

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

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

Autora: Sabrina de Paula Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Co-orientador: Prof. Dr. Alisson Duarte da Silva

Novembro/2017

SABRINA DE PAULA GONÇALVES

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

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais, como requisito obrigatório para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Metalurgia de Transformação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Co-orientador: Prof. Dr. Alisson Duarte da Silva

Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
2017

À minha família!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos amados Francisco e Wagner pelo companheirismo, pela compreensão, pelo estímulo constante e pelo amor que me deram energia para percorrer esta etapa.

Carinhosamente, agradeço a minha mãe pelo exemplo de força, coragem e apoio incondicional e ao meu irmão, cunhadas e tia (os) pelo incentivo.

Agradeço ao Professor Paulo Roberto Cetlin pela paciência, dedicação e pela grande experiência proporcionada e ao Professor Alisson Duarte da Silva pelos ensinamentos e pela disponibilidade constante.

Agradeço ao PPGEM, na pessoa do Professor Rodrigo Oréfice pela confiança e pelas oportunidades.

Agradeço ao José Herbert Dolabela da Silveira, pela confiança e credibilidade que me foi dada e pelo auxílio constante e irrestrito que foram fundamentais para eu chegar até aqui.

Agradeço a Cátia, Dr. Rodrigo, Dr. Antônio César e Dr. Adriano que permitiram através da competência e dom de cada um me dar equilíbrio e tranquilidade.

A todos que ajudaram direta e indiretamente.

À Deus e à Nossa Senhora pela proteção e pelas pessoas que colocaram no meu caminho.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1. Introdução .....	5
3.2. Laminação Controlada .....	6
3.3. Resfriamento Acelerado .....	8
3.4. Relação entre Temperatura, Distorção e Tensão Residual .....	15
3.4.1. Ondulações .....	19
3.4.2. Acanoamento .....	22
3.4.3. Empeno Lateral .....	23
3.5. Simulação do Tratamento Térmico .....	24
3.6. Curvas Tensão-Deformação .....	25
3.6.1. O Ensaio de Tração .....	25
3.6.2. Tensão e Deformação Verdadeira e Convencional .....	29
3.6.3. Relações entre Tensões e Deformações Verdadeiras e Convencionais .....	30
3.7. Deformação Térmica .....	32
3.8. O Método dos Elementos Finitos .....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
4.1. Materiais .....	36
4.2. Métodos .....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
5.1. Caso A – Resfriamento não Homogêneo entre a Superfície Inferior e a Superior da Chapa .....	46
5.2. Caso B - Resfriamento não Homogêneo entre a Borda Lateral e o Meio Chapa .....	54
5.3. Caso C - Resfriamento não Homogêneo entre Superfícies Alternadas ao longo da largura .....	64
6. CONCLUSÕES .....	85
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	86
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Evolução histórica do processamento termomecânico e mecanismos de endurecimento utilizados (OUCHI, 2001). .....	5
Figura 3.2 - Ilustração esquemática das etapas de laminação controlada e as respectivas mudanças de microestrutura (TANAKA, 1995). .....	8
Figura 3.3 – Taxas de resfriamento e microestruturas no processamento termomecânico (HORN, 2009). .....	9
Figura 3.4 - Efeito da taxa de resfriamento na microestrutura de um aço API X65. Taxa de resfriamento de (c)>(b)>(a) (HORN, 2009). .....	10
Figura 3.5 - Efeito da taxa de resfriamento na microestrutura de um aço resistente a abrasão 400HV10. Taxa de resfriamento de (c)>(b)>(a) (HORN, 2009). .....	10
Figure 3.6 - Variação das taxas de resfriamento especificadas com a espessura da chapa para os processos de resfriamento acelerado e têmpera direta (EVANS, 2001). .....	11
Figura 3.7 – a) Deformação de uma chapa na laminação, b) Distribuição resultante das tensões residuais (DIETER, 1988). .....	12
Figura 3.8 – Evolução da temperatura para os casos A e B utilizada para a análise (SUZUKI, 1998). .....	13
Figura 3.9 – Modelo aproximado utilizado como desempenho em multipasses (SUZUKI, 1998). .....	14
Figura 3.10 – Distribuição de tensão após o desempenho a quente e após o resfriamento acelerado. Adaptada de (SUZUKI, 1998). .....	15
Figura 3.11 - (a) Conjunto de barras presas nas extremidades. (b) Barra central sendo aquecida (MODENESI, 2014). .....	17
Figura 3.12 - Variação da tensão ( $\sigma_c$ ) com a temperatura na barra central (MODENESI, 2014). .....	18
Figura 3.13 - Tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (MODENESI, 2014). .....	19
Figura 3.14 – Figura esquemática de uma chapa com ondulação e a distribuição de tensões ao longo da espessura (GINZBURG, 2009). .....	20
Figura 3.15 – Distribuição de comprimento e tensões em relação a largura em chapas apresentando regiões com ondulação. Adaptada de (MAHTUK, 1994). .....	21
Figura 3.16 – Figura esquemática de uma chapa com (a) ondulação de borda e (b) ondulação central (GINZBURG, 2009). .....	22
Figura 3.17 – Figura esquemática de chapas apresentando acanoamento em (a) com curvatura ao longo do comprimento e em (b) com curvatura ao longo da largura. ....	22
Figura 3.18 – (a) Variação de comprimentos entre as tiras ao longo da espessura da chapa, (b) Distribuição de tensões em função da espessura; (c) Forma da chapa resultante. ....	23
Figura 3.19 – Desenho Esquemático de uma chapa apresentando empeno lateral. ...	24
Figura 3.20 – Perfil da distribuição de tensões internas em uma chapa e curvatura das tiras após o corte longitudinal. ....	24
Figura 3.21 – Interrelação entre a temperatura, transformação de fase e comportamento mecânico (MEDEIROS, 2010). .....	25

Figura 3.22 – Curva tensão x deformação típica de um metal mostrando as regiões elástica e plástica (CALLISTER, 2007).....	26
Figura 3.23 – Deformação de uma barra sob tração no regime elástico (CETLIN, 1993).....	27
Figura 3.24 – Comparação entre a curva tensão-deformação verdadeira e convencional (CALLISTER, 2007).....	29
Figura 3.25 – Exemplo de modelo de elemento finito (FISH, 2007).....	33
Figura 4.1 - Curvas de escoamento do Aço AISI 1015 em diferentes temperaturas a taxa de deformação de 1,6 s <sup>-1</sup> (SFTC, 2010).....	37
Figura 4.2 - Curvas de escoamento do Aço AISI 1015 em diferentes taxas de deformação a 20°C (SFTC, 2010).....	38
Figura 4.3 - Geometria da chapa e detalhe da área utilizada nas simulações dos Casos A e B. ....	40
Figura 4.4 – Destaque das superfícies resfriadas (superior e inferior) e as respectivas taxas de resfriamento – Caso A. ....	41
Figura 4.5 – Detalhe da malha utilizada nas simulações - Casos A e B. ....	42
Figura 4.6 – Destaque das superfícies resfriadas (borda e meio) e as respectivas taxas de resfriamento – Caso B.....	43
Figura 4.7 – Geometria da chapa e detalhe da área utilizada nas simulações do Caso C. ....	44
Figura 4.8 – Destaque das superfícies resfriadas ( $\alpha$ e $\beta$ ) e as respectivas taxas de resfriamento – Caso C. ....	45
Figura 4.9 – Detalhe da malha utilizada nas simulações – Caso C. ....	45
Figura 5.1 - Evolução da temperatura durante o resfriamento para as simulações A.1 (a), A.2 (b), A.3 (c) e A.4 (d). ....	48
Figura 5.2 – Perfis de distorção na superfície inferior da chapa, na direção Y, para diferentes taxas de resfriamento – Caso A. ....	49
Figura 5.3 – Nós utilizados para medição da distorção após o resfriamento. ....	49
Figura 5.4 - Perfis de tensão residual longitudinal ( $\sigma_x$ ) no plano XY para diferentes taxas de resfriamento na superfície inferior – Caso A. <i>A figura está colorida no texto original.</i> ....	51
Figura 5.5 – Evolução da tensão longitudinal residual ( $\sigma_x$ ) durante o resfriamento para as simulações A.1 (a), A.2 (b), A.3 (c) e A.4 (d). ....	53
Figura 5.6 - Evolução da temperatura no centro da chapa durante o resfriamento para as simulações B.1 (a), B.2 (b), B.3 (c) e B.4 (d). ....	56
Figura 5.7 – Nós utilizados para obtenção das curvas de resfriamento – Caso B. ....	57
Figura 5.8 – Nós utilizados para obtenção das curvas de resfriamento e temperaturas finais na superfície da chapa – Caso B. ....	58
Figura 5.9 – Perfis de distorção na direção X para diferentes taxas de resfriamento - Caso B. ....	59
Figura 5.10 – Perfis de tensão longitudinal residual ( $\sigma_x$ ) no plano XY para diferentes taxas de resfriamento na borda – Caso B. <i>A figura está colorida no texto original.</i> .....	60
Figura 5.11 - Evolução da tensão longitudinal residual ( $\sigma_x$ ) durante o resfriamento as simulações B.1 (a), B.2 (b), B.3 (c) e B.4 (d). ....	62
Figura 5.12 - Nós utilizados para avaliação da evolução das tensões residuais – Caso B. ....	63

