

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta parte do trabalho envolve uma revisão da literatura a respeito do fenômeno de enrijecimento por tensão e das técnicas de modelagem numérica das tensões residuais de soldagem, que são os dois principais aspectos abordados neste trabalho.

3.1. Enrijecimento por Tensão em Estruturas

Diversos trabalhos evidenciam o efeito do enrijecimento por tensão, baseados em modificações no comportamento estático e dinâmico de componentes estruturais. Bassily e Dickinson (1972) utilizaram o método de Rayleigh-Ritz baseado em séries compostas de auto-funções de viga para derivar equações de frequência e flambagem aplicadas a placas retangulares em diferentes condições de contorno, sujeitas a tensões arbitrárias em seu plano.

Kaldas e Dickinson (1981-a) apresentaram uma aproximação teórica para a solução do problema dinâmico e de flambagem elástica de placas retangulares finas sujeitas a campos de tensão de membrana presentes na prática. Nesta aproximação, o campo de deslocamento transversal é dado como uma combinação linear truncada de funções de viga apropriadas. A distribuição de tensão pode ser descrita na forma de uma expressão matemática ou por meio de um conjunto de valores conhecidos em pontos discretos da placa. Alguns exemplos numéricos foram apresentados, sendo observadas, de acordo com as tensões aplicadas, mudanças significativas nas frequências naturais de vibração, as quais se mostraram em ótima correlação com resultados experimentais.

Em outro estudo, Kaldas e Dickinson (1981-b) utilizaram a mesma aproximação do trabalho anterior, juntamente com o método das diferenças finitas, para a obtenção de campos de tensões residuais de soldagem, obtendo as frequências naturais e modos de vibração de placas retangulares finas sujeitas a um ou mais passes de soldagem paralelos a uma aresta da placa. Os resultados obtidos numericamente foram relativamente próximos aos observados experimentalmente. As frequências naturais da placa livre de tensões sofreram variações de

até 31,9% após a soldagem, comprovando a grande influência de campos de tensão sobre as respostas dinâmicas de estruturas.

No trabalho de Yang e Shieh (1987), é possível observar o fenômeno de enrijecimento por tensão em placas retangulares, espessas, ortotrópicas, sujeitas a um estado inicial de tensão gerado durante a fabricação do laminado. O comportamento vibratório de laminados submetidos a um estado de tensão uniforme (trativo ou compressivo) e a um estado de tensão em flexão uniforme foi examinado, sendo ilustrado também o fenômeno de que uma frequência natural se anula ao ocorrer a flambagem da placa.

Outro estudo foi realizado por Wang e Mote Jr. (1994), no qual tensões residuais de membrana foram introduzidas voluntariamente, por deformação a frio, em serras de fita, com o intuito de melhorar a performance de corte, alterando o espectro de frequência da serra. O modelo matemático das vibrações da serra sob tensão foi obtido utilizando o método de Rayleigh-Ritz. Os autores estudaram o efeito deste tratamento sobre a vibração livre e estabilidade da serra de fita, verificando tanto um aumento como uma redução substancial de algumas frequências naturais, dependendo da posição, da severidade e do número de repetições do tratamento.

O efeito de tensões residuais térmicas devidas à cura ou consolidação de compósitos laminados sobre o comportamento estrutural de placas foi estudado por Almeida e Hansen (1997). Os autores concluíram sobre a necessidade da inclusão deste efeito no projeto deste tipo de estruturas. Além disso, foi sugerida a possibilidade de se obter parâmetros de projeto que levem a tensões que maximizem a performance de tais estruturas. Neste trabalho foram apresentados alguns casos, os quais demonstraram que aumentos na carga de flambagem podem ser alcançados por meio de tensões residuais.

Em outro trabalho, Almeida e Hansen (1999) demonstraram que as tensões residuais térmicas resultantes da fabricação de placas compostas podem afetar também as frequências naturais. Ainda neste trabalho é salientado que o efeito destas tensões pode ser benéfico em alguns casos e prejudicial em outros. Entretanto, é concluído a respeito da possibilidade de se usar as tensões residuais térmicas para aumentar as frequências naturais de vibração.

Donadon *et al.* (2002) estudaram o efeito de enrijecimento provocado por tensões geradas por atuadores piezoelétricos em placas. A sensibilidade das frequências naturais às variações na voltagem piezoelétrica aplicada foi considerada razoável pelos autores, os quais ainda sugerem algumas formas para aumentá-la.

Mead (2003) estudou o efeito de tensões térmicas no comportamento vibratório e flambagem de placa retangulares finas. O autor verificou que as frequências naturais de vibração podem ser fortemente alteradas pelas tensões no plano induzidas por deformações térmicas não-uniformes, as quais são capazes, inclusive, de causar a flambagem da placa.

