

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1. Conclusões

Nas condições deste trabalho, ou seja, basicamente soldagens com o processo TIG autógeno (sem material de adição) em componentes simplesmente apoiados (sem engastes) e ensaios dinâmicos na condição livre (suspenso por cabos flexíveis), utilizando-se placas retangulares finas para representar as estruturas esbeltas e basicamente tubos de diferentes comprimentos (200 a 800 mm) para representar as estruturas espessas, pode-se concluir que:

- As frequências naturais relativas aos modos de respiração de tubos são pouco influenciadas pelas tensões residuais de soldagem. Assim, para este tipo de componente, deve-se observar preferencialmente as frequências dos modos de flexão, as quais devem se apresentar numa banda de frequência a mais baixa possível. Isto para promover uma melhor visualização das alterações geradas, já que quanto mais estreita a banda de frequências, maior a resolução em frequência das FRFs (menor o Δf);
- As variações nas frequências naturais de vibração de estruturas espessas geradas por tensões inseridas pela soldagem, nas condições deste trabalho, mostraram ser pequenas (sempre inferiores a 3 %), ao contrário de quando em estruturas esbeltas (placas finas), que alcançam valores da ordem de 20 %;
- A intensidade destas variações de frequência é influenciada pelos parâmetros de soldagem e, conseqüentemente, pela energia de soldagem. De forma geral, constatou-se que um aumento na energia de soldagem tende a elevar as variações das frequências naturais. Entretanto, o resultado obtido para a *Placa 03* mostra que existe um valor limite para a energia de soldagem, acima do qual estas variações tendem a reduzir;
- Na simulação da soldagem da placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L, as aproximações e simplificações adotadas, especialmente as relativas à geometria da

entrada de calor e às não-linearidades das propriedades do material, se mostram adequadas, gerando resultados coerentes com a realidade;

- Para alcançar melhores resultados nas simulações, pode-se concluir que se deve usar dados experimentais para ajustar a análise térmica (para concordar melhor a distribuição da fonte de calor e minimizar os erros desta etapa), já que para uma mesma energia de soldagem, as variações nas frequências naturais são bastante sensíveis à distribuição de calor;
- O procedimento de modelagem adotado é adequado para se verificar o efeito de enrijecimento por tensão residual de soldagem;
- Para as estruturas modeladas, as tensões residuais de soldagem não influenciaram na ordem e na forma dos modos de vibrar;
- As distorções de soldagem, para o processo TIG autógeno, têm pequeno efeito sobre as frequências naturais de vibração quando comparado com o efeito das tensões residuais;
- Ao contrário do que foi verificado nos ensaios de vibração a baixa frequência, houve uma tendência de elevação dos picos de frequência do sinal de impedância eletromecânica após a soldagem;
- O sinal de impedância eletromecânica se mostrou pouco sensível às tensões residuais de soldagem nas condições testadas.

Pode-se destacar como as principais contribuições do presente trabalho:

- Constatação numérica e experimental da pequena influência das tensões residuais de soldagem sobre o comportamento dinâmico de estruturas espessas;
- Verificação de que os valores das frequências naturais dos modos de respiração de tubos são pouco influenciados pelas tensões residuais de soldagem;
- Avaliação da sensibilidade das variações dos valores de frequência com a energia de soldagem, a qual depende da estrutura, sendo bem mais significativas em estruturas esbeltas;
- Descrição de um procedimento de modelagem para a simulação do processo de soldagem TIG sem adição de material utilizando o programa ANSYS®, o qual é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Utilização deste procedimento de modelagem para avaliar numericamente o efeito de enrijecimento por tensões residuais de soldagem em diferentes estruturas;

- Verificação de que as distorções de soldagem, para o processo TIG autógeno, têm pequeno efeito sobre as frequências naturais de vibração quando comparado com o efeito do enrijecimento pelas tensões residuais de soldagem;
- Obtenção de resultados preliminares de avaliação do enrijecimento por tensões residuais de soldagem utilizando a técnica da impedância eletromecânica.

De uma forma geral, os resultados deste trabalho proporcionam o evidenciamento numérico e experimental da importância das tensões residuais de soldagem sobre o comportamento dinâmico de componentes estruturais, principalmente para estruturas esbeltas. Isto demonstra a possibilidade de utilizar o enrijecimento por tensão para implementar uma metodologia de controle de qualidade de componentes soldados.

8.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Em relação aos estudos sobre o enrijecimento por tensões residuais de soldagem, a fim de dar continuidade a este trabalho, sugere-se alguns estudos:

- Utilização da técnica de impedância eletromecânica para avaliar o efeito do enrijecimento por tensão em estruturas espessas soldadas. Este estudo visa avaliar se os picos de frequência no sinal de impedância (em bandas de alta frequência) são mais sensíveis às tensões residuais de soldagem do que os picos a baixa frequência;
- Realização de uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros (como, por exemplo, energia de soldagem, coeficiente de convecção e temperatura ambiente) sobre as frequências naturais de vibração. O objetivo principal é avaliar quais fatores influenciam mais o comportamento dinâmico de uma determinada estrutura. Propõe-se, então, um estudo numérico utilizando as ferramentas de análise probabilística do ANSYS® (PDS – Probabilistic Design System).
- Avaliação da influência das condições de contorno da estrutura (engastada, apoiada, livre, etc.) sobre as tensões residuais de soldagem e sobre as respostas dinâmicas;
- Implementação de um procedimento automatizado para avaliação dos níveis de tensões residuais de componentes soldados a partir de respostas vibratórias, ou seja, com um simples ensaio dinâmico obter, via métodos inversos, informações sobre o estado de tensão do componente soldado.