Figure 5.13 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.1.....	65
Figure 5.14 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.2.....	66
Figure 5.15 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.3.....	67
Figura 5.16 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.4.....	68
Figura 5.17 - Nós utilizados para avaliação da evolução do resfriamento – Caso C....	69
Figura 5.18 – Perfis de temperaturas ao longo do comprimento no centro e nas superfícies superior e inferior da chapa ao final do resfriamento para as simulações C.1 (a), C.2 (b), C.3 (c) e C.4 (d). ....	71
Figure 5.19 - Conjunto de nós utilizados para avaliação dos perfis de temperatura e de tensão no centro e nas superfícies inferior e superior – Caso C.....	72
Figura 5.20 - Perfis de distorção para diferentes taxas de resfriamento – Caso C. ....	73
Figura 5.21 - Nós utilizados para avaliação da distorção – Caso C. ....	73
Figura 5.22 - Perfis de distorção em 3D para as quatro simulações – Caso C. <i>A figura está colorida no texto original.</i> .....	74
Figura 5.23 - Perfis de tensão residual longitudinal ao longo do comprimento da chapa nas superfícies inferior e superior para as simulações C.1 (a), C.2 (b), C.3 (c) e C.4 (d) - Caso C.....	77
Figure 5.24 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.1 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C. ....	79
Figure 5.25 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.2 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C. ....	80
Figure 5.26 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.3 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C. ....	81
Figura 5.27 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.4 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C. ....	82

**LISTA DE TABELAS**

Tabela IV.1 - Composição química do aço AISI 1015 (SAE INTERNATIONAL, 2014).....	48
Tabela IV.2 - Dados de tensão e deformação das curvas de escoamento do aço AISI 1015 em diferentes temperaturas para taxa de deformação de 1,6/s.....	49
Tabela IV.3 - Dados da Curva de Escoamento do Aço AISI 1015 para várias taxas de deformação a temperatura de 20°C.....	50
Tabela V.1 - Resultados de planicidade do Caso A – Referência: Norma DIN EN 10029.....	62
Tabela V.2 - Temperaturas finais de resfriamento no centro da chapa.....	69
Tabela V.3 - Temperaturas finais de resfriamento na superfície da chapa.....	70
Tabela V.4 - Resultados de planicidade do Caso C – Referência: Norma DIN EN 10029.....	87

## RESUMO

O mercado de chapas grossas exige cada vez mais produtos que atendam às mais exigentes normas de especificação de produtos. Para isso, na laminação 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. Um processo cada vez mais utilizado para obtenção destas características é o resfriamento acelerado através da aplicação de água após a laminação a quente onde são empregadas altas taxas de resfriamento que permitem o refinamento de grão e obtenção de microestruturas constituídas por bainita, martensita e ferrita. Em contrapartida, quando o resfriamento não ocorre de maneira homogênea, são geradas características indesejadas nas chapas como as tensões residuais e as distorções, caracterizadas pelos defeitos de forma tais como o empeno lateral, acanoamento e ondulações. Tais características são motivos para o sucateamento ou para retrabalhos que geram aumento do “lead time” e dos custos de produção. Simulações computacionais para modelar e prever a ocorrência destes defeitos são intensamente utilizadas nos meios acadêmicos e industriais. A previsão permite 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 ou ao longo de sua largura ou comprimento. Para isso foi utilizado o Método de Elementos Finitos para realizar simulações em 2D. O aço utilizado foi o AISI 1015 disponível na biblioteca do Software DEFORMTM versão 10.0. Neste estudo não foi avaliada a influência das transformações de fase e, portanto, a ausência de elementos de liga no aço escolhido é irrelevante. Os resultados mostraram forte influência do resfriamento acelerado não uniforme na geração de tensões residuais e de distorções nas chapas. Além disso, observou-se forte relação entre a distribuição da não uniformidade do resfriamento com o tipo de defeito de forma obtido.

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

## ABSTRACT

The steel plates must meet the most rigorous standards and needs market. For this, in the lamination the steel is subjected to thermomechanical processes aiming at obtaining surface qualities, shape, dimensions and mechanical properties compatible with the requirements of its application. A process increasingly used to obtain these characteristics is the accelerated cooling where high cooling rates are used to allow the grain refinement and obtaining microstructures consisting of bainite, martensite and ferrite. On the other hand, when cooling does not occur in a homogeneous manner, undesirable characteristics are generated in the plates such as residual stresses and distortions, characterized by shape defects such as buckling, camber and gutter. These characteristics are reasons for the scrapping or reworking that generate increase of the lead-time and the costs of production. Computational simulations to model and predict the occurrence of these defects are intensely used in academia and industry. The prediction allows increase the control process variables, product performance, and decrease costs and rework. The objective of this work was numerically simulate the accelerated cooling process in steel plates, distortions and residual stresses, evaluating the influence of the non-homogeneous cooling rate on the two faces of the plate or along its width or length. For this purpose, the Finite Element Method was used to perform 2D simulations. The steel used was AISI 1015 available from the DEFORM™ software version 10.0 library. In this work, the influence of the phase transformations wasn't evaluated and, therefore, the missing of alloying elements in the steel is irrelevant. The results have showed a strong influence of non - uniform accelerated cooling on the generation of residual stresses and distortions. Additionally, a strong relationship was observed between the distribution of the non-uniformity of the cooling and the type of shape defect obtained.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo estatística do Instituto Aço Brasil, no período de setembro de 2016 a setembro de 2017, os laminados planos corresponderam a 62% 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, estruturas e implementos agrícolas entre outros.

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. 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. Este processo permite a realização de tratamentos térmicos tais como têmpera direta e têmpera direta com 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.

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.

Além das propriedades mecânicas e metalúrgicas, um dos requisitos mais importantes para a aplicação de chapas com resfriamento acelerado é uma boa planicidade. Para se obter essa característica após o resfriamento acelerado deve-se considerar a velocidade da placa da mesa de rolos, o volume de água aplicado, a distribuição de água nas duas faces da chapa e ao longo de sua largura e comprimento. A falta de homogeneidade no resfriamento causa diferenças de deformações devido a

contrações térmicas. Estas diferenças geram tensões residuais que permanecem no material mesmo após seu processamento. 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.

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. 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. 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.

As simulações computacionais e modelamentos matemáticos, principalmente de tratamentos térmicos, começaram a ser utilizadas em meados da década de 1970 pelos japoneses. Somente nos anos de 1980 intensificou-se a pesquisa e a produção destas simulações com contribuições no mundo inteiro, principalmente na França e o no Japão. Nos anos de 1990 as aplicações acadêmicas se espalharam pelo mundo como consequência da maior maturidade dos modelos e dos consideráveis desenvolvimentos na área computacional. Outro passo importante foi a comercialização de softwares de análise por elementos finitos tais como DANTE, HEARTS, SYSWELD, DEFORM-HT. 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 térmico no Japão e na Alemanha, JSHT e AWT, respectivamente. 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.

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 claramente 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:

- 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. No entanto, diversos modelos têm sido propostos para uma solução numérica aproximada, principalmente pelo método de elementos finitos, com bons resultados.

## 2. OBJETIVO

### Objetivo Geral:

- O objetivo geral deste trabalho é simular numericamente o processo de resfriamento acelerado em chapas grossas e suas conseqüentes distorções e desenvolvimento de tensões residuais.

### Objetivo Específico:

- Avaliar a influência de variáveis do processo do resfriamento acelerado tais como: taxas de resfriamento e homogeneidade térmica da chapa, na geração de distorções e tensões residuais em chapas grossas provenientes das contrações térmicas sem levar em consideração as transformações de fase.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Introdução

O processamento termomecânico do aço é a forma mais eficiente de melhorar as propriedades mecânicas através do controle da microestrutura (OUCHI, 2001). Este processo permite a obtenção de um intenso refino de grão e a redução dos teores dos elementos de liga, produzindo aços com altos limites de resistência, de escoamento e tenacidade simultaneamente (GORNÍ, 2006). A primeira industrialização do processamento termomecânico em laminação de aço foi na produção de chapas grossas e desde então vários estudos e tecnologias vem sendo desenvolvidas com sucesso. A tecnologia que combina a laminação controlada com resfriamento acelerado ficou conhecida como TMCP, sigla em inglês para Thermo-Mechanical Controlled Process e contribuiu para um grande salto no desenvolvimento de novos tipos de aços para chapas grossas (OUCHI, 1982). Atualmente, esta é uma tecnologia consagrada e presente em linhas de laminação de chapas grossas no mundo todo (GORNÍ, 2006). A Figura 3.1 mostra a evolução histórica observada do desenvolvimento dos processos de laminação controlada e resfriamento acelerado, bem como os mecanismos de endurecimento envolvidos.

Ano	1970	1980	1990	2000
<u>Processos Termo-Mecânicos</u>	Laminação Controlada	Laminação Intercrítica SHT	OLAC TMCP Resfriamento Acelerado	Têmpera Direta Modelamento Matemático da Laminação a Quente P&D sobre Aço com TG Ultra-Fino
<u>Mecanismos de Endurecimento</u>	Refino de Grão Endurecimento por Precipitação	Endurecimento por Encruamento	Endurecimento por Martensita ou Bainita Endurecimento por Transformação	Endurecimento por Ultra-Refino de Grão
<u>Normas</u>			ASTM A841 (Aço Resf. Acel.)	JIS-SN (Constr. Civil)

Figura 3.1 - Evolução histórica do processamento termomecânico e mecanismos de endurecimento utilizados (OUCHI, 2001).

### 3.2. Laminação Controlada

A laminação a quente de chapas grossas pode ser dividida em dois processos básicos: laminação a quente convencional e laminação controlada. Na laminação convencional, o objetivo é produzir produtos nas dimensões requeridas com o menor número de passes. A laminação controlada é um procedimento de laminação no qual a forma e as temperaturas durante a laminação são precisamente controladas para alcançar alta resistência mecânica e tenacidade (PEREIRA, 2008).

A laminação controlada na linha de laminação de chapas grossas procura controlar as condições de aquecimento, a taxa e intensidade da redução e temperatura de laminação para obter resistência e tenacidade. Este tratamento termomecânico consiste em aplicar deformação plástica na temperatura de não recristalização da austenita, a fim de acumular deslocamentos no material e formar sítios de nucleação não somente nos contornos de grão austeníticos como também dentro dos grãos. Isto diminui significativamente o tamanho de grão da austenita dando origem a uma microestrutura ferrítica refinada (BARBOSA, 1989).