Em sua tese de doutorado, Vieira Jr. (2003) mostrou numericamente a influência das tensões residuais de soldagem em placas finas sobre as frequências naturais de vibração, sendo observado o efeito predominante das tensões de compressão que tendem a reduzir os valores destas frequências. A previsão do campo de tensões residuais foi realizada utilizando a técnica das diferenças finitas. As frequências naturais foram determinadas empregando o método dos modos assumidos, que se baseia na hipótese de que os campos de deslocamentos, representando a resposta dinâmica de uma estrutura, podem ser expressos como uma combinação linear de um conjunto arbitrário de funções de coordenadas espaciais que satisfazem as condições de contorno geométricas. A formulação apresentada permite a inclusão do campo de tensões previamente obtido, o qual é levado em consideração na obtenção da matriz de rigidez da placa. A Figura 3.1 ilustra um resultado obtido pelo autor, mostrando uma superfície de variação de uma função de resposta em frequência (FRF) pontual com relação à potência térmica aplicada durante a soldagem. O autor também analisou numericamente o efeito das distorções geométricas de soldagem sobre a resposta dinâmica de uma placa retangular, chegando a conclusão de que esta influência é significativa para alguns modos e quase que imperceptível para outros.

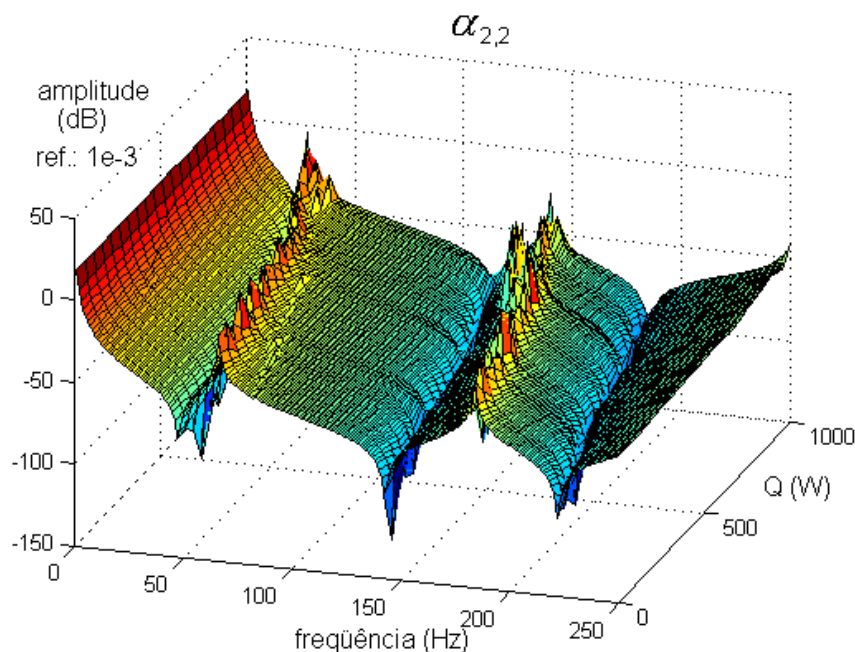


Figura 3.1 – Superfície de variação da FRF pontual com a potência térmica (Vieira Jr., 2003).

Vieira Jr. e Rade (2003) utilizaram as respostas dinâmicas de placas finas para, através de um problema de otimização, identificar as cargas externas atuantes no plano da placa. A

Figura 3.2 mostra o resultado experimental das FRFs da placa estudada com e sem tensões de membrana geradas por um dispositivo de carga desenvolvido pelos autores.

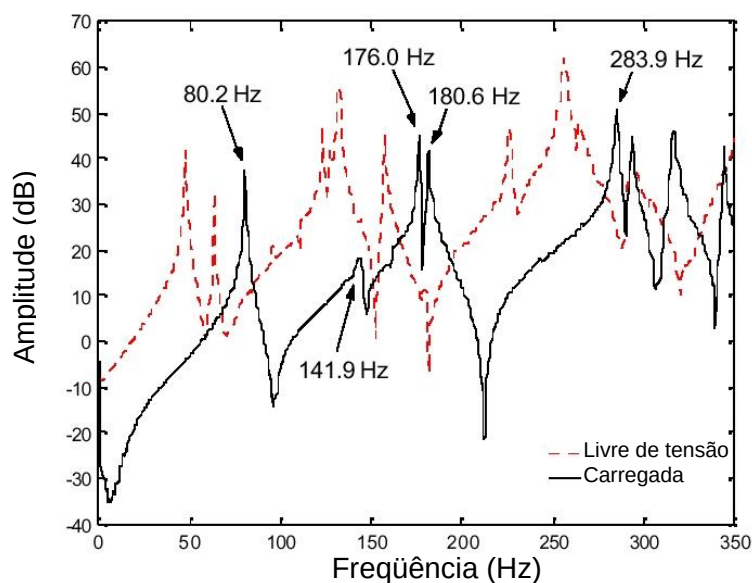


Figura 3.2 – FRFs obtidas experimentalmente comprovando o efeito de tensões de membrana nas respostas vibratórias em flexão de placas (Vieira Jr. e Rade, 2003).

