imagem para quantificar medidas superficiais de deslocamento e deformações, utilizando uma câmera para medições planares (2D) ou duas câmeras para medições espaciais (3D).

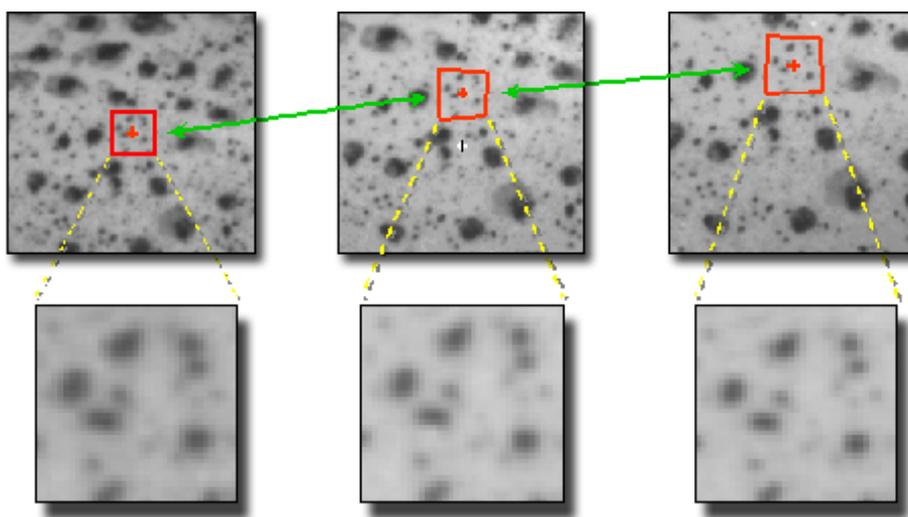


Figura 1.3 Princípio da técnica DIC (Correlated, 2014).

O processo de correlação se inicia com a delimitação de uma região alvo ou subconjunto de *pixels* (indicado pelo retângulo vermelho na Fig. 1.3) em uma

imagem do material antes da deformação. Em seguida, inicia-se um processo de rastreamento pela região homóloga nas imagens do material em estado deformado. A similaridade é medida pela comparação entre os níveis de cinza dos *pixels* das regiões analisadas, utilizando para isso uma função de correlação estatística (e.g. correlação cruzada normalizada). Através do processo de correlação é possível obter grandezas físicas referentes ao elemento, como deslocamento e deformação. A técnica faz uso de um padrão com características aleatórias (normalmente denominado de padrão *speckle*) sobre a superfície do material a ser analisado, como mostrado na Fig. 1.3.

Nas últimas décadas, a técnica DIC vem sendo aprimorada constantemente por vários pesquisadores, devido aos grandes avanços tecnológicos em aquisição e processamento de imagens. Este desenvolvimento tem permitido a sua utilização em diversas aplicações industriais, onde máquinas e estruturas podem ser analisadas quando submetidas a altas temperaturas, cargas cíclicas, vibração, movimento e condições ambientais adversas (Yoneyama *et al.* 2005; Reu *et al.* 2008; Helfrick *et al.* 2011; Malesa *et al.* 2013). Atualmente, existem no mercado *softwares* comerciais robustos baseados no princípio da correlação digital de imagens, como são os desenvolvidos pelas empresas GOM *Optical Measurement Techniques* (GOM, 2014), Dantec *Dynamics* (Dantec Dynamics, 2014), *Correlated Solutions* (Correlated Solutions, 2014), entre outras.

Muitas aplicações desta técnica podem ser encontradas na literatura para medição de deslocamentos e deformações nos regimes elástico e elastoplástico (Sutton *et al.* 2009; Nunes *et al.* 2009; Nunes, 2013; Rodrigues *et al.* 2014; Rodrigues, 2014), incluindo análises em regiões próximas aos concentradores de tensão (Lagattu *et al.* 2004; Shun-Fa *et al.* 2009; Qian *et al.* 2011; Góes *et al.* 2011).