A simulação da soldagem ainda requer estudos complementares para um melhor aperfeiçoamento da modelagem e dos resultados obtidos. Assim, neste aspecto, alguns estudos são sugeridos:

- Simulação da soldagem com uma distribuição de calor variável com o tempo. Isto é particularmente importante para simulações de soldagem sem material de deposição, onde, no início do processo, o calor é essencialmente aplicado na superfície do componente a ser soldado (distribuição superficial). Em seguida, a distribuição de calor passa a ser volumétrica, mas variável (em termos da forma de entrada de calor) até atingir a estabilidade, quando uma distribuição volumétrica constante pode ser assumida. Da mesma forma, ao se aproximar da extremidade final do componente, a distribuição de calor deve tornar-se variável novamente. Obviamente, admite-se que a energia de soldagem permanece constante durante todo o processo;
- Implementação de uma rotina em MATLAB® para geração automática da distribuição da fonte de calor para ser utilizada em simulações de soldagem no programa ANSYS®. Este trabalho teria por objetivo facilitar a modelagem da fonte de calor com base em diferentes formas e modelos (ex.: dupla elipsóide de Goldak, gaussiana, etc.);
- Avaliação da utilização de softwares específicos, como o SYSWELD® para simular soldagem levando em conta as transformações de fase no estado sólido e diferentes processos com e sem deposição de material;
- Simulação numérica de outros processos de soldagem com deposição de material em peças de geometrias mais complexas, incluindo soldagem multi-passes;
- Fazer medições de tensões residuais de soldagem utilizando técnicas experimentais, com o intuito de validar modelos numéricos de simulação da soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, S.F.M. e Hansen, J.S. Enhanced Elastic Buckling Loads of Composite Plates with Tailored Thermal Residual Stresses. **Transactions of the ASME**. Vol. 64, pp. 772-780, 1997.

Almeida, S.F.M. e Hansen, J.S. Natural Frequencies of Composite Plates with Tailored Thermal Residual-Stresses. **International Journal of Solids and Structures**. Vol. 36, pp.3517-3539, 1999.

ANSYS. **Theory reference Manual**. Versão 5.4, 1997.

AWS. **Welding Handbook**. 8ª edição, American Welding Society, USA, vol. 1, 1997.

Bassily, S.F. e Dickinson, S.M. Buckling and Lateral Vibration of Rectangular Plates Subject to Inplane Loads – A Ritz Approach. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 24, n. 2, pp. 219-239, 1972.

Camilleri, D. e Gray, T. G. F. Computationally efficient welding distortion simulation techniques. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**. Vol. 13, pp. 1365-1382, 2005.

Cho, J.R., Lee, B.Y., Moon, Y.H e Van Tyne, C.J. Investigation of Residual Stress and Post Weld Treatments of Multi-Pass Welds by Finite Element Method and Experiments. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 155-156, pp. 1690-1695, 2004.

Cullity, B.D. **Elements of X-Ray Diffraction**. Second edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1978.

Depradeux, L. **Simulation Numerique du Soudage – Acier 316L – Validation sur Cas Tests de Complexite Croissante**. 2004. Tese de Doutorado, Ecole Doctorale des Sciences de L'Ingenieur de Lyon, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.

Donadon, M.V., Almeida, S.F.M. e Faria, A.R. Stiffening Effects on Natural Frequencies of Laminated Plates with Piezoelectric Actuators. **Composites: Part B**. Vol. 33, pp. 335-342, 2002.

Dupas, P. e Waeckel, F. **Recueil bibliographique de caractéristiques thermomécaniques pour l'acier de cuve, les revêtements inoxydables et les alliages 182 et 600**. Rapport EDF/DER HI-74/93/097, HT-26/93/058A, 46p, 1994.

Faria, A.R. On Buckling Enhancement of Laminated Beams with Piezoelectric Actuators via Stress Stiffening. **Composite Structures**. Vol. 65, pp. 187-192, 2004.

Fassani, R.N.S e Trevisan, O.V. Analytical Modeling of Multipass Welding Process with Distributed Heat Source. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. Vol. XXV, No. 3, pp. 302-305, 2003.

Francis, J.D. **Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis**. 2002. Dissertação de Mestrado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

Free, J.A. e Goff, R.F.D.P. Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method. **Computers and Structures**. Vol. 32, n. 2, pp. 365-378, 1989.

Fricke, S., Keim, E. e Schmidt, J. Numerical Weld Modeling – a Method for Calculating Weld-Induced Residual Stresses. **Nuclear Engineering and Design**. Vol. 206, pp. 139-150, 2001.

Gibilisco, S. **Manual de Eletrônica e de Telecomunicações**. Reichmann e Affonso Editores, Brasil, 2002.

Grant, P. V. e Lord, J. D. **An Evaluation of Four Hole Drilling Analysis Techniques with Respect to Non-Uniform Residual Stress Fields**. 2002. NPL Materials Centre.

Hong, J.K., Tsai, C.-L. e Dong, P. Assessment of Numerical Procedures for Residual Stress Analysis of Multipass Welds. **Welding Journal**. Vol. 77, n. 9, pp. 372-382, 1998-a.

Hong, J.K., Dong, P. e Tsai, C.L. **Application of Plastic Strain Relaxation Effect in Numerical Welding Simulation**. In: Trends in Welding Research, Proceedings of the 5th International Conference, AWS, U.S.A., pp. 999-1004, 1998-b, Georgia.

Incropera, F.P. e de Witt, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 3rd edition, John Wiley, 1990.

Ji, S. D., Fang, H. Y., Liu, X. S. e Meng, Q. G. Influence of a welding sequence on the welding residual stress of a thick plate. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**. Vol. 13, pp. 553-565, 2005.

Kaldas. M.M. e Dickinson, S.M. Vibration and Buckling Calculations for Rectangular Plates subject to Complicated In-plane Stress Distributions by using Numerical Integration in a Rayleigh-Ritz Analysis. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 75, n. 2, pp. 151-162, 1981-a.

Kaldas. M.M. e Dickinson, S.M. The Flexural Vibration of Welded Rectangular Plates. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 75, n. 2, pp. 163-178, 1981-b.

Kamtekar, A.G. The Calculation of Welding Residual Stresses in Thin Steel Plates. **International Journal of Mechanical Sciences**. Vol. 20, pp. 207-227, 1978.

Kandil, F.A., Lord, J.D., Fry, A.T. e Grant, P.V. **A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection**. 2001. NPL Materials Centre, UK.

Lemaitre, J. e Chaboche, J. L. **Mécanique des Matériaux Solides**, Dunod, 2nd edition, 1988.

Liang, C., Sun, F.P., e Rogers, C.A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 5, pp. 12–20, 1994.

Lindgren, L.-E., Häggblad, H.-Å., McDill, J.M.J. e Oddy, A.S. Automatic Remeshing for Three-Dimensional Finite Element Simulation of Welding. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. Vol. 147, pp. 401-409, 1997.

Lu, J., James, M. e Roy, G. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Society for Experimental Mechanics, Inc., 1996.

Massoud, M. **Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques**. Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, pp. 4-14, 1985.