Vieira Jr. *et al.* (2003) desenvolveram uma técnica numérico-experimental para identificação de tensões residuais de soldagem em placas retangulares finas, baseadas nas respostas dinâmicas de tais estruturas. A Figura 3.3 mostra resultados de identificação obtidos pelos autores comparados com os obtidos numericamente por Kaldas e Dickinson (1981-a).

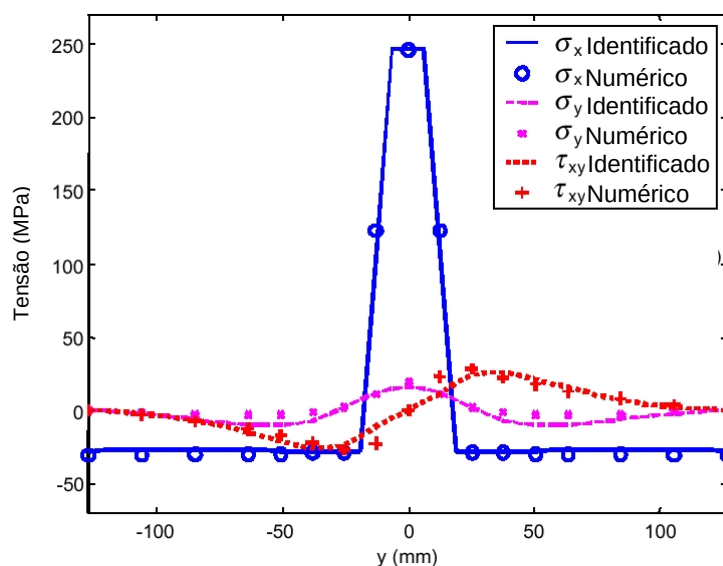


Figura 3.3 – Comparação entre componentes de tensão identificados e numéricos (Vieira Jr. *et al.* 2003).

Nesta mesma linha de problemas inversos, Rojas *et al.* (2004) procederam, por métodos heurísticos de otimização, a identificação de cargas externas a partir das respostas dinâmicas de um sistema estrutural (formado por elementos de viga) e de seu modelo de elementos finitos. Os autores utilizaram a influência do enrijecimento por tensão sobre as características dinâmicas de sistemas estruturais para estabelecer uma relação entre as respostas dinâmicas e o carregamento externo aplicado.

Visando o melhoramento da resistência à flambagem, Faria (2004) utilizou atuadores piezoelétricos para criar forças trativas agindo ao longo da direção axial de vigas, o que permite a aplicação de cargas externas compressivas maiores. O autor comprovou que o enrijecimento por tensão pode ser usado para melhorar o comportamento de elementos estruturais, sendo testado, neste caso, uma viga.

Vila Real *et al.* (2004) estudaram o efeito de tensões residuais na flambagem lateral-torsional de vigas I de aço a temperatura elevada. Para tanto, foi utilizado um programa de elementos finitos com não-linearidade das propriedades de materiais e geométrica. Os autores comprovaram que a resistência à flambagem de vigas é menos sensível às tensões residuais em temperaturas mais altas.

Pereira Jr. (2004), em sua dissertação de mestrado, correlacionou resultados de impedância eletro-mecânica e o estado danificado de corpos de prova submetidos a tração, sendo observado uma boa sensibilidade. Verificou-se também que, na fase elástica do material, o efeito de enrijecimento por tensão é bastante perceptível no sinal de impedância através da variação de picos de frequência. Isto levanta a possibilidade da utilização da técnica de impedância eletromecânica para avaliação do estado de tensão de componentes.

Rade *et al.* (2005) utilizaram o método dos modos assumidos para modelar a vibração de placas retangulares finas sujeitas a tensões de membrana e um método clássico de otimização para desenvolver um algoritmo de identificação do estado de tensão e, indiretamente, a carga externa aplicada a uma placa por meio de um dispositivo de fixação e carregamento. A identificação da carga foi realizada tendo como entrada as seis primeiras frequências naturais obtidas experimentalmente. Uma célula de carga foi utilizada para medir a força aplicada no experimento, a qual foi comparada com a carga identificada. Erros da ordem de 1 % foram encontrados. Apesar dos ótimos resultados, os autores alertam para as dificuldades do problema inverso, tais como: existência de mínimos locais; presença de ruídos e incertezas do modelo; e a não-unicidade da solução.