Na Fig. 1.4 é possível observar o campo de deformação ϵ_{xx} medido na superfície do corpo de prova entalhado usando o *software* VIC-3D desenvolvido pela *Correlated Solution*. Nota-se que, por limitações próprias do tipo de processamento da técnica de correlação, só é possível determinar as deformações a partir de uma distância finita da raiz do entalhe, na qual são esperados os máximos valores de deformação. Isto é devido a que nas técnicas DIC, o ponto de medição ou região alvo tem necessariamente uma dimensão geométrica. Em consequência, se a região for demasiado pequena, a informação contida no

subconjunto de *pixels* pode não ser suficiente para ser discriminado de outro subconjunto. Por outro lado, regiões muito grandes podem homogeneizar gradientes de deformação não desprezíveis. Assim, o subconjunto usado nas técnicas de correlação de imagens deve ter um tamanho apropriado determinado pelo usuário.

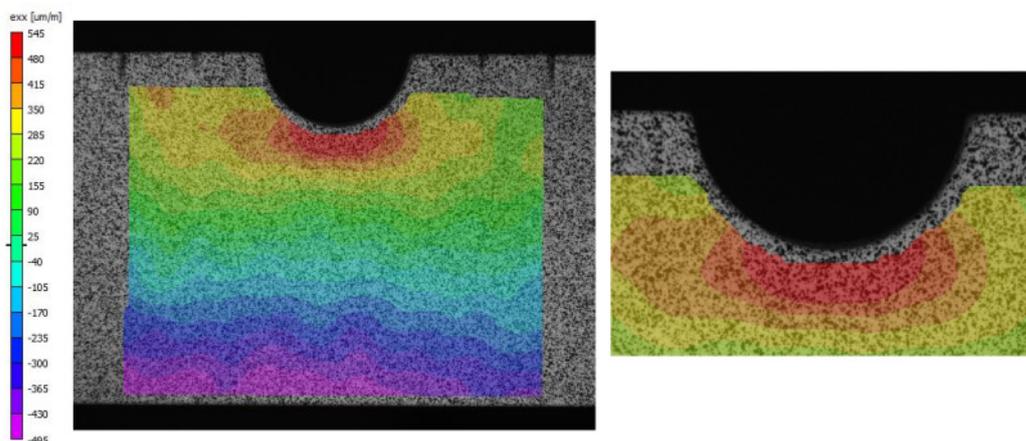


Figura 1.4 Exemplo de análise utilizando o *software* VIC-3D.

Na literatura, os trabalhos de pesquisa oferecem pouca informação sobre os parâmetros que envolvem a técnica de correlação, os quais se tornam mais críticos à medida que o gradiente de deformações no espécime aumenta, o que impede fazer uma avaliação mais aprofundada da real exatidão da metodologia empregada. Portanto, destaca-se a importância de se ter ferramentas alternativas aos métodos já existentes, visando fornecer soluções confiáveis, principalmente, no estudo de problemas crônicos estruturais como são as concentrações de tensões.

Na visão computacional, uma alternativa a representar cada recorte da imagem pelo vetor de intensidades de seus *pixels*, como feito na correlação de imagens digitais, consiste em calcular um descritor com informações relevantes dos *pixels* vizinhos, tais como orientação e magnitude das bordas, localização, entre outros. Desta forma, a identificação dos recortes é feita somente com base na informação contida nos descritores. Vários descritores de região são propostos e avaliados em Mikolajczyk e Schmid (2005). Dentre estas abordagens, a técnica conhecida como SIFT (do inglês *Scale Invariant Feature Transform*) é uma das mais utilizadas na visão computacional desde que foi introduzida por David Lowe em 1999 (Lowe, 1999; Lowe, 2004).

A técnica SIFT tem a capacidade de detectar e extrair características relevantes em uma imagem, construindo descritores robustos invariantes a diversas transformações, como rotação, translação, escala, além de possuírem robustez a ruído e iluminação. Tais propriedades são desejáveis para estabelecer correspondências entre diferentes imagens de um objeto ou cena. Um aspecto importante desta técnica é a extração de um grande número de características que cobrem densamente a imagem. No entanto, os descritores produzidos são altamente distintos. Esta característica permite que um determinado ponto extraído seja corretamente localizado, com alta probabilidade de acerto, em um banco de dados com descritores de diversas imagens. Muitos trabalhos utilizando SIFT têm sido desenvolvidos em diversas aplicações, principalmente na área da robótica (Lee e Song, 2010; Nigri *et al.* 2010; Castle e Murray, 2011). No entanto, até 2010 não houve aplicação desta técnica em problemas de mecânica estrutural.