McConnel, K.G. **Vibration Testing. Theory and Practice**. John Wiley & Sons, 1995.

Mead, D.J. Vibration and Buckling of Flat Free-Free Plates under non-Uniform in-Plane Thermal Stresses. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 260, pp. 141-165, 2003.

Meirovitch, L. **Principles and Techniques of Vibrations**, Prentice-Hall Inc., 1997.

Mendelson, A. **Plasticity: Theory and Application**. Macmillan, U.S.A., 353 p., 1968.

Mochizuki, M., Matsushima, S., Toyoda, M. e Thaulow, C. Fundamental study of thermal stress generation during welding heat cycles. Studies on numerical simulation of temperature, microstructure and thermal stress histories during welding, and their application to welded structures. **Welding International**. Vol. 19 (9), pp. 702-710, 2005.

Moura Jr., J.R.V. **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Moura Jr, J.R.V. e Steffen Jr, V. **Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation**. In: XXII International Modal Analysis Conference – IMAC, 2004, Dearborn, MI – USA.

Murthy, Y.V., Rao, G.V. e Iyer, P.K. Numerical Simulation of Welding and Quenching Processes using Transient Thermal and Thermo-Elastic-Plastic Formulations. **Computers and Structures**. Vol. 60, No. 1, pp. 131-154, 1996.

Nguyen, N.T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N. e Maeda, Y. Analytical Solution of Double-Ellipsoidal Moving Heat Source and Its Use for Evaluation of Residual Stresses in Bead-on-Plate. **International Workshop on Fracture Mechanics & Advanced Materials**. Sydney University, Dec. 8-10, 1999.

Papazoglou, V.J. e Masubuchi, K. Numerical Analysis of Thermal Stresses during Welding Including Phase Transformation Effects. **Journal of Pressure Vessel Technology**. Vol. 104, pp. 198-203, 1982.

Park, G. e Inman, D.J. **Impedance-based structural health monitoring**. In: Pan American Advanced Damage Prognosis Studies, 2003, Florianópolis – SC.

Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R. e Inman, D.J. Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward. **The Shock and Vibration Digest**, Vol. 35, No. 6, pp. 451-463, November 2003.

Park, G., Rutherford, A.C., Sohn, H. e Farrar, C.R. An Outlier Analysis Framework for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 286, pp. 229-250, 2005.

Parlane, A.J.A., Allen, J.S., Harrison, J.D., Leggatt, R.H., Dwight, J.B., Bailey, N., Procter, E. e Saunders, G.G. **Residual Stresses and their Effect**. 1981. The Welding Institute, U.K.

Pereira Jr, I. P. **Caracterização Numérica e Experimental da Evolução do Dano em Materiais**. 2004. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Pilipenko, A. **Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques**. 2001. Tese de doutorado, Department of Machine Design and Materials Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Radaj, D. **Welding Residual Stresses and Distortion – Calculation and Measurement**. DVS Verlag, 2003.

Rade, D. A., Vieira Jr., A. B., Rojas, J. E. e Bezerra, A. C. **Influence of Stress-Stiffening on the Dynamic Behaviour of Plates: Direct and Inverse Problems**. In: XI International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics – DINAME, 2005, Ouro Preto – MG.

Raju, V. **Implementing Impedance-Based Health Monitoring**. 1997. Dissertação de Mestrado, Virginia Tech, USA.

Rodeiro, P.F. **Análise de Distribuição de Temperaturas e Tensões Residuais em Soldas do Tipo Ring-Weld**. 2002. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Rojas, J.E., Viana, F.A.C., Rade, D.A. e Steffen Jr, V. Identification of External Loads in Mechanical Systems Through Heuristic-Based Optimization Methods and Dynamic Responses. **Latin American Journal of Solids and Structures**. Vol. 1, pp. 297-318, 2004.

Rosenthal, D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. **Welding Journal**. Vol. 20, N. 5, pp. 220-234, 1941.

Siddique, M. e Abid, M. Numerical simulation of mechanical stress relieving in a multi-pass GTA girth welded pipe–flange joint to reduce IGSCC. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**. Vol. 13, pp. 1383-1402, 2005.

SYSWELD. **Welding Wizard Reference Manual**. ESI Group, 2005.

Ugural, A.C. **Stresses in Plates and Shells**, McGraw-Hill Inc., 1981.

Vieira Jr, A.B. **Identificação de Tensões em Placas Retangulares a partir de Respostas Vibratórias, com aplicação a Tensões Residuais de Soldagem**. 2003. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Vieira Jr, A.B. e Rade, D.A. **Identification of Stresses in Plates from Dynamic Responses**. In: XXI IMAC – International Modal Analysis Conference, 2003, Florida, USA.

Vieira Jr, A.B., Scotti, A. e Rade, D.A. **Assessment of Welding Residual Stresses in Rectangular Plates using Vibration Data**. In: XVII COBEM – 17th International Congress of Mechanical Engineering, 2003, São Paulo, SP.

Vila Real, P.M.M, Cazeli, R., da Silva, L.S., Santiago, A. e Piloto, P. The Effect of Residual Stresses in the Lateral-Torsional Buckling of Steel I-Beams at Elevated Temperature. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 60, pp. 783-793, 2004.

Wang, J. e Mote Jr., C. D. The Effect of Roll-Tensioning on Bandsaw Plate Vibration and Stability. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 175, n. 5, pp. 677-692, 1994.

Withers, P. J. e Bhadeshia, H. K. D. H. Residual Stress – I: Measurement techniques. **Materials Science and Technology**. Vol. 17, pp. 355-365, 2001.

Yaghi, A. e Becker, A. State of the Art Review – Weld Simulation using Finite Element Methods. Project FENET EU Thematic Network, Report No. FENET-UNOTT-DLE-08, 2004. Disponível em: <http://www.fe-net.org/technology/dle/>. Acesso em 12 fev. 2005.

Yang, I.H. e Shieh, J.A. Vibrations of Initially Stressed Thick, Rectangular, Orthotropic Plates. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 119, n. 3, pp. 545-558, 1987.

Zhang, J. e Dong, P. **3-D Residual Stress Characteristics in Pipe Repair Welds**. In: Trends in Welding Research, Proceedings of the 5th International Conference, AWS, U.S.A., pp. 949-954, 1998, Georgia.

Zhu, X.K. e Chao, Y.J. Effects of Temperatura-Dependent Material Properties on Welding Simulation. **Computers and Structures**. Vol. 80, pp. 967-976, 2002.