Baseado na revisão supracitada, é possível notar claramente que o efeito de enrijecimento por **tensões residuais** é mais bem evidenciado em estruturas esbeltas, de tal

forma que praticamente nenhum trabalho foi encontrado na literatura sobre o assunto que utilizasse estruturas espessas.

3.2. Tensões Residuais de Soldagem via Métodos Numéricos

Kamtekar (1978) apresentou uma formulação para a resolução do problema de previsão de tensões residuais de soldagem utilizando o método das diferenças finitas. A evolução temporal da distribuição de temperatura sobre a placa foi determinada através das fórmulas analíticas desenvolvidas por Rosenthal (1941). Neste estudo, o tempo foi discretizado e, para cada instante considerado, o campo de temperatura foi atualizado e as deformações plásticas foram recalculadas utilizando o método das soluções elásticas sucessivas (Mendelson, 1968). Foi considerado que apenas a tensão de escoamento variava com a temperatura, permanecendo as outras propriedades constantes. A Figura 3.4 mostra os resultados obtidos com a técnica apresentada e a comparação com o método dos elementos finitos.

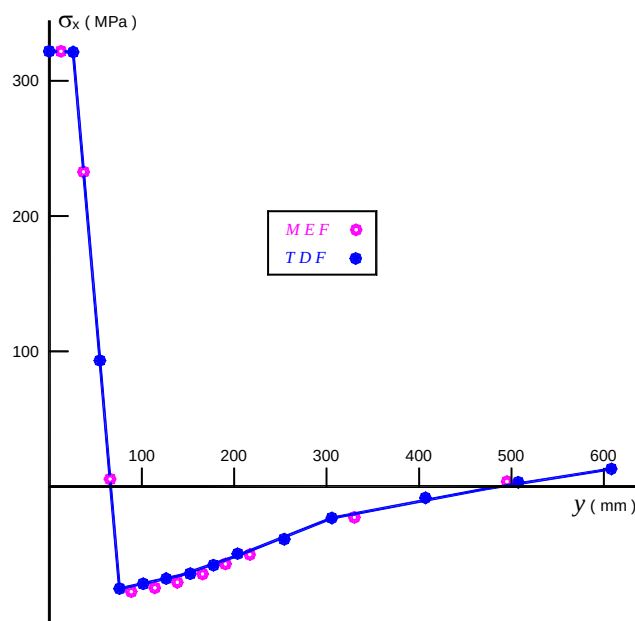


Figura 3.4 – Comparação entre o resultados obtidos por Kamtekar e MEF (Kamtekar, 1978).

Papazoglou e Masubuchi (1982) descrevem uma técnica para analisar temperaturas, tensões térmicas e tensões residuais que ocorrem na soldagem utilizando o método dos elementos finitos. Foi incluído na análise o efeito das transformações de fase que ocorrem durante o processo. Os autores verificaram a grande importância da transformação de fase no resultado, principalmente quando se trata da soldagem de aços temperados e revenidos.

O trabalho de Free e Goff (1989) relaciona-se com a previsão de tensões residuais de soldagem multipasse com o uso da técnica de elementos finitos. Os autores apresentam uma formulação térmica e mecânica, na qual é considerada uma variação muito simplificada da tensão de escoamento com a temperatura. É assumida ainda plasticidade perfeita para o material usado. Apenas a seção transversal foi modelada. Apesar das simplificações, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios pelos autores.

Lindgren *et al.* (1997) utilizaram a técnica de remalhagem automática (ou malha adaptativa) na simulação da soldagem por elementos finitos. Os autores verificaram que esta técnica se mostrou eficiente, reduzindo em 60% o tempo computacional sem nenhuma perda em precisão dos resultados.

Procedimentos de modelagem bidimensionais foram realizados por Hong *et al.* (1998-a) para previsão de tensões residuais de soldas multipasse. Foi gerado um modelo de deformação plana generalizada, com uma solda de cinco passes numa placa, e um modelo axissimétrico com uma solda circunferencial de seis passes num tubo. Nos dois casos, os resultados foram comparados com dados experimentais. Os autores consideraram as variações das propriedades termomecânicas com a temperatura, além de um encruamento até um máximo de 20 % da tensão de escoamento. Os efeitos da magnitude da entrada de calor e temperatura inicial sobre as tensões residuais também foram analisados e se mostraram pouco influentes.

