

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS GROSSAS SUBMETIDAS AO RESFRIAMENTO ACELERADO CAUSADAS PELAS CONTRAÇÕES TÉRMICAS*

Sabrina de Paula Gonçalves¹
Alisson Duarte da Silva²
Paulo Roberto Cetlin³

Resumo

Na laminação de chapas grossas o aço é submetido a processamentos termomecânicos que visam obter qualidades de superfície, forma, dimensões e propriedades mecânicas compatíveis com as mais exigentes normas de especificação de produtos. Um processo cada vez mais utilizado para obtenção destas características é o resfriamento acelerado onde são empregadas altas taxas de resfriamento. Quando não utilizados de maneira homogênea, tais resfriamentos geram características indesejadas nas chapas como as tensões residuais e distorções. Tais características são motivos para o sucataamento ou retrabalhos que geram aumento do prazo de entrega e custos de produção. A utilização de simulações computacionais para modelar e prever a ocorrência destes defeitos são intensamente utilizadas nos meios acadêmicos e industriais permitindo melhorar o controle das variáveis de processo, o desempenho do produto e reduzir custos e retrabalhos. O objetivo deste trabalho foi simular numericamente o processo de resfriamento acelerado em chapas grossas e suas conseqüentes distorções e tensões residuais, avaliando-se a influência da taxa de resfriamento não homogênea nas duas faces da chapa. Para isso foi utilizado o Método de Elementos Finitos e simulações em 2D. Neste estudo não foi avaliada a influência das transformações e o aço utilizado foi o AISI 1015 disponível na biblioteca do Software DEFORMTM versão 10.0. Os resultados mostraram forte influência do resfriamento acelerado não uniforme na geração de tensões residuais e de distorções nas chapas.

Palavras-chave: Chapas Grossas; Resfriamento Acelerado; Tensão residual; Elementos Finitos.

DISTORTION AND RESIDUAL STRESSES FINITE ELEMENT ANALYSIS IN PLATES DURING WATER COOLING DUE TO THERMAL CONTRACTION

Abstract

In the rolling plate the steel is submitted to thermomechanical processes which aim to obtain surface qualities, shape, dimensions and mechanical properties compatible with the requirements of its application. A process increasingly used to obtain these characteristics is accelerated cooling through the water application after the hot rolling. When the cooling does not occur in a homogeneous manner, undesirable characteristics are generated in the plates, such as residual stresses and distortions, characterized by the shaped defects. Such characteristics are reasons for scrapping or for rework that lead to increased lead time and production costs. The use of computational simulations to model and predict the occurrence of these defects is intensely used in academia and industry allowing improve the control of process variables, product performance and reduce costs and rework. The

objective of this work was to numerically simulate the accelerated cooling process in heavy plates and their consequent distortions and residual stresses evaluating the influence of the non-homogeneous cooling rate on the two faces of the plate. For this, the Finite Element Method was used to perform 2D simulations. In this study, the influence of the phase transformations was not evaluated and the steel used was the AISI 1015 standard available from the DEFORMTM Software library version 10.0. The results showed a strong influence of non-uniform accelerated cooling on the generation of residual stresses and plated distortions.

Keywords: Plate; Accelerated Cooling; Residual Stress, Finite Elements.

- ¹ *Engenheira Metalurgista, MSc, Especialista, Laminação de Chapas Grossas, Gerdau, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.*
- ² *Engenheiro Mecânico, MSc, Dr., Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*
- ³ *Engenheiro Mecânico, MSc, Dr., Professor Titular, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

1 INTRODUÇÃO

Segundo estatística do Instituto Aço Brasil [1], nos últimos 12 meses os laminados planos corresponderam a aproximadamente 60% dos produtos de aço laminados no Brasil. As mais modernas linhas de laminação de chapas grossas estão aptas a atender as mais exigentes normas de especificação de produtos, sendo capazes de produzir chapas para os setores de construção naval e plataformas marítimas, oleodutos e gasodutos, vasos de pressão, estrutural, implementos agrícolas entre outros [2].