No trabalho desenvolvido por Gonzáles (2010) foi iniciado o estudo da aplicação da técnica SIFT na medição visual de deformações no espaço bidimensional. Nesse trabalho, os descritores SIFT são utilizados para localização de pontos homólogos em imagens da superfície de um material, em estágios diferentes de deformação mecânica. Assim, medições de deslocamento podem ser obtidas através do seguimento dos pontos correspondidos entre duas imagens, sendo uma antes da deformação e outra no estado deformado (vide Fig. 1.5). A formulação da solução apresentada combina os dados fornecidos pelo SIFT e o método linear de mínimos quadrados para o ajuste de uma função objetivo proposta, resultando em uma função deslocamento, a partir da qual os parâmetros de deformação podem ser estimados.

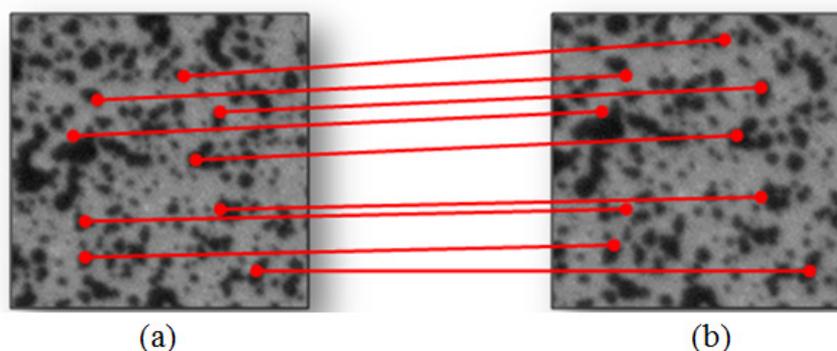


Figura 1.5 Exemplo de correspondência utilizando o algoritmo SIFT. (a) imagem original e (b) imagem deformada.

Na parte experimental foi utilizada uma câmera fixada perpendicularmente ao modelo para adquirir as imagens. As superfícies dos corpos de prova testados foram previamente preparadas, com o objetivo de produzir um padrão aleatório similar ao utilizado nas técnicas tradicionais de correlação de imagens. O padrão gerado possui uma textura suficientemente rica de detalhes que podem ser facilmente extraídos pelo SIFT, e que podem ser localizados em outras imagens do mesmo objeto com base na similaridade entre descritores, como mostrado na Fig. 1.5.

No entanto, a metodologia apresentada por Gonzáles (2010) não pode ser aplicada em situações de comportamento mecânico não-linear da peça (e.g. plasticidade ou na presença de gradientes de deformação muito elevados), onde erros significativos podem ser introduzidos no processo de ajuste a uma única função-objetivo que represente o comportamento da estrutura monitorada.

Uma ideia bastante utilizada na engenharia para resolver um problema complexo é subdividi-lo em uma série de problemas mais simples. Com este objetivo, uma alternativa é discretizar o domínio, reduzindo o problema a pequenas aproximações que podem ser funções polinomiais com grau razoável de ajuste nos elementos discretizados a partir da geometria do problema. Esta definição é a premissa básica do Método de Elementos Finitos (MEF). No entanto, uma das principais dificuldades da aplicação do MEF seria a geração de uma malha eficiente que represente bem o problema e, como visto na Figura 1.5, a distribuição quase aleatória dos pontos fornecidos pelo algoritmo do SIFT impõe uma maior dificuldade na geração da malha. Em geral, muitos dos pontos detectados pelo SIFT gerariam elementos com razão de aspecto desfavorável para a aplicação do MEF, caso fossem utilizados para constituir os nós da malha.

Para resolver este problema, outra classe de métodos de discretização que não envolvem nenhum tipo de malha é utilizada. Os métodos sem malha (*meshless/meshfree methods*) são bastante similares aos métodos de elementos finitos, contudo sua característica principal é definida em contraposição aos métodos com malha. Estes métodos são caracterizados principalmente por não exigirem uma malha para representar o domínio do problema, dependendo apenas de um conjunto de nós espalhados no seu interior (Liu, 2005; Liu e Gu, 2009). Esta flexibilidade permite que os pontos SIFT sejam selecionados como nós em

uma formulação sem malha. Assim, os problemas associados com a geração de malha são eliminados.