Zhang e Dong (1998) conduziram uma série de análises por elementos finitos tridimensionais para investigar as características das tensões residuais de soldagem em reparos de tubos. O efeito do comprimento do reparo sobre a distribuição das tensões foi investigado em detalhe. Na modelagem, um elemento de casca compósito 3D desenvolvido pelos autores foi utilizado. Este elemento é capaz de simular soldas multipasse, com a vantagem de ter um custo computacional menor do que quando usa um elemento sólido. Verificou-se que o comprimento do reparo tem um efeito significativo sobre as tensões residuais geradas. Para o reparo mais curto, notou-se uma tendência em desenvolver altas tensões de tração na superfície externa. Já para o reparo mais longo, as tensões residuais são uniformes na porção média da região do reparo.

Hong *et al.* (1998-b) alertam para o fato de que a deformação plástica acumulada deve ser aliviada quando a temperatura de fusão é alcançada. Assim, torna-se necessário impor a relaxação da deformação plástica acumulada quando o material fundir, sob pena de superestimar os valores de tensões na zona da solda.

Uma solução analítica para a temperatura transiente de um corpo semi-infinito, sujeito a uma fonte de calor elipsoidal dupla em movimento, foi proposta por Nguyen *et al.* (1999) e utilizada para avaliação de tensões residuais de soldagem. Esta solução analítica foi utilizada

para obter a história térmica de uma simples deposição numa placa e, em seguida, avaliar as tensões residuais por deformações inerentes e método dos elementos finitos. Uma soldagem foi realizada em um corpo de prova de aço HT780 e usada para medição de tensões residuais por meio de extensômetros. Resultados satisfatórios foram obtidos comparando simulação e experimento. Os autores concluíram que a solução analítica proposta tem muito potencial para a avaliação de tensões residuais em placas.

Fricke *et al.* (2001) desenvolveram um programa de elementos finitos, baseado no código comercial ABAQUS, para a simulação de soldagem. Segundo os autores, este programa pode ser utilizado para melhorar o processo de soldagem, fornecer informação sobre a possibilidade de sensitização da zona afetada pelo calor, avaliar efeito da largura do *gap* nas tensões residuais resultantes, dentre outras características. Os autores realizaram uma simulação de soldagem circunferencial de um tubo de aço inoxidável austenítico.

Pilipenko (2001) apresentou uma análise da soldabilidade de estruturas que compõem cascos de navios de parede espessa utilizando resultados experimentais, numéricos e analíticos. O método dos elementos finitos foi o mais enfatizado. O processo de soldagem simulado foi o arco submerso multi-eletrodo. O programa utilizado foi o ABAQUS®. Diferentes técnicas visando a redução do efeito negativo da soldagem foram avaliadas.

Francis (2002) realizou simulações de soldagem para juntas de topo e em “T” usando elementos finitos com o software comercial SYSWELD®, que inclui fonte de calor móvel, deposição de material, transformações metalúrgicas, propriedades de material dependentes da temperatura, plasticidade, dentre outras características. Uma análise 3D foi realizada para a junta de topo e os resultados foram comparados com aqueles publicados na literatura. Para uma análise quase-estacionária os resultados apresentaram um desvio de 3,6 %, enquanto que para uma análise transiente completa o desvio foi de 13 %. Já para a junta em “T”, os resultados da análise quase-estacionária apresentaram uma discrepância na tensão residual longitudinal e a análise transiente completa não foi realizada devido a grandes tempos de cálculo. Um modelo 3D-2D (*solid-shell*) foi gerado para este caso, mas a análise mecânica não convergiu.

As tensões residuais da soldagem do tipo *ring-weld* foram estudadas por Rodeiro (2002), que gerou um modelo de elementos finitos sólido-tridimensional no código de cálculo Ansys® 6.1 para obtenção do campo de temperatura transiente e tensões residuais. A dependência das propriedades físicas e mecânicas com a temperatura bem como a deposição de material durante a soldagem foram consideradas. Medições experimentais com termopares foram realizadas e comparados com os resultados numéricos, os quais mostraram uma boa correlação. Já os resultados do modelo mecânico não foram validados com ensaios.

Zhu e Chao (2002) estudaram o efeito da variação dos valores das propriedades do material com a temperatura na simulação da soldagem, em termos do campo de temperatura transiente, tensões residuais e distorções. Três ajustes para os valores das propriedades do material foram testados computacionalmente: valores em função da temperatura; valores constantes e iguais aos correspondentes na temperatura ambiente; e valores constantes e iguais às médias na faixa de temperatura alcançada. Os autores concluíram que, com exceção da tensão de escoamento, o uso de propriedades de material constantes na temperatura ambiente gera resultados razoáveis para os campos de temperatura transiente, tensões residuais e distorções.

Cho *et al.* (2004) investigaram as tensões residuais após a soldagem e após um tratamento térmico pós-soldagem utilizando o método dos elementos finitos. Foi realizada uma análise bidimensional térmica seguida de uma análise mecânica com o programa ANSYS®. Os resultados numéricos de tensões residuais numa solda multipasse foram comparados a resultados experimentais de tensão residual superficial usando o método do furo cego. A Figura 3.5 apresenta uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais. Os autores concluíram que os dados experimentais estão consistentes com os resultados numéricos.