No processo de laminação de chapas grossas o aço é submetido a processamentos termomecânicos que visam obter qualidades de superfície, forma, dimensões e propriedades mecânicas compatíveis com as exigências da sua aplicação [2,3]. No processamento termomecânico, as etapas de aplicação de deformação plástica são intercaladas ou conjugadas com tratamentos térmicos, combinadas ou não com pequenas adições de elementos de liga. Um processo cada vez mais utilizado para obtenção destas características é o resfriamento acelerado através da aplicação de água após a laminação [3,4,5]. Este processo permite a realização de tratamentos térmicos tais como têmpera direta e têmpera direta mais auto-revenimento na própria linha de laminação. Nos processos de resfriamento acelerado são empregadas altas taxas de resfriamento, que permitem a obtenção de tamanhos de grão de até 11/12 Unidades ASTM e microestruturas constituídas por bainita, martensita e ferrita [2,3,6].

Em algumas linhas de laminação, as chapas após serem laminadas, passam por uma pré-desempenadeira que é utilizada para obter uma planicidade adequada a fim de impedir o acúmulo de água no material no processo de resfriamento acelerado com água, que resultaria em taxas de resfriamento heterogêneas para diferentes regiões das placas [6].

Além das propriedades mecânicas e metalúrgicas, um dos requisitos mais importantes para a aplicação de chapas com resfriamento acelerado é uma boa planicidade [7,8]. A falta de homogeneidade no resfriamento causa diferenças de deformações em diferentes regiões da chapa devido a contrações térmicas e geram tensões residuais que permanecem no material mesmo após seu processamento [9-11]. Estas tensões, por sua vez, podem provocar distorções permanentes na chapa, que são mais severas e evidentes em etapas subsequentes do emprego destas peças, geralmente ocorridas nos clientes. A distribuição e a intensidade destas tensões definem o tipo de defeito de planicidade gerado [8,10].

A falta de planicidade (distorções) e tensões residuais em chapas grossas, induzidas pelo resfriamento acelerado, implicam em significativos problemas para a indústria, afetando as dimensões de componentes de precisão, aumentando os custos de operações, tais como desempenho e tratamentos térmicos para alívio de tensão residual e a qualidade de partes importantes em um projeto [10,11]. As desempenadeiras e os tratamentos térmicos utilizados nas linhas de acabamento de chapas grossas são empregados para corrigir a forma das chapas e distribuir mais uniformemente as tensões no material [10,12,13]. Tais processos representam retrabalho, gerando custo e maior tempo de processamento para as siderúrgicas. Sendo assim, a previsão das tensões residuais e distorções e, portanto, seu controle até níveis aceitáveis torna-se importante para obtenção de produtos de qualidade

que atendam as especificações dos clientes e para a redução de retrabalho nas linhas de acabamento de chapas grossas [7,8,10].

As simulações computacionais e modelagens matemáticas, principalmente de tratamentos térmicos, começaram a ser utilizadas em meados da década de 1970 pelos japoneses [11]. Embora o uso industrial de simulações de tratamentos térmicos ainda seja pequeno, houve uma significativa melhora a partir dos anos 2000 com o apoio e disseminação dos benefícios das simulações por parte de organizações internacionais como a ASM International e associações de empresas de tratamento térmicos no Japão e na Alemanha, JSHT e AWT, respectivamente [11]. Uma outra importante evolução para a consolidação das simulações foi o desenvolvimento de softwares capazes de calcular e fornecer os dados do material necessários para a realização de simulação com boa confiabilidade [13-14].

Para operações de processamento térmico, a influência dos fenômenos físicos do processo (transferência de calor, transformações de fase, difusão, deformação) sobre as propriedades no produto final, devem ser conhecidas para que a simulação seja usada para se obter produtos de boa qualidade com altas taxas de produtividade. Baseando-se nestas considerações as simulações podem ser altamente benéficas na solução dos seguintes problemas [9]:

- Obtenção das propriedades mecânicas desejadas;
- Redução de retrabalhos pelo controle de distorções (dimensão e forma);
- Melhora do desempenho e vida-útil do produto (fadiga, corrosão, resistência ao desgaste, etc);
- Economia de recursos utilizados no processo, entre outros.

Por outro lado, as simulações de tratamento térmico e de previsão de tensões residuais e distorções podem ser tarefas desafiadoras devido à complexidade do processo, que envolve a interação entre diferentes fenômenos físicos, tais com a evolução do estado de tensões, as transformações de fase e a transferência de calor [14,15]. No entanto, diversos modelos têm sido propostos para uma solução numérica aproximada, principalmente pelo método de elementos finitos com bons resultados. [16-17].