Aplicações mecânicas que incorporam métodos de correlação de imagens e métodos sem malha para medição de campos de deslocamento e deformação podem ser encontradas em Andrianopoulos (2006) e Andrianopoulos *et al.* (2006). Nestes trabalhos foi utilizada uma técnica de rastreamento baseado no cálculo do centróide de pontos inseridos na superfície do material utilizando marcadores. Logo, uma formulação sem malha proposta por Belytschko *et al.* 1994, o método de EFG (do inglês *Element-Free Galerkin Method*), é utilizada para modelagem do campo de deformações. O método de EFG é um dos métodos sem malha mais utilizados na solução de problemas da mecânica dos sólidos (Dolbow e Belytschko, 1998; Belytschko *et al.* 1996, Nguyen *et al.* 1998). As funções de aproximação são definidas baseadas no conceito de mínimos quadrados móveis, apresentado por Lancaster e Salkaukas (1981).

Na metodologia proposta nesta tese, propõe-se a incorporação do algoritmo SIFT no processo de correlação. A vantagem da utilização do SIFT está na sua robustez e automação nas correlações. Além disso, o método é capaz de detectar um número muito grande de pontos, o que facilita o processo de correspondência de pontos homólogos. Seguidamente, é utilizada uma formulação sem malha semelhante à proposta por Belytschko *et al.* 1994. A formulação foi adaptada para utilização dos pontos SIFT como nós na interpolação da função de deslocamento e suas derivadas. A escolha dos parâmetros presentes na formulação sem malha, os quais serão discutidos ao longo desta tese, é automatizada através de uma metodologia proposta adequada para fornecer resultados confiáveis, em particular visando medições em regiões de altos gradientes de deformação.

Na configuração experimental do método proposto, é considerado um sistema de visão estereoscópica baseado em um sistema de aquisição binocular, responsável pela aquisição das imagens. A partir das duas câmeras posicionadas de forma adequada, com suas posições e direcionamentos conhecidos, é possível determinar a posição tridimensional de qualquer ponto neste espaço, utilizando-se para isto técnicas de triangulação.

Finalmente, a metodologia proposta foi validada a partir do estudo do comportamento elastoplástico das deformações próximas ao entalhe em um corpo de prova submetido à flexão em quatro pontos. Os resultados com o programa

desenvolvido foram comparados com uma análise utilizando modelos semi-empíricos de previsão de efeitos de concentração de tensões, simulações com programas comerciais de Elementos Finitos e medições feitas com o sistema de medição visual VIC-3D da *Correlated Solutions*.

1.1. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um sistema de correlação de imagens capaz de avaliar o efeito da plastificação em entalhes com gradientes de deformação controlada, modelando o seu estado de deformação e apresentando uma solução confiável, visando novas investigações na área da mecânica estrutural.

Na metodologia a ser desenvolvida, propõe-se a utilização de técnicas avançadas em visão computacional para medição de campos de deslocamentos em corpos de prova, em particular a técnica SIFT, ao invés de correlacionar as imagens diretamente com o uso de sub-janelas (técnicas de correspondência baseadas em áreas), como feito nos sistemas de medição existentes.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema de medição visual para determinar campos completos de deformação, localizando os pontos mais solicitados.
- Incorporar o uso de técnicas avançadas em visão computacional, o que permitirá análises estruturais no espaço bidimensional e tridimensional.
- Aumentar a acurácia do sistema de medição propondo uma formulação robusta e eficiente.
- Implementar a metodologia em uma plataforma computacional, de modo a facilitar a sua utilização em pesquisas futuras.

1.2. Organização da Tese

O segundo capítulo relata os princípios do algoritmo SIFT e sua aplicação para medição visual de deformações na detecção de pontos-chaves a serem

correlacionados nas imagens. No terceiro capítulo é descrita a fundamentação teórica relacionada à estereoscopia, onde são apresentadas as equações necessárias para identificar a posição 3-D de cada ponto-chave a partir de um par de imagens estéreo. No quarto capítulo são discutidos modelos e técnicas empregadas no desenvolvimento da formulação de métodos sem malha, que utilizarão como nós os pontos-chaves identificados para calcular campos de deslocamentos e deformações. No quinto capítulo são descritas as etapas envolvidas na implementação da metodologia proposta, que integra as técnicas apresentadas nos capítulos anteriores, incluindo experimentos preliminares em corpo de prova de policarbonato para otimização dos parâmetros do modelo. No sexto capítulo são apresentados os resultados experimentais em corpos de prova de aço inox 304 sob condições elásticas e elastoplásticas, obtidos através da aplicação do programa computacional desenvolvido. E, finalmente, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões finais desta pesquisa e recomendações para trabalhos futuros.