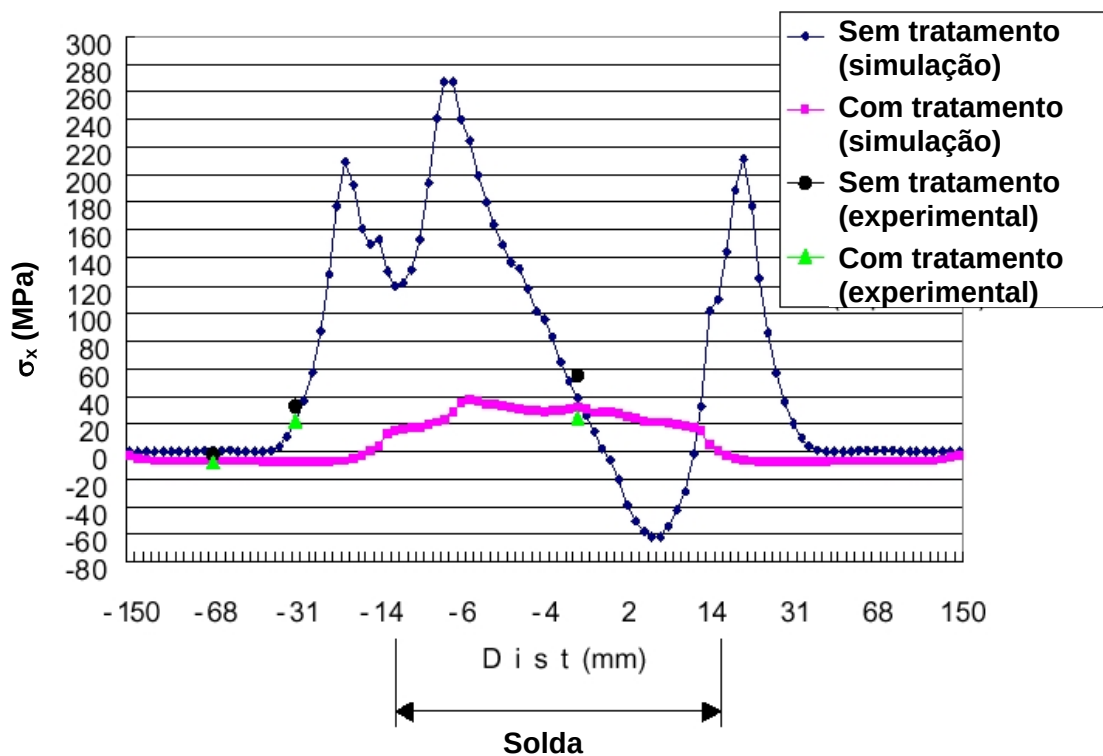


Figura 3.5 – Comparação das tensões residuais experimentais e numéricas (Cho *et al.*, 2004).

Depradeux (2004) realizou simulações numéricas de soldagem utilizando o código de cálculo Code_Aster®. O processo de soldagem adotado foi o TIG em uma placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L. Um aparato experimental incluindo termopares e extensômetros foi construído a fim de validar os resultados numéricos. Foram gerados diferentes modelos: tridimensional completo, bidimensional da seção transversal e bidimensional do plano médio da placa. A Figura 3.6 apresenta os isovalores de tensão residual obtidos com o modelo 3D. Já a Fig. 3.7 mostra a comparação entre os resultados numéricos e experimentais obtidos na face inferior da placa numa seção transversal, para as tensões longitudinais e transversais.