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

O material utilizado nas simulações foi o aço AISI 1015 com a composição química especificada pela Norma SAE J403 (0,13-0,18% C, 0,30-0,60% Mn, 0,030% máx. P e 0,035% máx. S). Nas simulações de resfriamento acelerado realizadas no presente estudo não foram consideradas as transformações de fase, portanto a ausência de elementos de liga foi irrelevante neste trabalho.

As simulações numéricas do processo de resfriamento acelerado foram realizadas com auxílio do software DEFORM™ versão 10.0 disponibilizado no Laboratório de Conformação de Chapas da Escola de Engenharia da UFMG. Este software é baseado no método de elementos finitos (FEM). As simulações foram feitas em duas dimensões (2D) a fim de se analisar a distorção e a distribuição das tensões ao

longo da largura da chapa. Foram utilizadas as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material informadas na biblioteca do software.

A espessura e largura da chapa simulada foram 12 e 2.500 mm, respectivamente. Assumiu-se a temperatura inicial da chapa homogênea em 850°C e a tensão residual inicial igual a zero. O resfriamento não foi definido pelo coeficiente de transferência de calor e sim pela taxa de resfriamento na superfície da chapa.

Estudos mostram que o resfriamento não uniforme entre a superfície inferior e a superior da chapa é um dos fatores geradores de defeitos de forma. Um destes defeitos é caracterizado pela curvatura da chapa na direção da espessura. Quando avaliados em relação a largura da chapa, a forma gerada assemelha-se ao de uma canoa e, portanto, é conhecido industrialmente como “acanoamento”.

A geometria e as dimensões da chapa utilizadas nas simulações são dadas esquematicamente na Figura 1 (a). Devido à simetria da geometria somente metade da largura da chapa foi simulada. A superfície inferior foi resfriada mais rapidamente do que a superior. Esta condição reproduz de uma forma aproximada as variações na vazão de água que podem ocorrer nos processos industriais.

Foram realizadas quatro simulações variando-se a taxa de resfriamento da superfície inferior e mantendo-se fixa a taxa de resfriamento da superfície superior. A taxa de resfriamento da superfície superior nas quatro simulações foi de 60°C/s. As taxas utilizadas na superfície inferior foram:

- Simulação 1 – 63°C/s (5% maior do que a superfície superior);
- Simulação 2 – 66°C/s (10% maior do que a superfície superior);
- Simulação 3 – 72°C/s (20% maior do que a superfície superior);
- Simulação 4 – 78°C/s (30% maior do que a superfície superior).

A Figura 1 (b), mostra em destaque as superfícies que foram resfriadas na simulação e as respectivas taxas de resfriamento utilizadas.

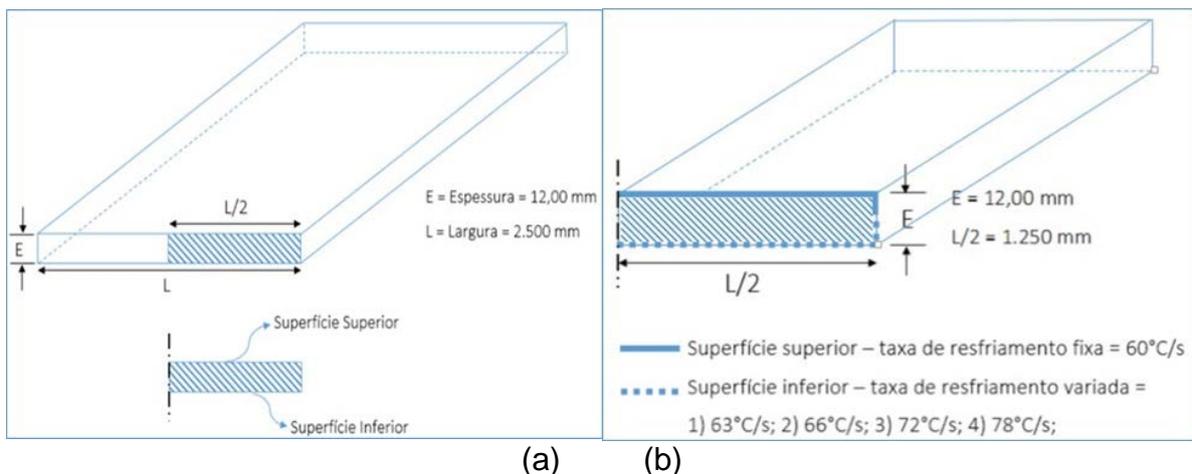


Figura 1 – (a) geometria da chapa e detalhe da área utilizada nas simulações e (b) destaque das superfícies resfriadas (superior e inferior) e as respectivas taxas de resfriamento.