A deformação é aplicada em três regiões de temperatura (TANAKA, 1995):

- I) Região de altas temperaturas de laminação – onde a austenita deformada se recristaliza a cada passe de deformação promovendo o refino de grão por recristalizações sucessivas;
- II) Região de temperaturas intermediárias de laminação – onde a austenita é deformada sem que ocorra a recristalização entre passes. Dessa forma o material apresenta um encruamento residual que se acumula a cada passe, promovendo um número maior de sítios de nucleação de ferrita. Como consequência do encruamento da austenita, há um aumento da temperatura de início de transformação  $\gamma \rightarrow \alpha$ ;
- III) Região de temperaturas de laminação abaixo de  $Ar_3$  – onde existe uma mistura de austenita e ferrita. Aqui a ferrita sofre um encruamento levando ao aumento de resistência do material. A austenita, por outro lado, sofre um encruamento adicional, aumentando ainda mais os sítios de nucleação da ferrita, que exibirá um tamanho de grão ainda mais fino que na região II.

A temperatura de não recristalização ( $T_{nr}$ ), separa a região I da II e a temperatura de início da transformação austenita/ferrita ( $A_{r3}$ ) separa a região II da III. A determinação destas temperaturas é fundamental para um projeto de esquema de laminação controlada.

A Figura 3.2, a seguir, ilustra esquematicamente as três regiões mencionadas na laminação controlada de aços microligados. Na região I, o material é deformado após um período de reaquecimento que resulta da solubilização dos elementos microligantes. As temperaturas de encharque são determinadas em função dos produtos de solubilidade dos carbonitretos de microligantes. A austenita grosseira (a) é então refinada através do processo de recristalização estática que ocorre entre os primeiros passes resultando em uma austenita refinada (b). Caso a austenita fosse resfriada ao ar a partir desse ponto se obteria um ferrita equiaxial relativamente grosseira (b'). Considerando-se temperaturas de reaquecimento usuais de 1.150 a 1.250 °C, o tamanho de grão após 30 minutos de encharque é da ordem de 300  $\mu\text{m}$  para aços microligados com Nb e V. O crescimento de grão pode ser inibido a baixas temperaturas de reaquecimento devido à resistência à migração dos contornos causados pela presença de precipitados. No final desta etapa a temperatura está acima de 1.000 °C, onde a recristalização completa se dá em torno de 6 segundos.

Na etapa seguinte, abaixo da temperatura de não recristalização ( $T_{nr}$ ) os grãos de austenita são encruados e a área de superfície dos grãos aumenta. Além disso, formam-se bandas de deformação (c), que dividem a austenita em vários sub-blocos promovendo um aumento de sítios disponíveis para nucleação da ferrita e levando a um decréscimo do tamanho de grão ferrítico final (OUCHI, 1982). O contorno de grão e as bandas de deformação são os locais preferenciais para nucleação da ferrita durante o processo de transformação. Como resultado do aumento de sítios nucleantes, a ferrita transformada é bastante refinada (c'). Esta região é delimitada pelas temperaturas de não recristalização ( $T_{nr}$ ) e temperatura de início de transformação ferrítica ( $A_{r3}$ ).

Por fim, na região III a austenita é deformada juntamente com a ferrita (d), A microestrutura é composta de ferrita alongada, que mostra uma subestrutura, e austenita encruada com a presença de bandas de deformação. A austenita dará lugar a uma estrutura ferrítica fina equiaxial juntamente com a ferrita alongada e com a subestrutura (d').

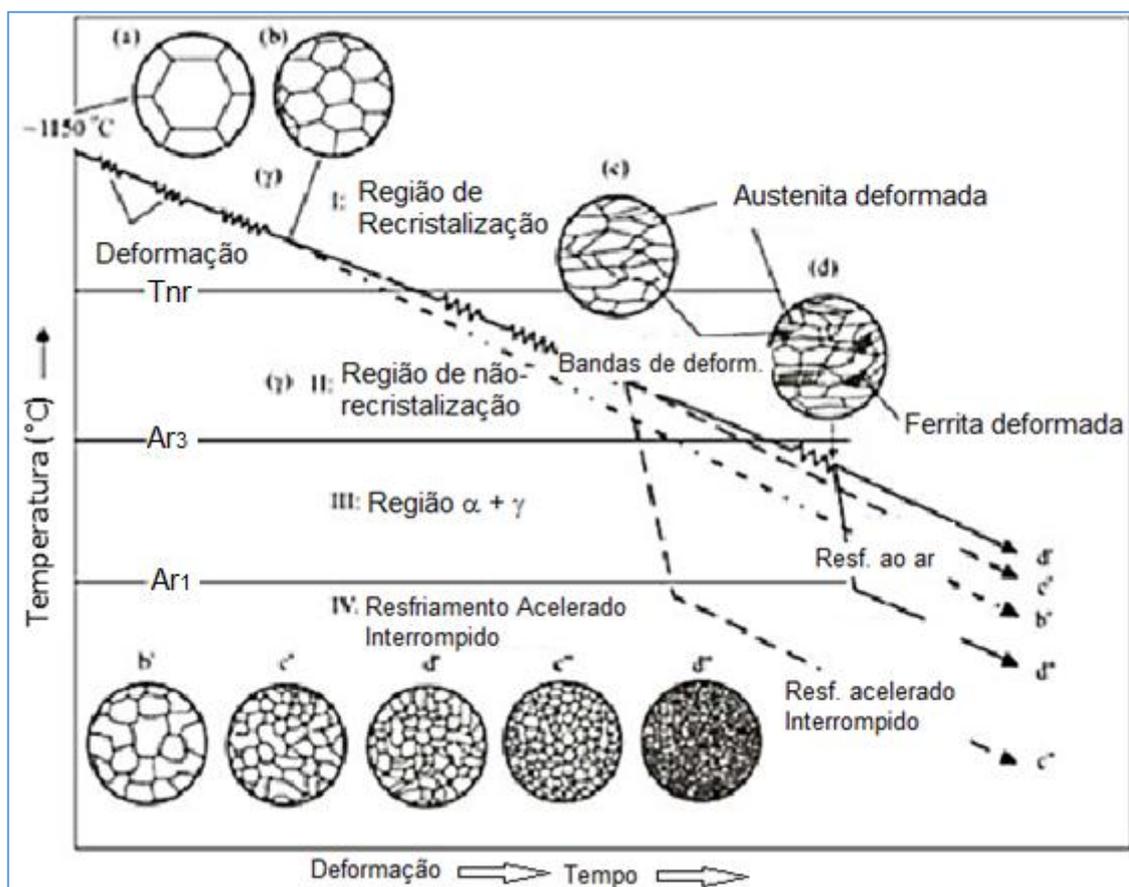


Figura 3.2 - Ilustração esquemática das etapas de laminação controlada e as respectivas mudanças de microestrutura (TANAKA, 1995).

### 3.3. Resfriamento Acelerado

O resfriamento acelerado não é uma tecnologia que pode ser empregada de forma independente de outros processos da linha de laminação. Só é totalmente efetivo quando faz parte de um controle integrado, ou seja, abrangendo todo o processo desde a fabricação do aço líquido, passando pelo reaquecimento das placas, laminação, pré-desempeno, o resfriamento acelerado propriamente dito e pelo desempeno a quente e a frio (NSSMC, 2012).

No processamento termomecânico controlado, após a laminação controlada ocorre o resfriamento em água que pode ser classificado em dois tipos distintos. O Resfriamento Acelerado e a Têmpera Direta, mostrados na Figura 3.3.

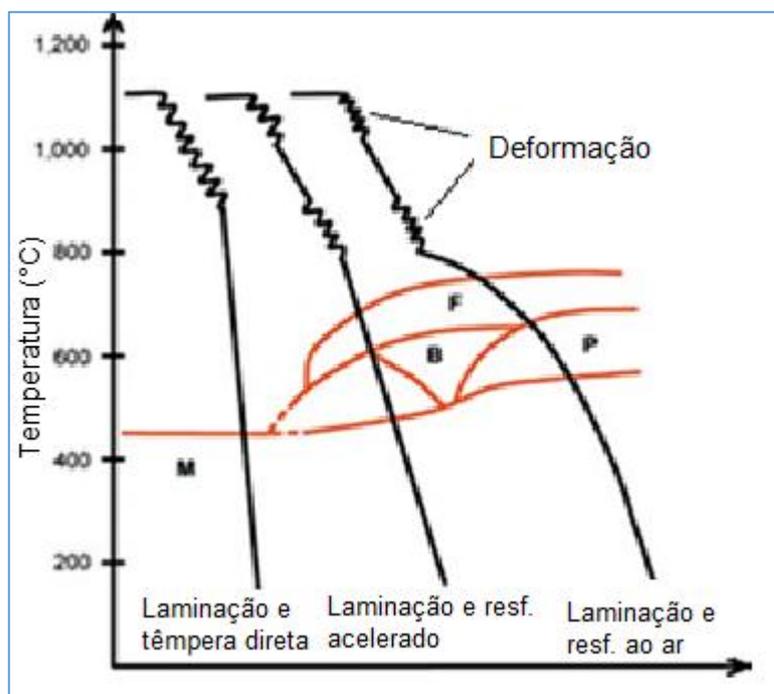


Figura 3.3 – Taxas de resfriamento e microestruturas no processamento termomecânico (HORN, 2009).

No processo de Resfriamento Acelerado, o processo se inicia em temperaturas próximas a 800°C e termina entre 600 e 500°C. Observa-se melhoria nas propriedades mecânicas pelo refinamento de grão de ferrita/perlita fina e pela presença de ferrita/bainita ou de uma estrutura completamente bainítica. Na Têmpera Direta, as chapas são resfriadas da forma mais rápida possível. A temperatura inicial de resfriamento é em torno de 900°C e termina abaixo de 250°C. As estruturas finais são formadas por martensita e/ou bainita, dependendo da composição química e da temperatura final de resfriamento. As chapas que passam por este processo possuem alta dureza e são comumente usadas em componentes expostos a altas tensões mecânicas e/ou forte abrasão (HORN, 2009).

