

# Capítulo I – Introdução.

## I.1 – Considerações Iniciais

Chamam-se tensões residuais aquelas presentes num componente sem que nele estejam agindo quaisquer conjunto de forças externas, inclusive peso próprio [1]. Podem estar presentes nos mais diversos componentes e têm papel importante na resistência às solicitações destes, uma vez que as tensões residuais se somam às tensões atuantes (externas) podendo aumentar ou diminuir sua magnitude. Assim, o conhecimento do valor e da distribuição das tensões residuais é um fator muito importante do ponto de vista de integridade estrutural. A medição destas tensões é um passo fundamental para assegurar o bom desempenho de um componente. Diversas técnicas para medição de tensões residuais estão disponíveis na literatura: técnica do furo-cego, difração de raios-X, remoção de camadas, entre outras. Entretanto, do ponto de vista industrial, apenas as técnicas do furo-cego e da difração de raios-X são facilmente aplicáveis.

A técnica do furo-cego [1-3] é normalizada (ASTM E387), de fácil utilização e interpretação, além de ser relativamente barata. Estes fatores a tornam a mais popular entre as técnicas de medição de tensões residuais. A técnica consiste da usinagem de um pequeno furo (passante ou cego) na região do componente que se quer analisar. A retirada de material provoca uma redistribuição no estado de tensões daquela região. Por conseguinte, ocorre também redistribuição no estado de deformações da região circunvizinha ao furo. Extensômetros de resistência elétrica colados próximos ao furo medem a mudança no estado de deformações e, a partir destes dados, juntamente com coeficientes indicados pela Norma ASTM E387, o estado de tensões é retrocalculado. A técnica tem restrições e não pode ser aplicada em qualquer situação. Uma das restrições diz respeito à magnitude das tensões residuais presentes, uma vez que a introdução do furo causa aumento no valor das tensões, podendo ocorrer plastificação na raiz do entalhe caso tensões

nominais da ordem de  $0.3S_y^1$ , o limite de escoamento do material, estiverem presentes. Neste caso, as tensões indicadas pela técnica não são confiáveis, pois todo o seu desenvolvimento baseia-se em hipóteses linear-elásticas [4-6]. No entanto, existem muitos componentes com tensões acima desta ordem e que precisam de medidas com exatidão. Assim, há grande interesse em pesquisar métodos para ampliar a faixa de utilização da técnica do furo<sup>2</sup>. A primeira condição para alcançar este objetivo é conhecer os erros obtidos ao se aplicar o procedimento da Norma, quando há plastificação na borda do furo. Para tanto, é necessário aplicar a técnica em um componente que contenha altas tensões de forma a gerar tal plastificação. Este procedimento é difícil de realizar experimentalmente por ser lento e necessitar de vários espécimes para garantir a repetitividade dos resultados. Assim, para avaliar o efeito da plastificação na técnica do furo, boa parte dos trabalhos técnicos disponíveis na literatura utiliza simulações numéricas através de pacotes comerciais de programas de elementos finitos. No entanto, estes artigos [4, 6] utilizam em suas análises hipóteses válidas apenas no regime linear-elástico, mesmo estando obviamente fora deste regime. Com o objetivo de evitar o uso de tais hipóteses, e portanto avaliar o efeito da plastificação de uma forma mais exata, neste trabalho são propostas três metodologias alternativas, além da que é tradicionalmente empregada na literatura [1-3]. Estas metodologias são:

- Estado Equivalente – na qual cria-se um estado capaz de gerar a mesma redistribuição de tensões causada pela usinagem do furo;
- Morte de Elementos – na qual os elementos presentes na região onde o furo será usinado, são eliminados progressivamente com o objetivo de simular o processo de usinagem e,
- Tensão Substituta – na qual o material presente na região onde o furo vai ser usinado é substituído pela tensão que nele atua. Esta tensão é retirada de forma gradativa, da mesma forma que na metodologia Morte de Elementos, para simular a usinagem do furo.

---

<sup>1</sup> Embora, segundo a Norma, a técnica possa ser aplicada a componentes tendo tensões residuais até  $0.5S_y$

<sup>2</sup> Utiliza-se a denominação furo, para enfatizar que pode tratar-se de furo passante ou cego.

Além disso, são levados em consideração alguns fatores que provavelmente têm influência nos erros gerados pela plastificação, tais como [4]:

- nível de plastificação – é a relação entre a tensão aplicada e o limite de escoamento do material. Quanto maior a tensão residual nominal, maiores serão as tensões e deformações na borda do furo e por conseguinte, maiores os erros;
- forma da curva tensão-deformação – foram utilizados nas simulações materiais tendo limite elástico e de escoamento coincidentes e não coincidentes.
- carregamento – três carregamentos diferentes são testados para se analisar a influência deste fator nos erros encontrados.

Finalmente, na literatura há poucos trabalhos relativos ao efeito da plastificação para o caso específico de furo-cego. Assim, também são analisados alguns furos não passantes com profundidades diferentes.

Como foi observado acima, o fato de um furo gerar aumento local no valor das tensões é determinante para que, mesmo em presença de tensões nominais elásticas, ocorra plastificação na borda do entalhe. Assim, é conveniente definir neste momento, o fator de concentração de tensão, pois esta definição será empregada largamente em todo o trabalho.

## 1.2 – O Fator de Concentração de Tensões [7]

Diversos componentes mecânicos têm descontinuidades tais como furos, rasgos de chavetas e entalhes em U. Na vizinhança imediata destas descontinuidades ocorre o fenômeno da concentração de tensões, ou seja, um aumento no valor das tensões atuantes causado não só pela diminuição da área resistente como também pela perturbação que a descontinuidade causa. A concentração de tensões é normalmente quantificada pelo fator de concentração de tensões  $K_t$ :

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}$$

onde  $\sigma_{\max}$  é a tensão máxima na vizinhança imediata da descontinuidade e  $\sigma_{\text{nom}}$  é a tensão que ocorre na seção total longe da descontinuidade.