Foram utilizados 1.824 elementos no total, sendo 4 elementos da direção Y, correspondente a espessura da chapa e 456 elementos na direção X, correspondente a $\frac{1}{2}$ da largura da chapa.

Em todas as simulações, a temperatura final objetivada foi de 500°C na superfície. O número de “steps” configurado foi igual a 1.000 e o “time step” foi 0,006 s/step. Estes parâmetros de simulação foram definidos após a realização dos testes de convergência. O teste de convergência consiste em determinar a partir de qual valor de “time step”, os resultados de mantêm os mesmos. Determinou-se o tempo de 5,83s para duração do processo, que corresponde ao tempo para resfriar de 850°C a 500°C a uma taxa de 60°C/s.

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram avaliados a evolução da temperatura durante o resfriamento, a distorção após o resfriamento e os perfis de tensões residuais.

I. Evolução da temperatura durante o resfriamento

A Figura 2 mostra a evolução da temperatura nas superfícies superior e inferior e no centro da chapa durante o processo de resfriamento acelerado para cada taxa de resfriamento utilizada. As curvas relativas à superfície superior se mantiveram constantes, uma vez que a taxa de resfriamento era a mesma nas quatro simulações. Comparando as curvas relativas à superfície inferior, observa-se mudança nas inclinações acompanhando a variação da taxa de resfriamento. Quanto maior a taxa de resfriamento maior a inclinação da curva. Como indicado nas quatro simulações, o centro da chapa resfria-se mais lentamente do que as superfícies. Os perfis destas curvas se mantem praticamente o mesmo até o tempo equivalente a aproximadamente 4 segundos de simulação. A partir deste momento observa-se que o resfriamento se torna discretamente mais rápido e conseqüentemente a temperatura final no centro da chapa se torna menor quando a taxa de resfriamento aumenta.