Adicionalmente à temperatura final de resfriamento, a taxa de resfriamento é a principal variável no resfriamento da chapa. As taxas são determinadas relacionando as temperaturas de início e fim e o tempo de resfriamento. A Figura 3.4, a seguir, mostra as diferentes microestruturas obtidas em função de diferentes taxas de resfriamento para um aço API X65 (0,04%C, 1,4%Mn, 0,04%Nb), submetido ao resfriamento acelerado.

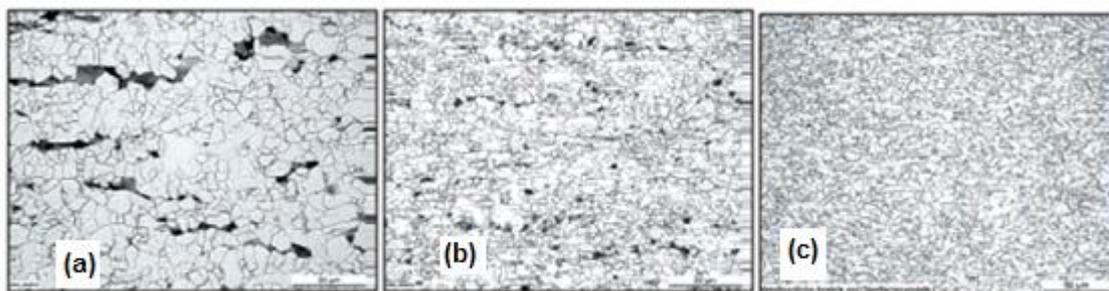


Figura 3.4 - Efeito da taxa de resfriamento na microestrutura de um aço API X65. Taxa de resfriamento de (c)>(b)>(a) (HORN, 2009).

A Figura 3.5 mostra o desenvolvimento típico da microestrutura quando há um aumento nas taxas de resfriamento na Têmpera Direta de um aço resistente à abrasão 400HV10 (0,15%C, 1,4%Mn, 0,04% Nb). O resfriamento ao ar destes aços leva a uma microestrutura com ferrita/perlita, algumas ilhas de martensita e uma dureza de 220HV10 (correspondendo a um limite de resistência de  $\sim 740\text{N/mm}^2$ ). Médias taxas de resfriamento produzem uma microestrutura bainítica apresentando uma dureza de aproximadamente 290HV10 ( $\sim 940\text{N/mm}^2$  de limite de resistência). Uma estrutura completamente martensítica com uma dureza de aproximadamente 410HV10 é atingida usando altas taxas de resfriamento ( $\sim 1.300\text{N/mm}^2$  de limite de resistência).

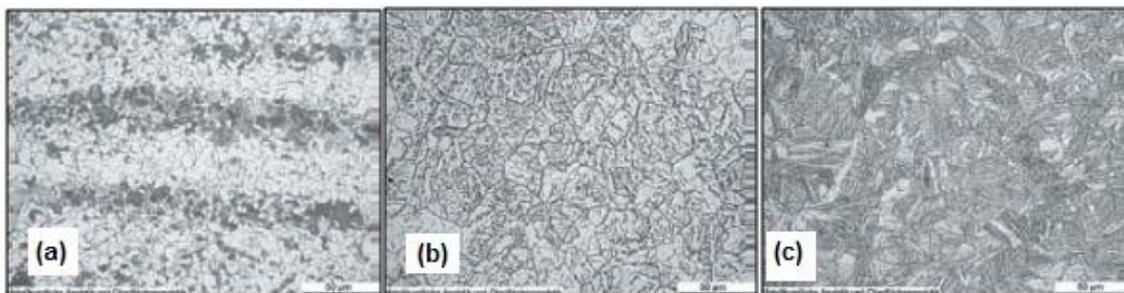


Figura 3.5 - Efeito da taxa de resfriamento na microestrutura de um aço resistente a abrasão 400HV10. Taxa de resfriamento de (c)>(b)>(a) (HORN, 2009).

As taxas de resfriamento utilizadas em processos de resfriamento acelerado e de têmpera direta são definidas em função das propriedades metalúrgicas requeridas e da espessura da chapa. O resfriamento deve ser o mais homogêneo possível em toda a chapa para que não ocorram problemas de forma e de tensões residuais. Alguns estudos mostram que o gradiente de temperatura nas direções da largura e da

espessura são as principais causas de ondulações, acanoamento e outros defeitos de forma em chapas (KOO, 2007), (SUZUKI, 1998).

A Figura 3.6 mostra as taxas de resfriamento típicas especificadas para os processos de resfriamento acelerado e de têmpera direta em chapas de aço em função da espessura da chapa. As temperaturas durante os processos industriais são medidas na superfície das chapas. Nota-se que a taxa de resfriamento especificada é menor para chapas mais espessas. Se a taxa de resfriamento for muito alta em uma chapa mais espessa, ocorre um gradiente de temperatura muito grande entre o centro e a superfície da chapa. Isto ocorre porque em espessuras maiores a condução do calor através da espessura é um fator limitante para definir a taxa de resfriamento, enquanto nas chapas mais finas o fator limitante é a transferência de calor na superfície (EVANS, 2001).

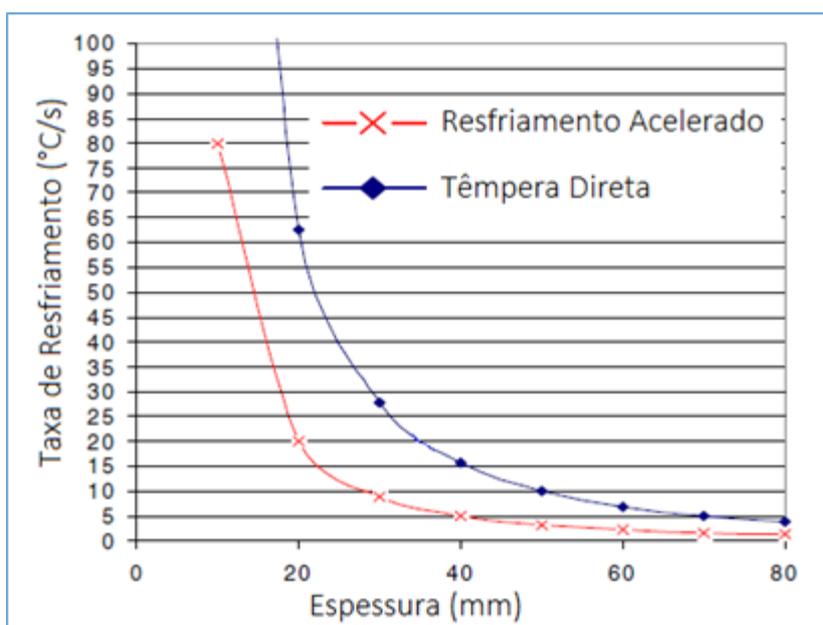


Figure 3.6 - Variação das taxas de resfriamento especificadas com a espessura da chapa para os processos de resfriamento acelerado e têmpera direta (EVANS, 2001).

### Tensões Residuais

Tensões Residuais são um sistema de tensões que podem existir em um corpo quando este está livre de forças externas. As tensões residuais são causadas pela deformação plástica não uniforme e sua geração varia dependendo do processo de

conformação (DIETER, 1988). A Figura 3.7 (a) mostra esquematicamente a produção de tensões residuais num processo de laminação com redução de espessura muito baixa. Neste exemplo, a deformação plástica ocorre somente em regiões próximas à superfície do material, que tendem a se alongar enquanto as regiões centrais do material não são afetadas. O centro tende a restringir o alongamento da superfície enquanto a superfície procura “alongar” o centro. O resultado é um padrão de tensão residual que consiste em uma compressão na superfície e tração no centro, conforme mostrado na figura 3.7 (b).

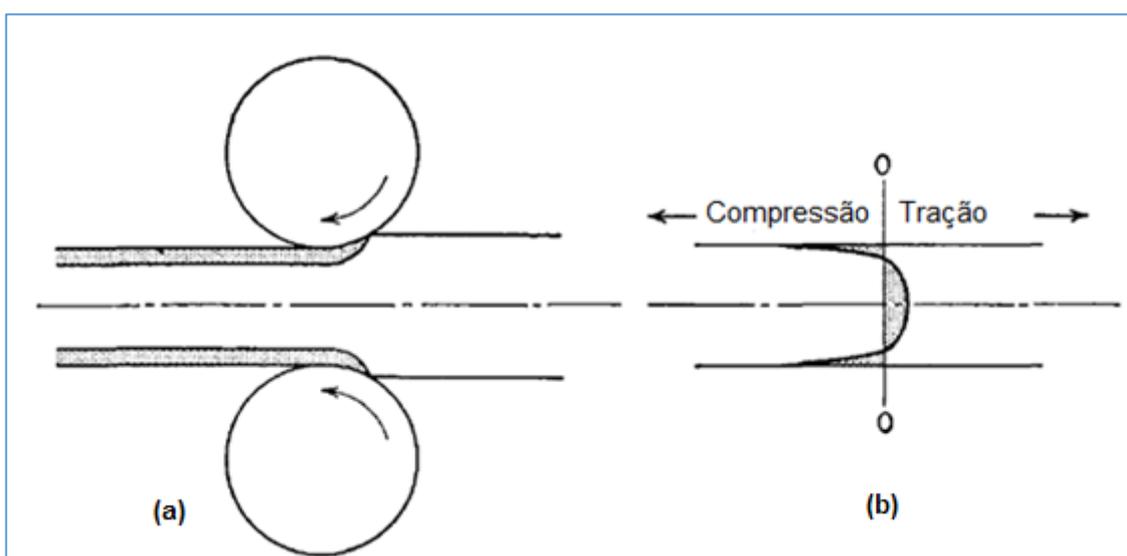


Figura 3.7 – a) Deformação de uma chapa na laminação, b) Distribuição resultante das tensões residuais (DIETER, 1988).