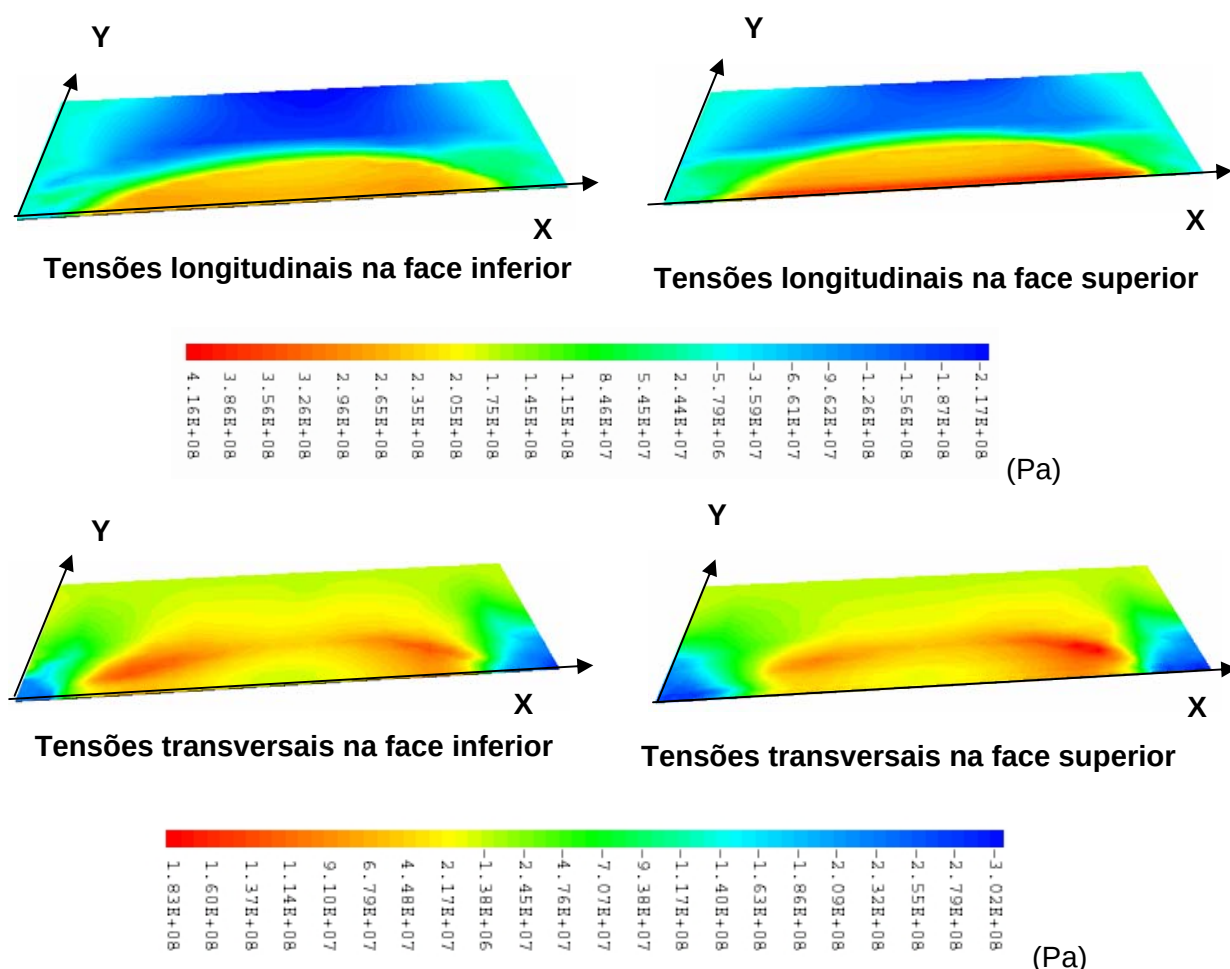


Figura 3.6 – Isovalores das tensões residuais de soldagem obtido com modelo 3D (extraído de Depradeux, 2004).

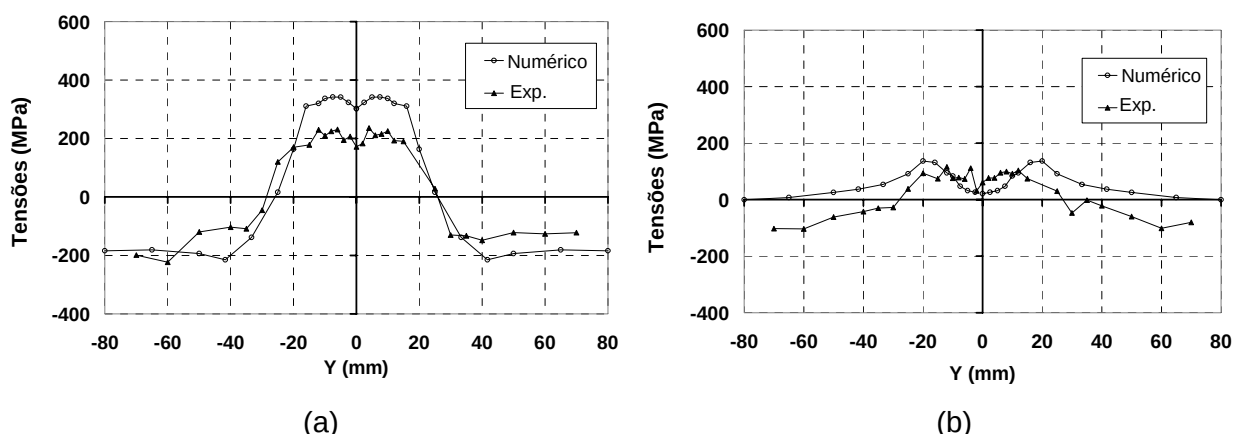


Figura 3.7 – Comparação entre resultados numéricos e experimentais – face inferior da placa: (a) tensões residuais longitudinais e (b) transversais (Depradeux, 2004).