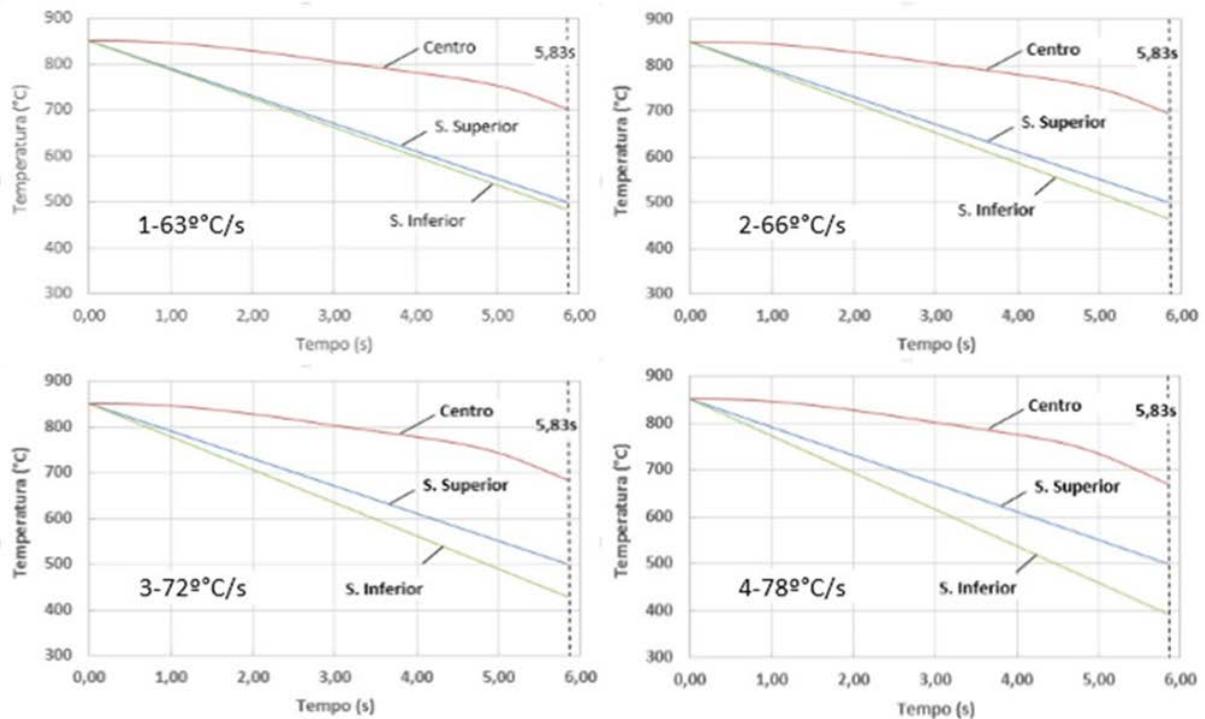


Figura 2 – Evolução da temperatura durante o resfriamento para diferentes taxas de resfriamento

Ao final do resfriamento, ocorrido após 5,83 segundos, os gradientes de temperatura em ambas as superfícies foram 17°C para a simulação 1, 35°C para a simulação 2, 70°C para a simulação 3 e 105°C para a simulação 4. As temperaturas finais no centro da chapa também variaram em função da taxa de resfriamento utilizada. São elas: 702°C, 692°C, 684°C e 671°C para as simulações 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A variação nas taxas de resfriamento na superfície inferior influenciou a curva de resfriamento do centro da chapa.

II. Tensões Residuais

A Figura 3 ilustra os perfis de tensões longitudinais (σ_x) no plano XY para cada condição de resfriamento. Observa-se que ao final do resfriamento as faces superior e inferior da chapa apresentaram tensões de tração e o centro apresenta tensões de compressão. Isto ocorre porque durante o processo de resfriamento as superfícies são resfriadas mais rapidamente do que o centro. Ao serem resfriadas, as superfícies tendem a se contrair, mas são impedidas pelo centro da chapa que exerce tração sobre as superfícies. Assim, as tensões de tração se desenvolvem na superfície e tensões de compressão no centro. É possível observar também que quando as taxas de resfriamento são aumentadas, ocorre a redução da magnitude das tensões de tração e de compressão, possivelmente indicando um alívio de tensões, que ocorreria devido ao aumento do gradiente de temperaturas entre o centro e as superfícies, observado na Figura 2. Na presença do gradiente de temperatura, o centro começa a transferir calor para as superfícies, tendendo a reduzir os gradientes de temperatura e a tensão residual.

A Figura 4 mostra a evolução das tensões (σ_x) durante o resfriamento para cada taxa de resfriamento. Observam-se diferenças entre as tensões de tração da

superfície inferior e da superior que crescem quando se aumenta a taxa de resfriamento. Mesmo a altas temperaturas, pode-se afirmar que não ocorrem deformações plásticas na chapa em nenhuma das quatro condições. A Figura 5 mostra as curvas de Tensão de Escoamento versus Deformação para várias temperaturas para o aço AISI 1015, utilizado nas simulações. As curvas correspondem à taxa de deformação $1,6 \text{ s}^{-1}$. As tensões alcançadas durante o resfriamento, que inicia com temperatura igual a 850°C , não ultrapassam 85 MPa.

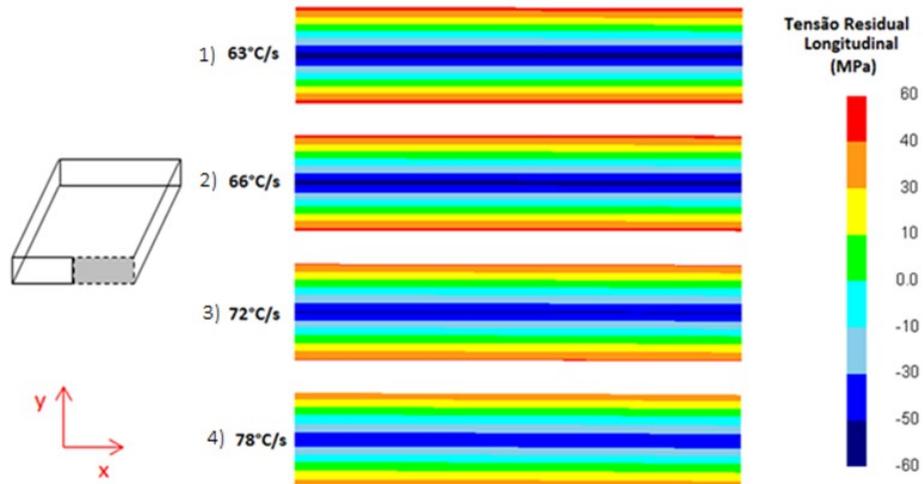


Figura 3 - Perfis de tensão residual longitudinal (σ_x) para diferentes taxas de resfriamento.