Ao longo do processo de fabricação de chapas grossas, diversos processos contribuem para a formação das tensões residuais. No aquecimento e no resfriamento da chapa, por exemplo, ocorrem tensões internas causadas por possíveis aquecimentos ou resfriamentos não uniformes, e que levam a dilatações ou contrações térmicas não uniformes no material. Já nos processos de laminação e desempenho as tensões residuais são devidas as deformações plásticas não uniformes que ocorrem no material devido a distribuição de temperaturas não uniforme gerada nos processos de aquecimento e/ou resfriamento (SUZUKI, 1998).

Suzuki (1998) estudou o efeito da distribuição de temperaturas em uma chapa durante o processo de desempenho a quente na geração de tensões residuais. Utilizando simulação numérica por meio do método de elementos finitos em 3D em regime

elasto-plástico, foram analisadas duas condições de distribuição de temperaturas ao longo da largura. Na primeira, chamada de Caso A, a chapa foi desempenada apresentando as temperaturas de 500°C no centro e 400°C nas bordas. Na segunda condição, Caso B, a chapa foi desempenada apresentando distribuição uniforme de temperaturas, 500°C. A Figura 3.8, mostra a variação da temperatura durante o processo.

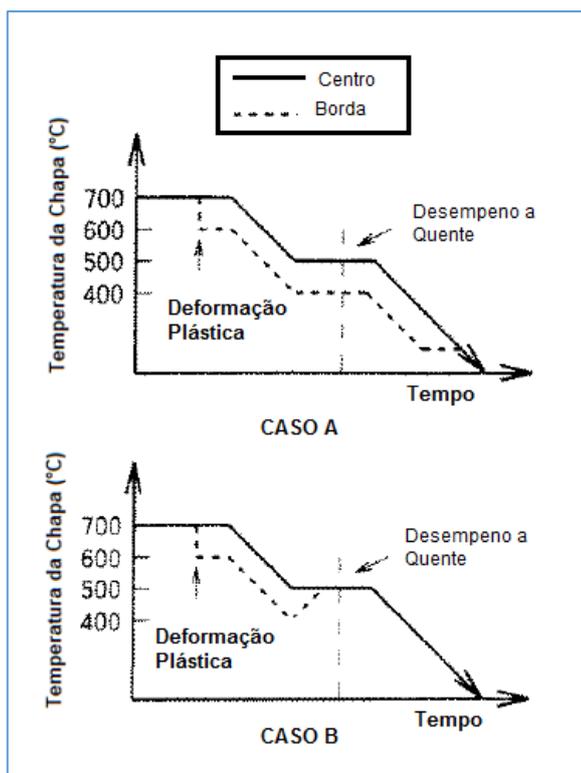


Figura 3.8 – Evolução da temperatura para os casos A e B utilizada para a análise (SUZUKI, 1998).

A dimensão da chapa utilizada na simulação foi de 1.200 mm de comprimento, 200 mm de largura e 3 mm de espessura correspondendo a 1/10 da dimensão real da chapa. Na distribuição da temperatura a área apresentando menor temperatura foi definida como 30 mm em ambas as bordas na direção transversal. A simulação do desempeno foi realizada considerando multipasses e desconsiderou os diâmetros dos rolos e a distância entre eles para efeito de simplificação da análise. Utilizou-se como aproximação o modelo de uma viga fixa em uma das extremidades e como força de desempeno utilizou-se o deslocamento da viga, ilustrado na Figura 3.9.

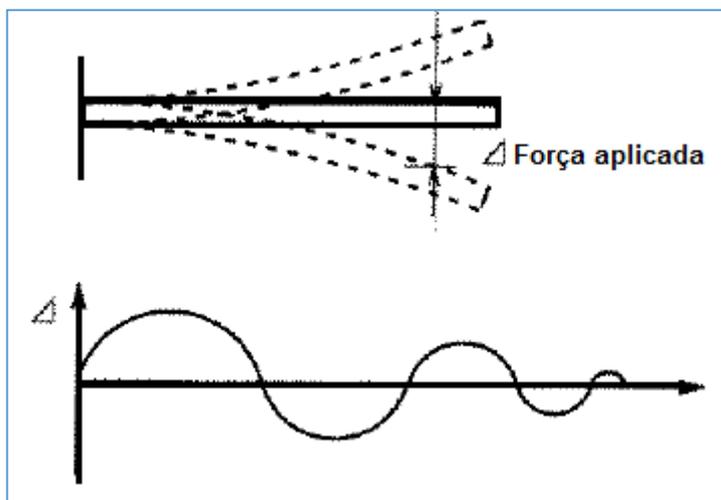


Figura 3.9 – Modelo aproximado utilizado como desempenho em multipasses (SUZUKI,1998).

Foram analisadas a distribuição de tensões ao longo da espessura e da largura da chapa após o processo de despeno a quente e após o resfriamento ao ar. De acordo com a Figura 3.10, ficou evidente que a tensão residual foi causada pelas tensões internas devidas à diferença de tensão de escoamento durante o despeno e pelas tensões térmicas devidas à distribuição de temperaturas durante o resfriamento ao ar, sendo o efeito deste último mais evidente.

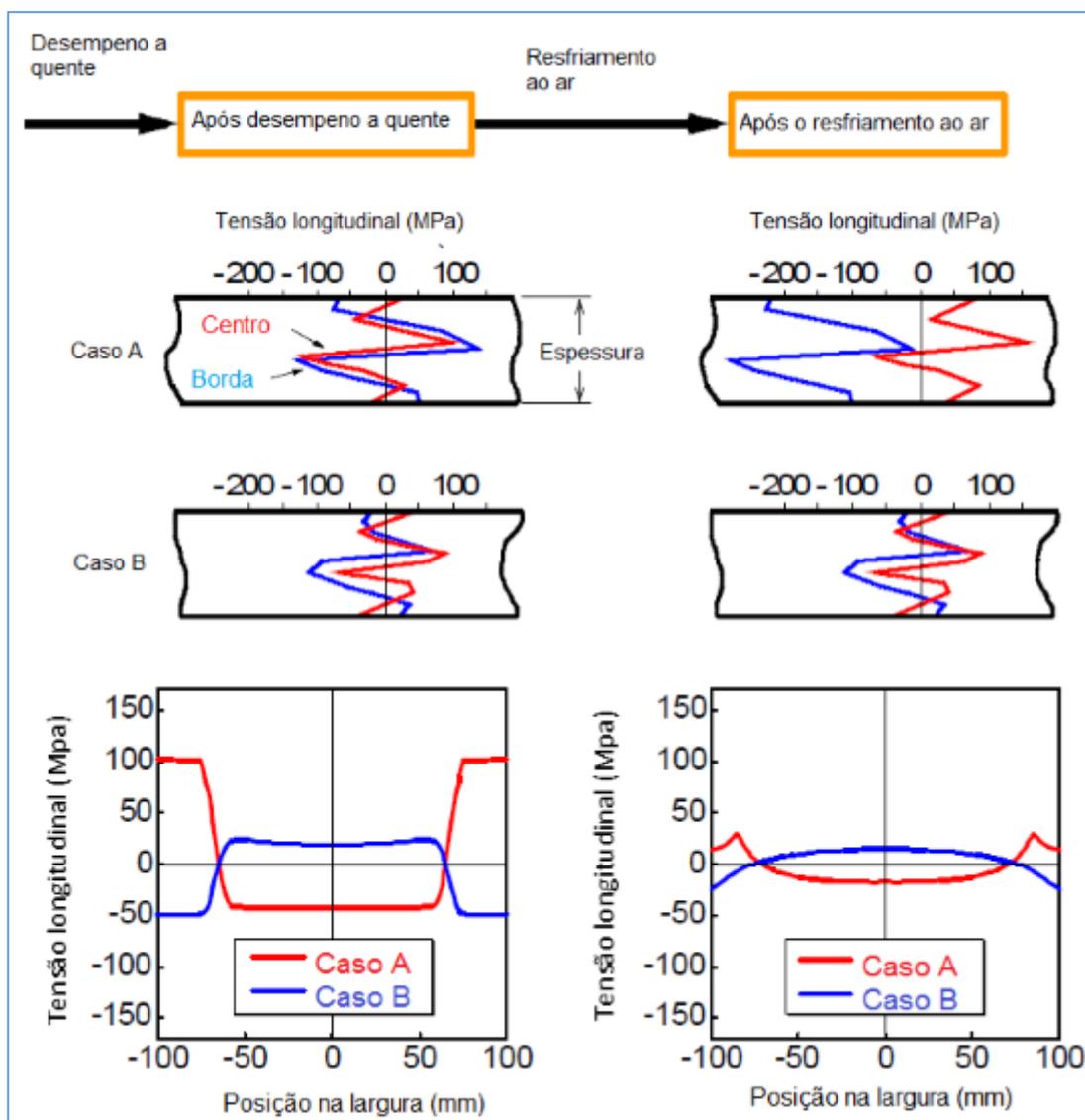


Figura 3.10 – Distribuição de tensão após o desempenho a quente e após o resfriamento acelerado. Adaptada de (SUZUKI, 1998).

### 3.4. Relação entre Temperatura, Distorção e Tensão Residual

Embora o tratamento térmico seja um problema complexo que integra vários fenômenos físicos, é a transferência de calor que desencadeia todos estes fenômenos. Do ponto de vista da engenharia a transferência de calor na têmpera, por exemplo, é um processo que pode ser modificado de várias maneiras. A transferência de calor na superfície depende muito do meio de resfriamento.