ANEXO

EFEITO DO PREAQUECIMENTO SOBRE AS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM

A operação de preaquecimento é usada em soldagem principalmente com o intuito de reduzir a velocidade de resfriamento na zona afetada pelo calor e, com isto, se obter microestruturas mais dúcteis, conseqüentemente, com menos susceptibilidade a trincas. Entretanto, há certa divergência sobre o efeito que o preaquecimento possa ter sobre a propagação de trincas, já que é difícil prever se esta operação aumenta ou diminui as tensões residuais de soldagem.

Para estudar o assunto, poder-se-ia optar por uma metodologia experimental. Contudo, as técnicas experimentais para medição de tensões residuais apresentam dificuldades inerentes a cada técnica, incertezas com relação aos resultados e, normalmente, custos financeiros e técnicos elevados. Além disso, para uma melhor avaliação do caso do preaquecimento, é desejável ter o perfil de tensão ao longo de uma seção. Isto dificulta ainda mais um procedimento experimental, já que seriam necessárias medições de tensão em um número elevado de pontos em cada um dos diversos corpos de prova, soldados em diferentes condições de preaquecimento.

Por outro lado, os métodos numéricos têm sido cada vez mais utilizados para simulação da soldagem, principalmente devido à evolução dos recursos computacionais. Nas primeiras simulações, muitas simplificações foram adotadas, tal como propriedades do material constantes com a temperatura (Rosenthal, 1941; Kamtekar, 1978). Os modelos evoluíram com o tempo, chegando a modelos tridimensionais e considerando não-linearidades geométricas e de comportamento do material, bem como o encruamento (Fricke *et al.*, 2001; Francis, 2002; Depradeux, 2004).

Mesmo considerando as limitações ainda existentes nos métodos numéricos, acredita-se que esta abordagem seja a mais apropriada para se estudar o efeito de variáveis sobre a geração de tensões térmicas em juntas soldadas. Sendo assim, este trabalho propõe uma avaliação numérica do efeito do preaquecimento sobre as tensões residuais de soldagem, através do uso do programa ANSYS®. Sem pretender alcançar a certeza dos resultados, objetiva-se, ao contribuir para a modelagem deste problema, embasar uma discussão com

outros pesquisadores sobre a polêmica do efeito do preaquecimento, fomentando a geração e divulgação de outros dados.

A.1. Materiais e Modelo

Com o intuito de simplificar os testes aqui propostos, a placa modelada no Capítulo 5 e validada por comparações com resultados experimentais de Depradeux (2004) é utilizada (placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L de dimensões $250 \times 160 \times 10$ mm). O processo de soldagem é o TIG sem deposição de material, com corrente de 150 A, tensão de 10 V, velocidade de 1 mm/s (6 cm/min). As simplificações e as propriedades do aço AISI 316L estão apresentadas no Capítulo 5.

No entanto, para avaliar melhor o efeito do preaquecimento sobre as tensões residuais, é interessante incluir também as alterações microestruturais causadas pelo próprio preaquecimento. Pode-se partir da hipótese de que a zona afetada pelo calor (ZAC) de um aço após a soldagem endureça (p. ex., aço temperável e velocidade de resfriamento rápida), permaneça com aproximadamente a mesma dureza do que antes (p. ex., aço não temperável) ou até amoleça (p. ex. aço temperado e velocidade de resfriamento lenta). Assim, há três possibilidades para testar. A primeira trata o caso em que o preaquecimento teria sido incapaz de amolecer o material e, por diversas razões combinadas, aumentaria a resistência mecânica da ZAC (limites de escoamento e ruptura) devido ao ciclo térmico, enquanto que na segunda possibilidade o material tem a resistência mecânica mantida, sendo reduzida na terceira possibilidade.

Para simular estes casos de uma forma mais simples, a placa foi modelada como se fosse constituída por materiais diferentes posicionados lado a lado (Fig. A.1). Inicialmente, ter-se-ia um material com resistência alterada pelo ciclo térmico (Material 3, próximo da linha de soldagem) e um material sem modificação (Material 1). Para se aproximar de uma situação mais real, interpôs-se um material com uma resistência intermediária entre os materiais 1 e 3 (Material 2). Desta forma, o material pode se apresentar sob 3 de 5 condições de resistência mecânicas diferenciadas, a saber, amolecido pelo ciclo térmico (menor resistência), amolecido parcialmente pelo ciclo térmico (menor resistência intermediário), inalterado (material de base), endurecido parcialmente pelo ciclo térmico (maior resistência intermediário) e endurecido pelo ciclo térmico (maior resistência). A largura que corresponde à alteração do material (Material 2 + Material 3) foi maior do que se espera de uma ZAC real para enfatizar melhor o comportamento de um material composto não homogêneo.

A região do preaquecimento considerada foi de 50 mm de distância para cada lado do cordão de solda. A Figura A.1 mostra também a seção utilizada para avaliação das tensões

residuais de soldagem (escolhida por ser a seção onde Depradeux realizou medições experimentais de tensão residual).

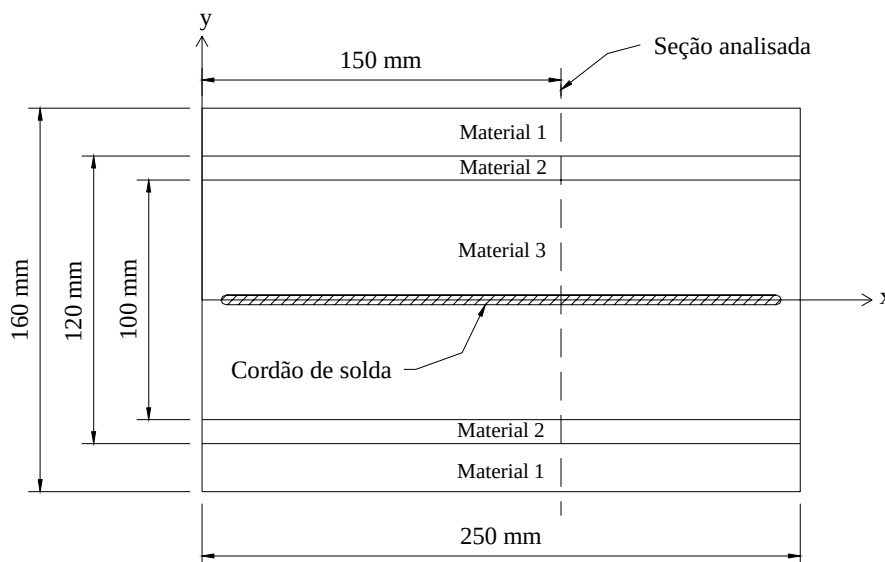


Figura A.1 – Desenho esquemático da placa estudada (espessura de 10 mm).