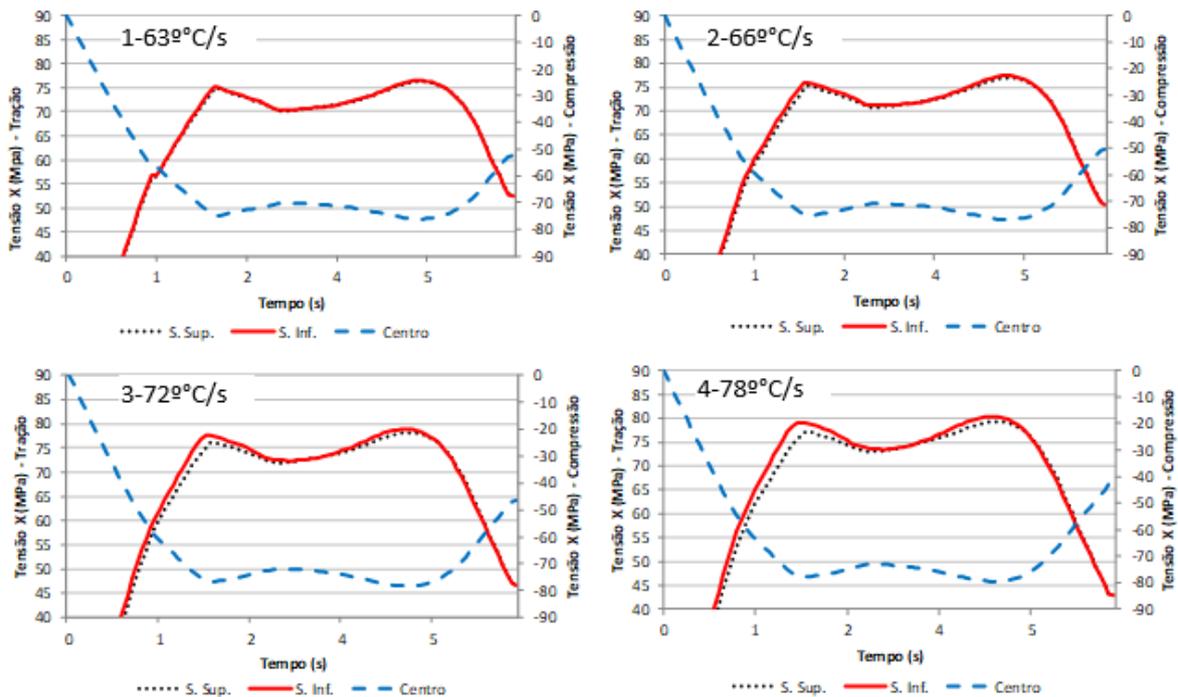


Figura 4 – Evolução da tensão longitudinal residual (σ_x) durante o resfriamento para diferentes taxas de resfriamento.