Tensões térmicas são geradas no material por grandes gradientes de temperatura e pela variação das propriedades mecânicas com a temperatura. Diferentes taxas de resfriamento em regiões distintas levam a variações de contrações e expansões térmicas que são equilibradas pelo estado de tensão interna. Além disso, tensões geradas nas transformações de fase são adicionadas ao estado de tensão local pelas diferenças de densidade entre as fases inicial e final. A interação entre os resultados das deformações térmicas e das transformações de fase podem gerar distorções e trincas no material. Em qualquer região do material durante o tratamento térmico, a tensão desenvolvida depende da evolução da temperatura e da microestrutura. Deformações não homogêneas geradas pelas tensões internas resultam em um estado de tensões residuais no final do processo de resfriamento desencadeando alterações dimensionais e de forma (ASM INTERNATIONAL, 2014).

Quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação de temperatura ( $\Delta T = T - T_0$ ) o que é descrito pela equação de dilatação térmica:

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \alpha \Delta T \quad (3.1)$$

onde ( $\Delta l$ ) é a variação do comprimento inicial ( $l_0$ ) e  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear. Se um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais, estas não resultam em efeitos mecânicos importantes no objeto, isto é, após o ciclo térmico, o objeto não deverá apresentar nem tensões residuais nem distorções. Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver (MODENESI, 2014).

Considere-se, por exemplo, uma montagem de três barras de um aço de baixo carbono de mesmo comprimento e seção, unidas em suas extremidades por duas bases, de forma que nenhuma pode se alongar ou contrair independentemente das outras (Figura 3.11). Se a barra central (barra 2) for aquecida enquanto as externas forem mantidas a temperatura ambiente, essa tenderá a se dilatar, mas será impedida pelas outras através das bases. Assim, tensões de compressão se desenvolverão na barra central e, nas barras externas, tensões de tração de magnitude igual à metade do valor na barra central, pois, pela equação (3.1), tem-se:

$$\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 + \sigma_3 A_3 = 0 \quad (3.2)$$

onde  $\sigma_i$  e  $A_i$  são, respectivamente, a tensão média e a área da seção transversal de cada barra. Considerando que as áreas das seções das barras são iguais ( $A_1 = A_2 = A_3$ ) e que o mesmo ocorre com a tensão nas barras externas ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ), tem-se:

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma_2}{2} \quad (3.3)$$

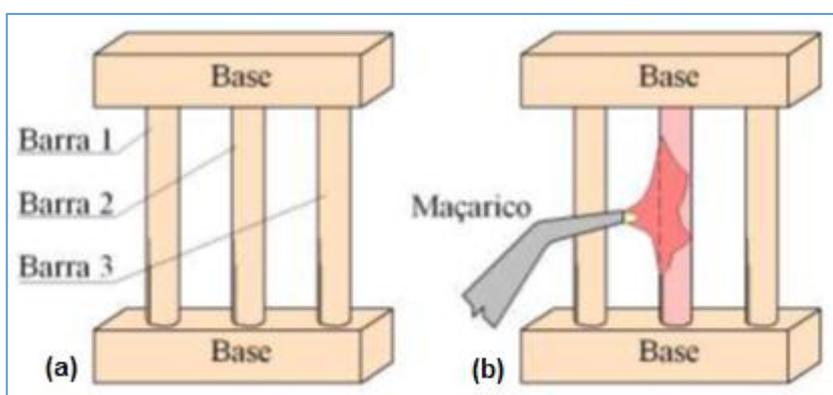


Figura 3.11 - (a) Conjunto de barras presas nas extremidades. (b) Barra central sendo aquecida (MODENESI, 2014).

A Figura 3.12 ilustra a evolução da tensão longitudinal média na barra central em função de sua temperatura. No início do aquecimento (Figura 3.12, A-B), as tensões e deformações resultantes da dilatação da barra central serão elásticas. Como as barras mantêm o mesmo comprimento aproximado, a dilatação térmica tem de ser compensada por deformações elásticas, e a seguinte relação deve ser obedecida:

$$\frac{\sigma_c}{E_t} = \alpha \Delta T + \frac{\sigma_l}{E} \quad (3.4)$$

onde  $E$  e  $E_t$  são, respectivamente, os módulos de elasticidade do material à temperatura ambiente e à temperatura ( $T$ ) da barra central e  $\sigma_c$  e  $\sigma_l$  são os valores de tensão na barra central e nas barras laterais. Como as barras têm a mesma seção,  $\sigma_l = -0,5\sigma_c$ , e, assim:

$$\sigma_c = -\alpha \Delta T \frac{2E}{1+2E/E_t} \quad (3.5)$$

Quando a tensão na barra central ( $\sigma_c$ ) atinge o limite de escoamento, esta barra passa a se deformar plasticamente, ponto B da Figura 3.12.

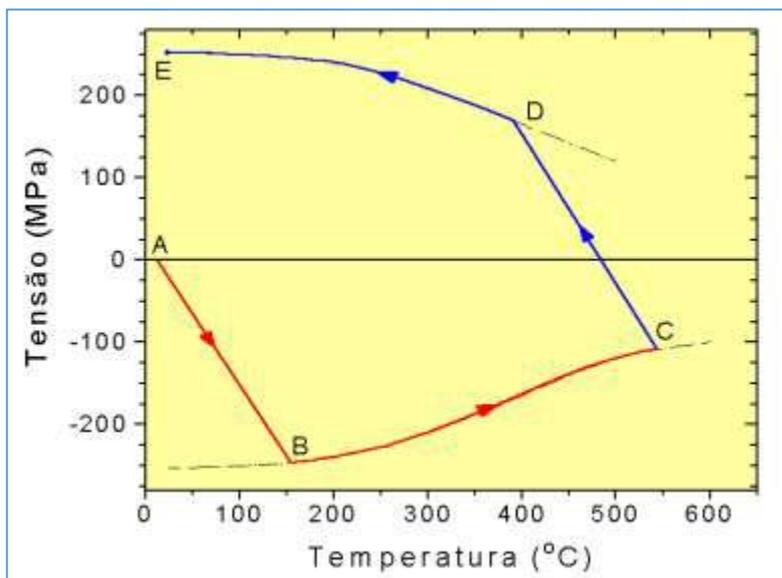


Figura 3.12 - Variação da tensão ( $\sigma_c$ ) com a temperatura na barra central (MODENESI, 2014).

Como o limite de escoamento tende a diminuir com a temperatura, o valor da tensão na barra central tende a cair à medida que a sua temperatura aumenta e a barra sofre uma maior deformação plástica, curva BC da Figura 3.12. Se o aquecimento é interrompido no ponto C, a barra central se contrai com a queda da temperatura. Devido às restrições impostas pelas barras externas, as tensões de compressão na barra central são reduzidas e tornam-se nulas acima da temperatura ambiente (pois, devido à sua deformação plástica, a barra se tornou mais curta do que as externas. Com a continuação do resfriamento, tensões de tração passam a atuar nela até que o limite de escoamento (agora sob condições de tração) seja atingido no ponto D. A partir desta temperatura, a barra central passa a se deformar plasticamente até atingir a temperatura ambiente. Ao final do processo, à temperatura ambiente, como resultado de sua deformação plástica, a barra central ainda terá um comprimento menor do que as externas. Assim, como as barras estão unidas pelas bases, as diferenças de comprimento entre elas serão acomodadas por deformações elásticas que gerarão tensões residuais. Na barra central, estas tensões serão de tração e de valor próximo ao do limite de escoamento do material, representado pelo ponto E da Figura 3.12. Nas barras externas, para se manter o equilíbrio de forças que atuam

sobre o conjunto, existirão tensões de compressão de valor igual à metade da tensão na barra central, supondo que as seções transversais das barras ainda tenham a mesma área. A Figura 3.13 mostra, esquematicamente, a distribuição de tensões residuais na montagem das barras após o ciclo térmico.

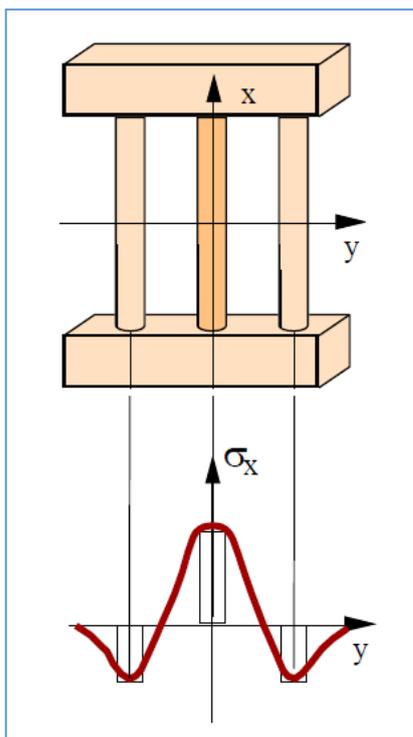


Figura 3.13 - Tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (MODENESI, 2014).

### **Defeitos de Planicidade em Chapas Grossas**

Uma das principais exigências da laminação de chapas grossas é produzir chapas planas e na espessura desejada (MEDEIROS, 2010). Existem três tipos mais frequentes de defeitos de planicidade no processamento das chapas grossas: ondulações, acanoamento e empeno.

#### **3.4.1. Ondulações**

Ginzburg (2009) classifica as ondulações em dois tipos. No primeiro, mostrado na Figura 3.14 (a), a ondulação é resultado de deformações alternadas de compressão e de tração ao longo da espessura da chapa ao longo da direção de laminação. O

resultado é a presença de tensões longitudinais opostas na parte superior e inferior da chapa, Figura 3.14 (b), mas na direção da largura da chapa a intensidade destas tensões é constante. Se esta chapa for cortada em tiras longitudinais, todas elas apresentarão o mesmo comprimento.