Mochizuki *et al.* (2005) estudaram, através de simulações numéricas, as características da geração de tensões residuais durante a soldagem e sua relação com as transformações de fase. Para tanto, os autores utilizaram um simulador experimental de ciclos térmicos de soldagem. O programa SYSWELD[®] foi utilizado e o modelo construído com elementos isoparamétricos axissimétricos de quatro nós. As tensões térmicas, bem como as tensões residuais, se mostraram fortemente sensíveis aos efeitos da taxa de resfriamento e das transformações de fase.

Camilleri e Gray (2005) melhoraram a eficiência computacional para simulação da soldagem no contexto de previsão das distorções, com enfoque nas deformações fora do plano. Para tanto, os autores passaram de uma análise termo-elastoplástica transiente completa para variantes de um tratamento térmico, elasto-plástico e estrutural desacoplados. A evolução da distorção angular pôde ser tratada simplesmente através de análises estáticas não-lineares, enquanto que a distorção de flexão longitudinal pôde ser estabelecida via algoritmos que tratam um comportamento do material elástico-perfeitamente plástico.

Simulações numéricas para o alívio mecânico de tensões foram realizadas por Siddique e Abid (2005). Esta técnica foi aplicada a soldagem circunferencial de tubos visando reduzir corrosão sob tensão e melhorar a vida de componentes de vasos de pressão. Foi criado um modelo de elementos finitos bi-dimensional axissimétrico de um tubo sujeito a uma soldagem TIG multi-passe seguido de um processo de alívio mecânico de tensão. Os autores demonstraram que tanto uma pressão interna como uma tração axial tem um efeito significativo nas tensões residuais na superfície interna da junta.

Ji *et al.* (2005) utilizaram o método dos elementos finitos para avaliar a influência da seqüência de soldagem nas tensões residuais de uma placa espessa. Verificou-se que é

possível melhorar a distribuição das tensões residuais e reduzir o pico de tensão. Os resultados numéricos foram validados com resultados experimentais, conforme mostrado na Figura 3.8.

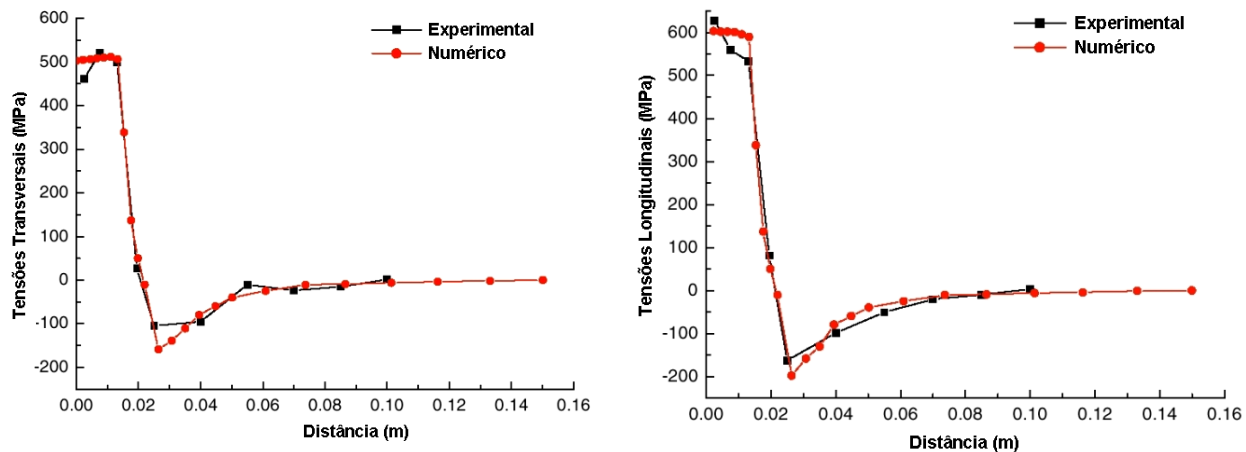


Figura 3.8 – Comparação entre resultados numéricos e experimentais (Ji *et al.*, 2005).

O levantamento bibliográfico efetuado mostra a evolução histórica das técnicas de simulação numérica do processo de soldagem, comprova que sua aplicação sofreu grande impulso nos últimos anos, em decorrência dos aumentos da capacidade de processamento dos computadores e a disponibilidade de programas comerciais de análise por elementos finitos. Demonstra ainda o esforço atual de pesquisa visando o aperfeiçoamento dos modelos numéricos e a ampliação da aplicabilidade das simulações de soldagem a situações complexas reais da indústria.