A definição acima apresentada refere-se ao  $K_t^{\text{bru}}$ . Outra definição comumente apresentada na literatura é a seguinte:

$$K_t^{\text{liq}} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}$$

onde  $\sigma_{\max}$  é igualmente a tensão máxima na vizinhança imediata da descontinuidade e  $\sigma_{\text{nom}}$  é a tensão que ocorreria na seção reduzida da região que contém a descontinuidade, caso não ocorresse a perturbação na distribuição de tensões causada pela mudança abrupta de geometria. A diferença entre as duas definições é melhor explicada na figura 1.1, abaixo.

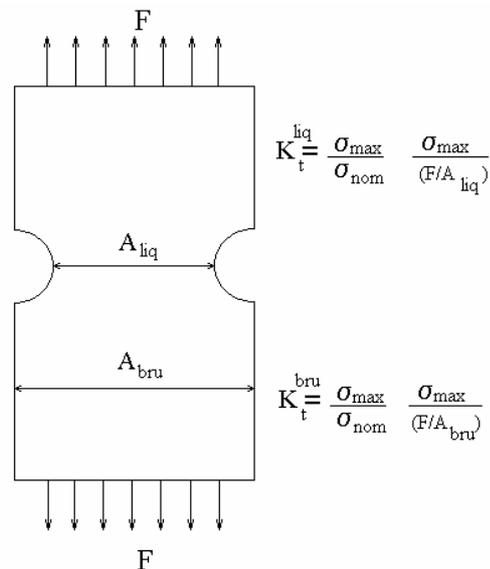


Figura 5.1 – Representação esquemática das duas definições de  $K_t$

É importante esclarecer que, embora o valor de  $K_t$  segundo as duas definições seja diferente, a tensão máxima indicada por cada definição é exatamente a mesma. Ao longo deste trabalho, será sempre usada a primeira definição, com exceção do apêndice B.

Existem na literatura informações sob a forma de gráficos, tabelas e expressões analíticas para auxiliar na obtenção dos valores de  $K_t$  para diversas geometrias e carregamentos. Estas informações foram reunidas por Peterson [7], que compilou resultados de diversos trabalhos, os quais empregaram

fotoelasticidade bidimensional e tridimensional, soluções analíticas e soluções por diferenças finitas para a determinação de  $K_t$ .

## **I.2 – Resumo dos próximos capítulos.**

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre tensões residuais, discorrendo-se sobre sua natureza, mecanismos para sua geração bem como o efeito causado pela sua presença em componentes mecânicos. São apresentadas em resumo as principais técnicas de medição de tensões residuais, destrutivas e não destrutivas. Mostra-se no final do capítulo uma tabela comparativa entre estas técnicas. Assim, é possível entender por que a técnica do furo-cego, juntamente com a difração de raios-X, é a mais utilizada entre as outras.

O capítulo 3 discorre somente sobre a técnica do furo-cego. Toda a formulação matemática da técnica é apresentada. São apresentados os métodos experimentais e numéricos para e calcular os coeficientes de alívio, tanto para o caso de furo passante quanto o do furo-cego. O passo seguinte foi avaliar a aplicabilidade do método dos elementos finitos para simular numericamente a técnica do furo cego. Assim, foram criadas num programa de elementos finitos, placas contendo furos passantes e cegos, nas quais foram aplicados alguns carregamentos diferentes. Nestas placas, foram desenhados extensômetros virtuais seguindo a geometria apresentada pela Norma ASTM E837, com o objetivo de obter as deformações numéricas nas regiões abaixo destes extensômetros e então, ainda seguindo o procedimento ditado pela Norma, retrocalcular as tensões aplicadas. Assim, comparando-se as tensões aplicadas com as calculadas foi possível concluir que o método dos elementos finitos é perfeitamente aplicável para simular a medição de tensões residuais pela técnica do furo passante ou cego, desde que se tenham condições puramente elásticas.

No capítulo 4 apresenta-se uma pequena revisão teórica sobre plasticidade. A seguir são apresentadas soluções numéricas de alguns casos simples envolvendo plasticidade, notadamente no que diz respeito a plastificação ao redor de furos. Os resultados foram comparados com a literatura, mostrando-se bastante satisfatórios.

No capítulo 5, é analisada a influência da plastificação na medição de tensões residuais pela técnica do furo. São avaliados os erros obtidos ao se usar coeficientes linear-elásticos em presença de deformações plásticas e são apresentados alguns fatores que influenciam estes erros. A seguir, são apresentados trabalhos da literatura em que estes erros foram avaliados e nos quais foram propostas correções. Então, é discutida a forma com que se avaliam os erros gerados ao se utilizar a Norma ASTM E837 além do limite elástico. Apresentam-se quatro diferentes metodologias para avaliar estes erros, concluindo-se que de fato tais erros são menores que aqueles mostrados na literatura geral.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos posteriores.

Além destes capítulos são apresentados dois apêndices que, embora não sejam fundamentais para compreensão do trabalho, complementam os tópicos que envolvem a técnica do furo-cego e fatores de concentração de tensões.

No apêndice A são calculados numericamente os coeficientes de alívio para furo passante e cego, quando as tensões antes e depois do alívio são elásticas. São apresentadas também metodologias para calcular tais coeficientes no caso em que as tensões variam com a profundidade.

No apêndice B é apresentada uma análise referente à variação dos valores de tensão máxima para o caso de furo passante em que a espessura da placa é considerável frente ao diâmetro do furo.