A Figura A.2 mostra as curvas de tensão $\times$ deformação em função da temperatura para o material nas suas cinco condições de resistência mecânica. Todas estas condições são hipotéticas, com exceção do material de base. Considera-se ainda que acima de 800°C as propriedades das cinco condições são idênticas, já que a microestrutura seria a mesma.

Conforme descrito no Capítulo 5, a malha foi gerada com elementos sólidos tridimensionais (SOLID70 e SOLID45) e elementos de superfície (SURF152) para incluir o efeito da radiação térmica. Uma distribuição de calor volumétrica é utilizada. A placa foi soldada apoiada em três pontos.

A.2. Resultados

Inicialmente é analisado o caso em que o material não sofre nenhum tipo de transformação. Cinco condições de preaquecimento são testadas: sem preaquecimento (28°C) e com preaquecimento de 100°C, 200°C, 300°C e 400°C. As tensões nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda são avaliadas na seção $x=150$ mm nas faces inferior e superior da placa. Os resultados para as tensões longitudinais estão apresentados na Fig. A.3. Já a Fig. A.4 expõe os resultados de tensão residual transversal. Por uma questão de simplificação, a palavra preaquecimento foi substituída por “Preq.” na legenda das figuras.

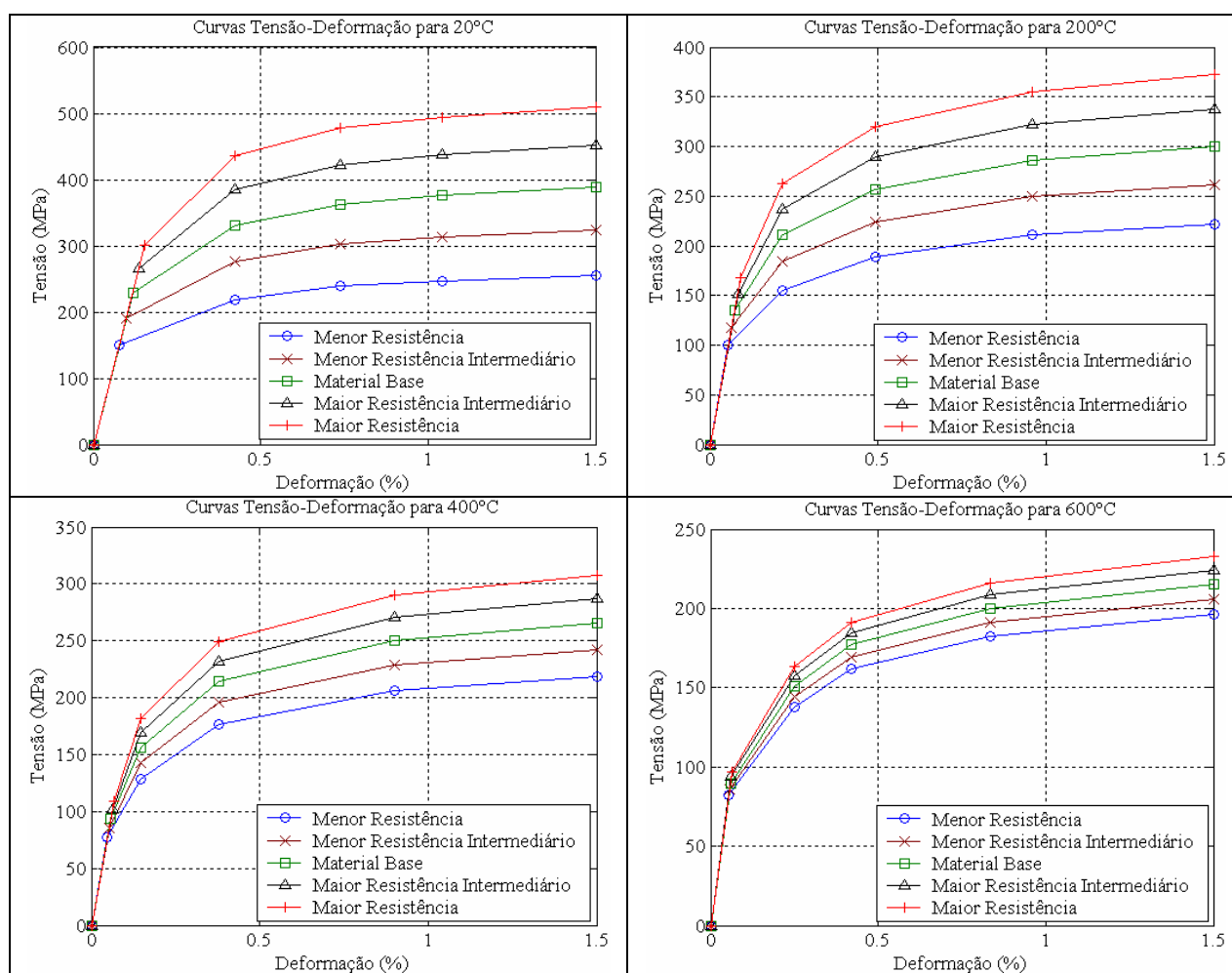


Figura A.2 – Curvas tensão-deformação para o material em diferentes condições de resistência mecânica na faixa de temperatura de ambiente a 600oC.