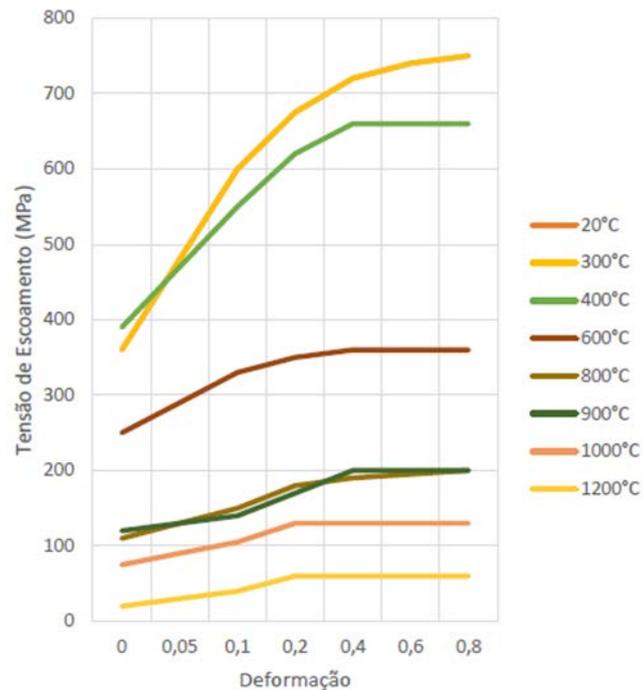


Figura 5 - Curvas de Fluxo do Aço AISI 1015 em diferentes temperaturas a taxa de deformação de $1,6s^{-1}$ (SFTC, 2010).

III. Distorção

A Figura 6 mostra o perfil de distorção apresentado pelas chapas, para as quatro simulações. As curvas correspondem ao conjunto de nós presentes na superfície inferior da chapa. Foi avaliado o deslocamento destes nós em relação à direção Y, correspondente à espessura da chapa, após o resfriamento. As curvas indicam que a distorção da chapa aumenta quando a taxa de resfriamento da face inferior da chapa cresce. A chapa distorce no sentido da superfície com maior taxa de resfriamento. No caso estudado ocorre o “acanoamento” ou curvamento da chapa para baixo.

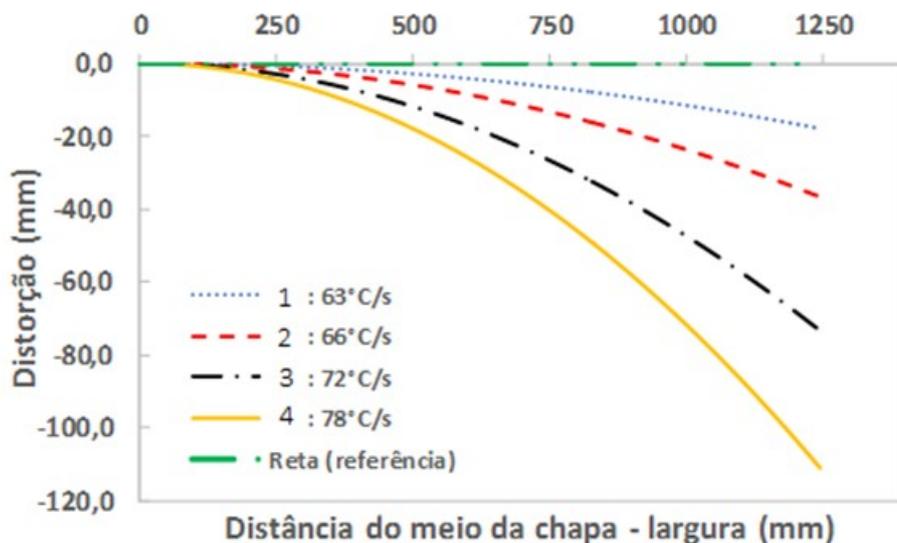


Figura 6 – Perfis de distorção para diferentes taxas de resfriamento.

Utilizando a norma europeia DIN EN 10029 como referência para medição e avaliação dos resultados de planicidade têm-se os seguintes resultados conforme informado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados de planicidade – Referência: Norma DIN EN 10029

| REFERÊNCIA | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES | | |
|--|---------------------------|--------------------|--------------------|
| | Simulação | Padrão de 1.000 mm | Padrão de 2.000 mm |
| Norma DIN EN 10029 - Classe N (8 ≤ espessura < 15) • Padrão de 1.000 mm Máximo = 7 mm • Padrão de 2.000 mm Máximo = 11 mm | 1 63°C/s | 2 mm | 4 mm |
| | 2 66°C/s | 6 mm | 24 mm |
| | 3 72°C/s | 12 mm | 48 mm |
| | 4 78°C/s | 18 mm | 72 mm |

Os resultados aprovados pela norma citada, em destaque na tabela acima, correspondem às simulações 1 igual a 63°C/s para os padrões de medição que utilizam réguas de referência de 1.000 e 2.000 mm de comprimento e 2, igual a 66°C/s para o padrão de 1.000 mm de comprimento. É relevante ressaltar que os resultados das simulações não podem ser avaliados como finais em uma linha de laminação de chapas grossas porque após o resfriamento acelerado as chapas ainda estão quentes e as chapas passam por outros processos capazes de interferir nos resultados de planicidade de chapas grossas.