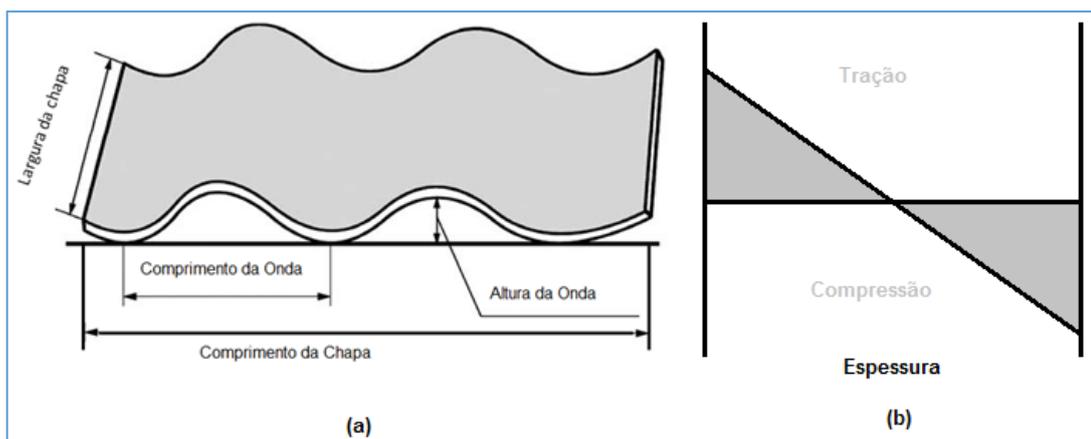


Figura 3.14 – Figura esquemática de uma chapa com ondulação e a distribuição de tensões ao longo da espessura (GINZBURG, 2009).

O segundo tipo é caracterizado pela presença de regiões onduladas e ocorre devido a um alongamento plástico nas tiras longitudinais da chapa que variam de intensidade ao longo da largura, porém constantes em toda espessura. Se a chapa for cortada em tiras longitudinais, as tiras das áreas onduladas apresentaram comprimentos maiores do que as tiras das áreas planas. A Figura 3.15 mostra a relação entre a posição da ondulação na chapa, o estado de tensões e a distribuição de comprimento das tiras em relação a largura da chapa. As regiões onduladas, que apresentam maior comprimento, estão sob compressão e exercem tração sobre as demais regiões da chapa. Este é o tipo mais comum de problemas de forma em produtos laminados planos. Destacam-se duas formas mais frequentes:

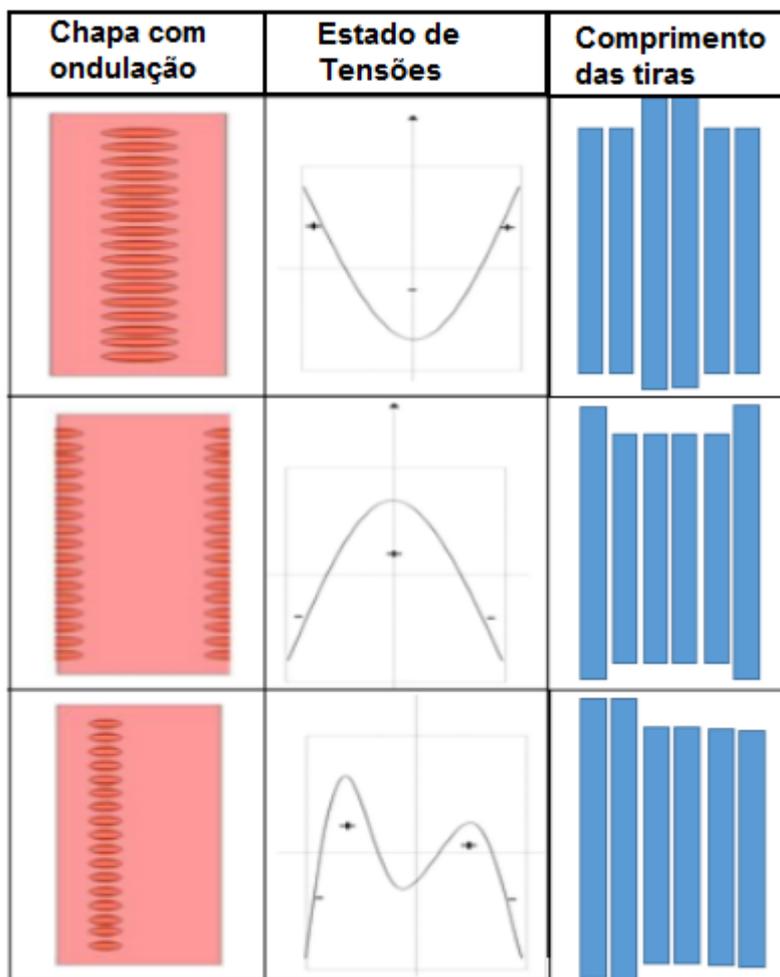


Figura 3.15 – Distribuição de comprimento e tensões em relação a largura em chapas apresentando regiões com ondulação. Adaptada de (MAHTUK, 1994).

- Ondulação de Borda: pode ser identificada por um centro plano com ondas nas bordas, indicando maior deformação nas bordas, Figura 3.16 (a). As ondas não se estendem em toda a largura da chapa e podem ocorrer em somente uma borda.
- Ondulação Central: observa-se maior deformação no centro da chapa na forma de ondas ao longo de todo comprimento, Figura 3.16 (b).

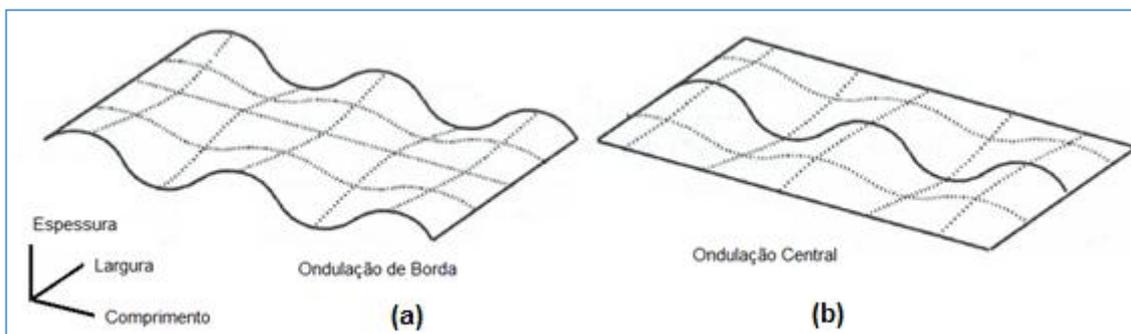


Figura 3.16 – Figura esquemática de uma chapa com (a) ondulação de borda e (b) ondulação central (GINZBURG, 2009).

### 3.4.2. Acanoamento

O acanoamento é uma classe de defeitos de planicidade que, da mesma forma que a ondulação, pode aparecer de várias formas, tais como: curvatura da chapa ao longo da largura, Figura 3.17 (a), e curvatura da chapa ao longo do comprimento Figura 3.17 (b) (GINZBURG, 2009).

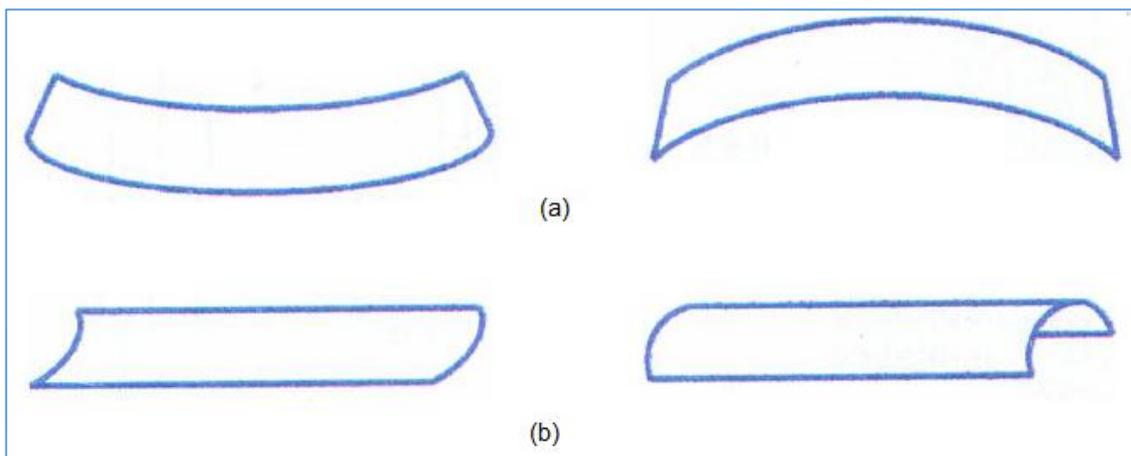


Figura 3.17 – Figura esquemática de chapas apresentando acanoamento em (a) com curvatura ao longo do comprimento e em (b) com curvatura ao longo da largura.

Este tipo de defeito ocorre devido à presença de um perfil de tensões longitudinais não uniformes ao longo da espessura da chapa. Se uma chapa for cortada em tiras ao longo de sua espessura, haverá diferença de comprimento entre as tiras da superfície inferior e as tiras da superfície superior. No exemplo mostrado na Figura 3.18 (a), a superfície inferior sofreu maior deformação plástica do que a superfície superior e apresenta por isso, maior comprimento. O perfil de tensão presente na chapa segue o

mostrado na Figura 3.18 (b). A superfície inferior encontra-se tracionada e a superfície superior comprimida. Como resultado, a chapa adquire uma curvatura voltada para cima ao longo de seu comprimento, conforme mostrado na Figura 3.18 (c).