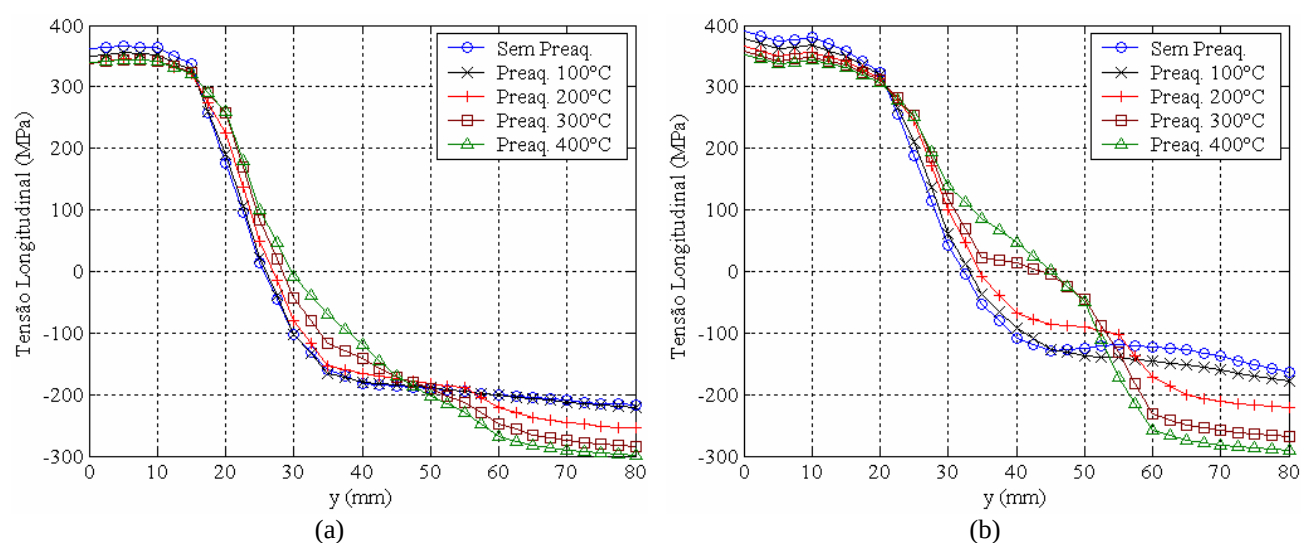


Figura A.3 – Tensões residuais longitudinais na seção x=150 mm nas faces inferior (a) e superior (b).

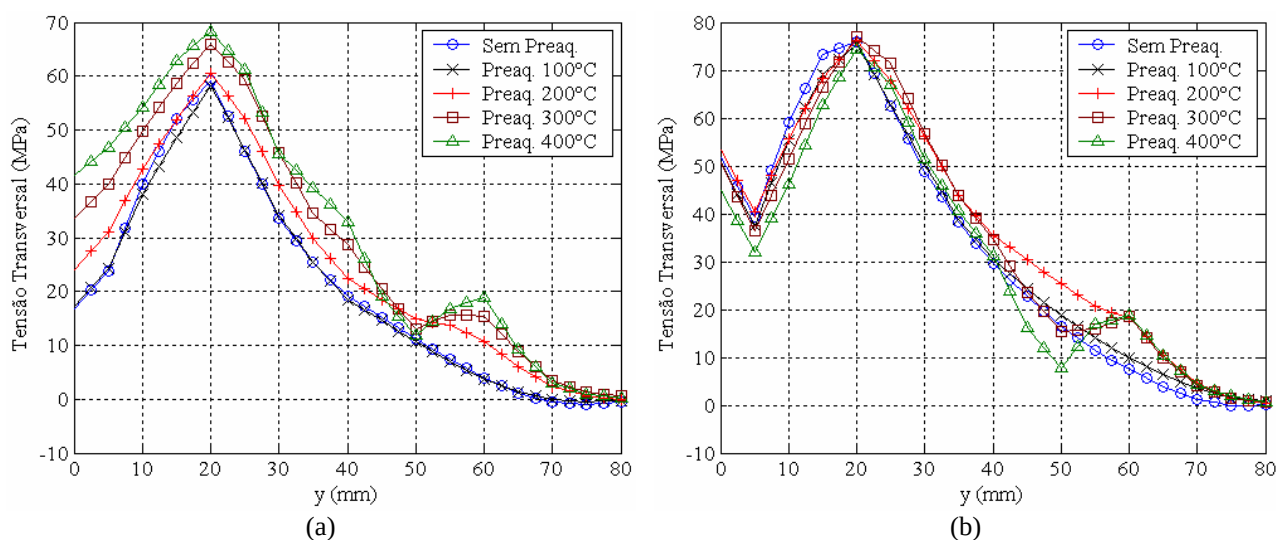


Figura A.4 – Tensões residuais transversais na seção $x=150$ mm nas faces inferior (a) e superior (b).

Para as tensões longitudinais na face inferior (Fig. A.3a), percebe-se que o preaquecimento reduziu (em até 20 MPa ou 5,5 %) as tensões de tração na linha central da placa. Entretanto, a partir de $y=16$ mm a situação é invertida e o preaquecimento causa um aumento nas tensões residuais, aumentando em até 4 mm ($\sim 15,7$ %) a zona da placa sob tração (onde ocorre a propagação de trincas). Além disso, com o preaquecimento, as tensões de compressão na borda da placa aumentaram em magnitude em até 80 MPa ($\sim 36,4$ %). Isto pode implicar em outros problemas, como flambagem localizada. Um comportamento similar ocorre com as tensões residuais longitudinais na face superior da placa (Fig. A.3b), no entanto, com diferenças mais acentuadas. Observe-se uma redução de até 37 MPa ($\sim 9,8$ %) nas tensões de tração na linha central da placa, mas um aumento de até 13 mm ($\sim 40,6$ %) na zona sob tração e um aumento de até 125 MPa ($\sim 75,8$ %) na magnitude das tensões de compressão na borda da placa.

Para as tensões residuais transversais, percebe-se que, na face inferior da placa (Fig. A.4a), o preaquecimento teve efeito de elevar as tensões, que são todas de tração, chegando a uma elevação máxima de 25 MPa (147 %). Já na face superior (Fig. A.4b), verifica-se que não houve uma variação muito grande.

Com a inclusão dos efeitos de transformações metalúrgicas, duas novas simulações foram realizadas, ambos com preaquecimento de 300°C. No primeiro caso, o material na zona do preaquecimento se torna mais resistente, enquanto que para o segundo caso, o material se torna menos resistente, conforme explicado na seção A.1. As tensões residuais na direção longitudinal para as faces inferior e superior da placa estão ilustradas na Fig. A.5, enquanto que as transversais estão mostradas na Fig. A.6. Quatro condições são apresentadas nas figuras: sem preaquecimento (Sem Preq.), com preaquecimento de 300°C sem alterações

microestruturais (Preaq. 300°C), com transformação para material de menor resistência (Preaq. 300°C – menor resistência) e com transformação para material de maior resistência (Preaq. 300°C – maior resistência).