3 CONCLUSÃO

A simulação do resfriamento acelerado da chapa realizada de forma não uniforme, no presente caso com diferença entre a taxa de resfriamento da superfície superior e a taxa de resfriamento da superfície inferior, mostrou que ocorrem alterações significativas na intensidade das distorções geradas em função da magnitude da não uniformidade testada. Quanto mais homogêneo é o resfriamento, menor é a distorção gerada. Nas condições testadas, permite-se a diferença de aproximadamente 5% entre as taxas de resfriamento para obtenção de uma distorção permissível. Acima de 5%, as distorções produzidas começam a atingir patamares cada vez maiores comprometendo a qualidade da planicidade das chapas resfriadas.

Durante o resfriamento, ocorreu uma diferença na magnitude das tensões de tração entre as superfícies inferior e superior. Na superfície inferior, o valor da tensão é maior comparativamente ao da superfície superior e cresce quando a taxa de resfriamento é aumentada. Quanto maior a extração de calor, mais tracionada fica a região. Porém observou-se que com o aumento do gradiente de temperatura nos momentos finais do resfriamento, ocorre o alívio parcial destas tensões induzida pela transferência de calor do centro para as superfícies.

REFERÊNCIAS

1. <http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp>, consulta em 11/08/2017.
2. GORNI AA. Resfriamento Acelerado de Chapas Grossas: O Futuro Chegou. Revista Metalurgia e Materiais. 2006; v. 63, n.564, p. 103-105.

3. OUCHI C. Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes. ISIJ International. 2001; v. 41, n. 6, p.542-553.
4. PEREIRAMM. Influência da Espessura de Espera nas Propriedades Mecânicas dos Aços da Classe API Obtidos por Laminação Controlada. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008. 96p. (Monografia do Curso de Pós-Graduação MBA em Siderurgia).
5. BARBOSARANM, BORATTO FJM, SANTOSDB. Fundamentos da Laminação Controlada. 1989; 328p.
6. EVANSJF, CLARKMT. Plate Cooling: Technologies and Market Requirements. Anais do 38º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM-Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2001; p.136-145.
7. KOO JM, RYOO SR, LEE CS, SUN HN, HWANG SM. Prediction of Residual Stresses in a Plate Subject to Accelerated Cooling - A 3D Finite Element Model and an Approximate Model. ISIJ International. 2007; v. 47, n. 8, p. 1149-1158.
8. MEDEIROS MV. Desenvolvimento de Modelos Termomecânicos para Cálculo de Tensões Residuais em Chapas Temperadas. Universidade Federal Fluminense. 2010; 115p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
9. DIETER GE. Mechanical Metallurgy. Singapore, McGraw-Hill Book, 1988.
10. SUSUKI T, ISAKA K. Control of the Residual Stress of Plates. Proceedings of The 7th International Conference on Steel Rolling (Steel Rolling '98). 1998; p.601-605.
11. SIMSIR C. Modeling and Simulation of Steel Heat Treatment – Prediction of Microstructure, Distortion, Residual Stress and Cracking. ASM Handbook. 2014; v. 4B.
12. GINZBURG VB, Flat –Rolled Steel Process; Advanced Technologies. CRC Press, 2009; 373p.
13. MAHTUK JO, GUIDETTI G, BARROS ALF. Aplainamento, Curso de Laminação de Produtos Planos. Edição 1994, ABM, cap. 3, p.277-326.
14. SILVAAD. Prediction and Control of Geometric Distortion and Residual Stresses in Hot Rolled and Heat Treated Large Rings. Universidade Federal de Minas Gerais. 2012. 171p. (Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação da Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).
15. GUO Z, SAUNDERS N, MIODOWNIK P, SCHILLÉJP. Modelling Phase Transformations and Material Properties Critical to the Prediction of Distortion During the Heat Treatment of Steels. Int. J. Microstructure and Materials Properties. 2009; v.4, n.2, p. 187-195.
16. BICKFORD WB. A First Course in the Finite Element Method. 2ª. ed. Illinois: Irwin; 1994.
17. ARAUJO VS. Simulação Numérica do Empeno em Barras Trefiladas. Universidade Federal de Minas Gerais. 2015; 76p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).