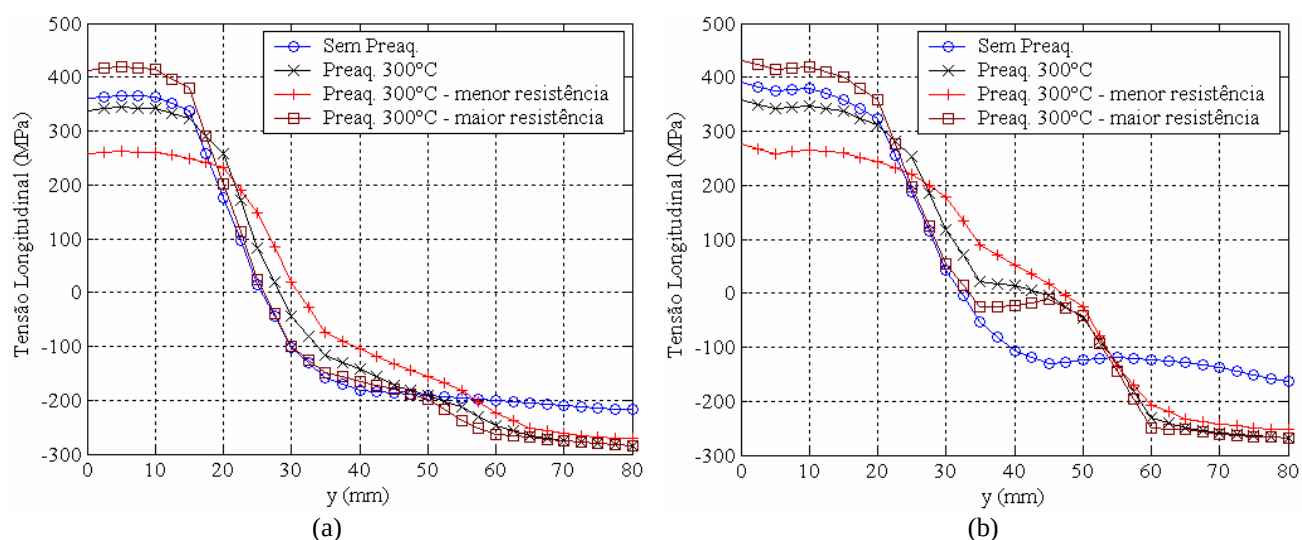


Figura A.5 – Tensões residuais longitudinais na seção x=150 mm nas faces inferior (a) e superior (b).

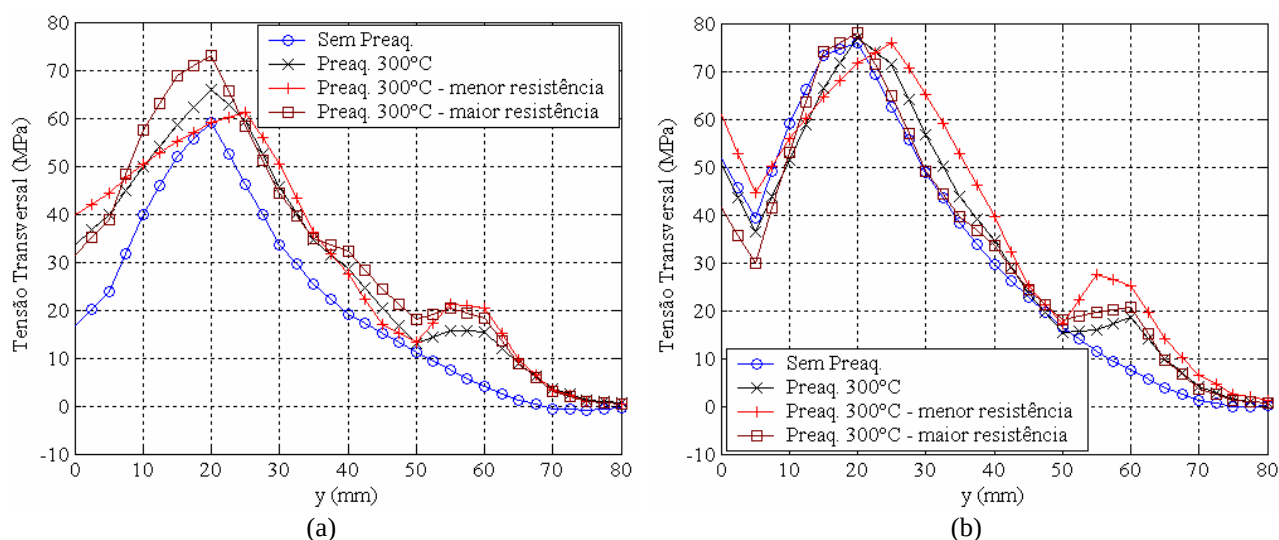


Figura A.6 – Tensões residuais transversais na seção x=150 mm nas faces inferior (a) e superior (b).

Na face inferior (Fig. A.5a), verifica-se que, caso o preaquecimento induza uma transformação metalúrgica para um material de menor resistência, a tensão residual próxima ao cordão de solda sofre uma redução significativa de até 100 MPa (~ 27,8 %). No entanto, o preaquecimento provocou novamente um aumento na região sob tração, neste caso em 5,5 mm (21,1 %), além de aumentar a magnitude da tensão de compressão na borda da placa

em 55 MPa (25,3 %). Para o caso em que o preaquecimento gera uma transformação metalúrgica para um material de maior resistência, a tensão residual próxima ao cordão de solda é aumentada de até 50 MPa (14 %), a zona sob tração é praticamente mantida a mesma e a tensão de compressão na borda da placa tem sua magnitude elevada em 67 MPa (30,9 %). Um comportamento similar é observado na face superior da placa (Fig. A.5b), diferindo apenas a intensidade das alterações.

Para as tensões residuais na direção transversal ao cordão, na face inferior da placa (Fig. A.6a), o preaquecimento sempre faz aumentar as tensões trativas, independentemente da posição do ponto em relação ao centro do cordão ou da resistência do material. Na face superior, o preaquecimento provoca menores tensões trativas próximo ao centro do cordão quando o material se torna mais resistente. Para o caso inverso, quando o material se torna menos resistente, os níveis destas tensões são aumentados. À medida que se afasta da linha central do cordão, a existência do preaquecimento pouco influencia nas tensões para material de resistência aumentada, mas é sempre prejudicial para o caso em que o material tem a resistência reduzida.

A Figura A.7 ilustra os campos de tensões residuais na direção longitudinal ao cordão de solda, os quais foram obtidos numericamente para as diferentes condições de preaquecimento testadas. A partir desta figura, é possível ter uma noção qualitativa a respeito da distribuição das tensões ao longo da placa.

A.3. Conclusões

Para tirar as conclusões, a análise é feita apenas do efeito do preaquecimento sob a geração de tensões que podem levar uma junta soldada ao colapso (ou pelo menos aumentará sua susceptibilidade ao fenômeno de trincas). É lógico que um preaquecimento sempre poderá retardar a velocidade de resfriamento na região da solda, a ponto de fazer com que a microestrutura resultante seja mais dúctil, evitando trincas por efeitos metalúrgicos.

Sendo assim, foram analisadas apenas as regiões sob tração, que são supostamente as regiões em que a existência de uma descontinuidade pode ser levada a se tornar um defeito (por exemplo, uma trinca passível de propagação). As regiões sob compressão preocupam menos aos projetistas de uniões soldadas, a menos que o carregamento externo possa provocar flambagem. Também, por falta de maiores informações, está se desprezando nesta análise conclusiva um possível efeito que os esforços da região sob compressão possam ter sobre regiões vizinhas.

Desta forma, pelos resultados apresentados, sujeitos a limitações das simulações aqui desenvolvidas, o preaquecimento é indesejável do ponto de vista de geração de tensões

residuais (maior o pré-aquecimento, maior a zona de tensões trativas), sendo mais característico em materiais que não amolecem com o preaquecimento. Resultados diferentes poderiam ser encontrados caso se usasse maiores temperaturas de preaquecimento, outras energias de soldagem, diferentes condições de contorno (engastada, livre ou apoiada) e/ou outras propriedades mecânicas do material de base antes e após a soldagem. De qualquer maneira, o preaquecimento deve ser aplicado se for possível superar, do ponto de vista metalúrgico, o efeito detrimental das tensões residuais na susceptibilidade à trinca de juntas soldadas. Acredita-se também que, pela coerência dos resultados e realismo do modelo (consideração de distorção, modelo tridimensional, encruamento, etc.), a metodologia proposta para realizar simulações foi bem sucedida e espera-se que, no futuro, estes dados possam ser confirmados (ou negados) com procedimentos mais precisos.

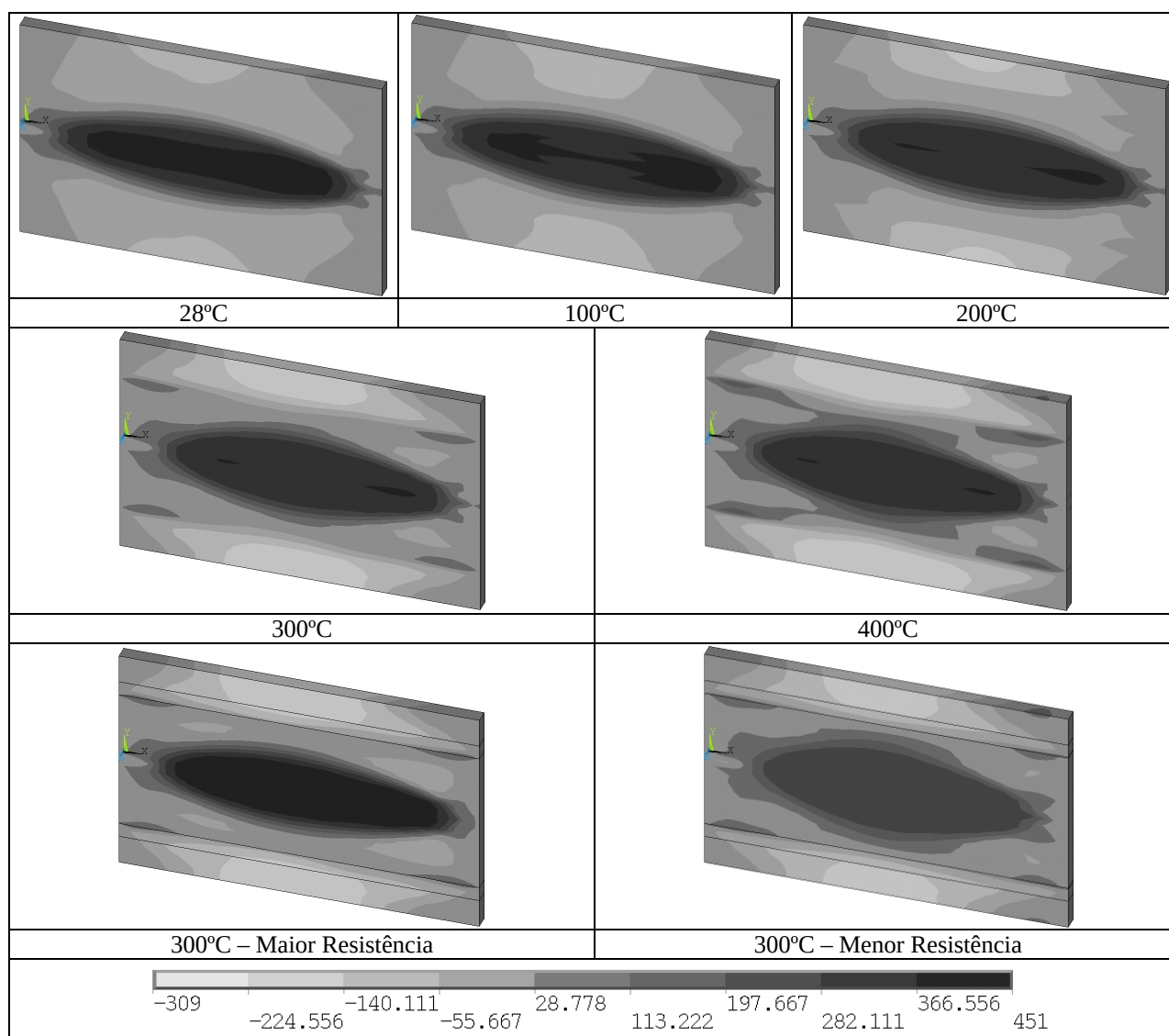


Figura A.7 – Campos de tensões residuais para as diferentes condições de preaquecimento (tensões em MPa).