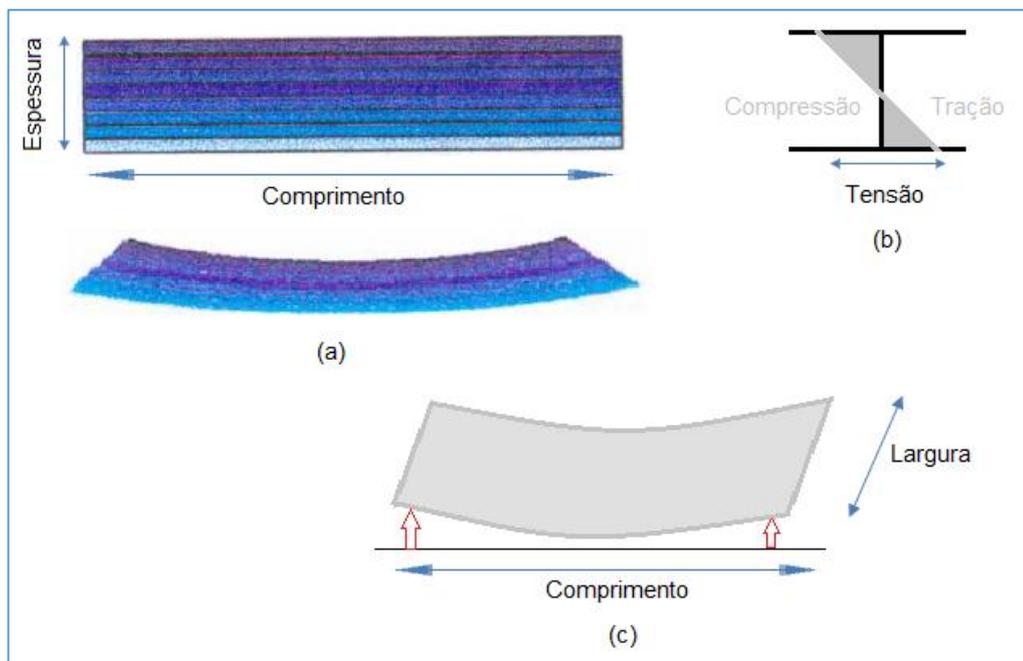


Figura 3.18 – (a) Variação de comprimentos entre as tiras ao longo da espessura da chapa, (b) Distribuição de tensões em função da espessura; (c) Forma da chapa resultante.

### 3.4.3. Empeno Lateral

Conforme mostrado na Figura 3.19, o empeno lateral, conhecido também como camber caracteriza-se por uma curvatura lateral da chapa em relação ao seu eixo longitudinal. O empeno lateral pode ocorrer no laminado ou em tiras do laminado após corte longitudinal, devido a um rearranjo da distribuição de tensões residuais. Este último será o foco deste trabalho.

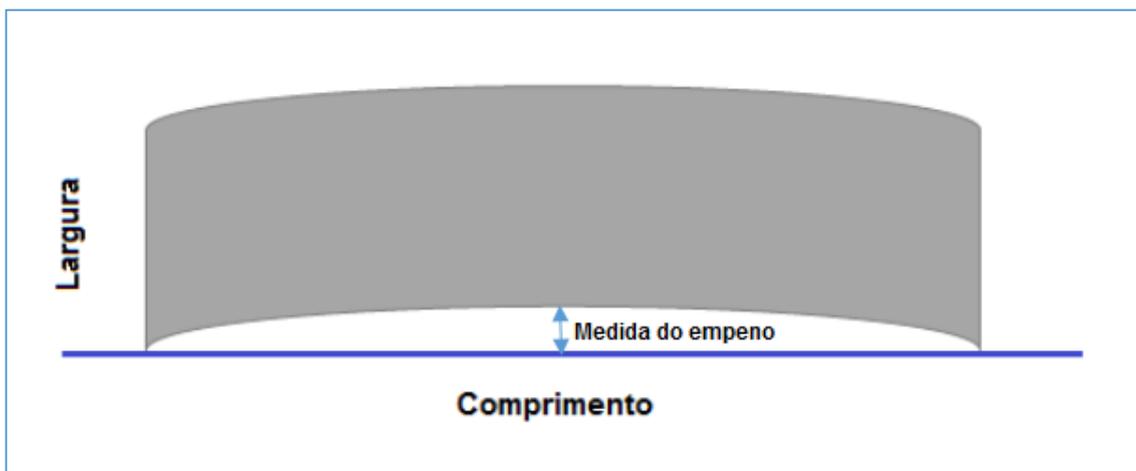


Figura 3.19 – Desenho Esquemático de uma chapa apresentando empeno lateral.

A figura 3.20 (a) mostra a distribuição de tensões longitudinais não homogêneas em chapa. Após corte longitudinal da chapa, processo que normalmente ocorre nos clientes de chapas grossas, há um alívio destas tensões e ocorre a deformação do material originando o empeno lateral conforme mostrado na Figura 3.20 (b), (MEDEIROS, 2010).



Figura 3.20 – Perfil da distribuição de tensões internas em uma chapa e curvatura das tiras após o corte longitudinal.

### 3.5. Simulação do Tratamento Térmico

A simulação computacional de tratamentos térmicos considera uma complexa interação entre a deformação, temperatura e transformação de fases, conforme mostra a Figura 3.21. As simulações de tratamento térmico têm que levar em consideração os efeitos térmicos dentro da simulação, incluindo a transferência de calor entre o material e o meio de resfriamento (SILVA, 2012).

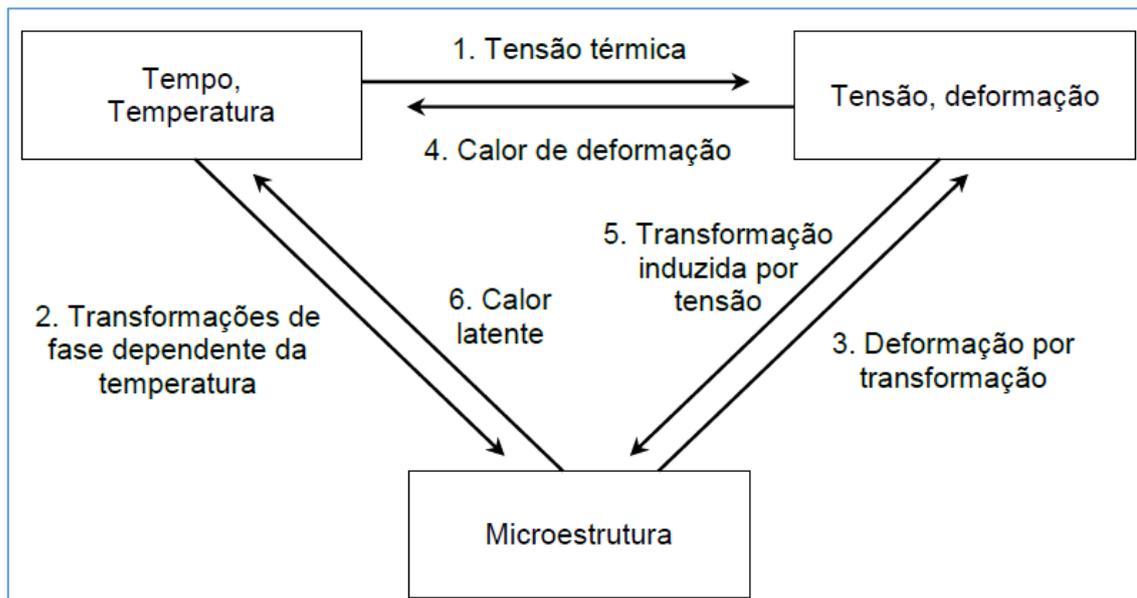


Figura 3.21 – Interrelação entre a temperatura, transformação de fase e comportamento mecânico (MEDEIROS, 2010).

A fim de obter resultados de simulação adequados, as propriedades do material devem conhecidas e ser fornecidas para a simulação de previsão da tensão residual e distorção causada pelo resfriamento acelerado (GUO, 2009):

Desconsiderando eventuais efeitos de transformações de fase, essas propriedades seriam as seguintes:

- Propriedades termo-físicas em função da temperatura: coeficiente de expansão térmica, coeficientes de transferência de calor;
- Propriedades mecânicas em função da temperatura: módulo de Young, curvas tensão-deformação efetivas.

### 3.6. Curvas Tensão-Deformação

#### 3.6.1. O Ensaio de Tração

O ensaio de tração é realizado para medir o efeito da deformação na tensão. Existem muitos outros testes como o de compressão e de torção, porém o ensaio de tração é o mais utilizado. O teste consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. A curva Tensão-Deformação é a representação gráfica do comportamento do material testado. A Figura 3.22 mostra um

exemplo de curva tensão-deformação onde se pode ver o comportamento do material nas regiões elástica e plástica, o limite de proporcionalidade (P) e o limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) considerando 0,2% de deformação. As curvas Tensão-Deformação são comumente representadas como:

- Curvas Tensão-Deformação de Engenharia ou Convencional onde consideram-se nos cálculos as dimensões iniciais do corpo de prova.
- Curvas Tensão-Deformação Verdadeira onde as dimensões instantâneas do corpo de prova em cada ponto são consideradas nos cálculos.

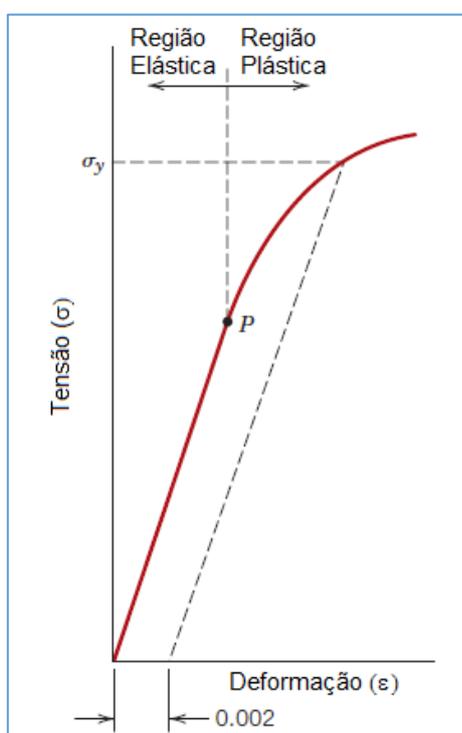


Figura 3.22 – Curva tensão x deformação típica de um metal mostrando as regiões elástica e plástica (CALLISTER, 2007).

Inicialmente a deformação é elástica, sendo a tensão proporcionalmente linear ao alongamento do corpo de prova. Esta relação é definida pela equação (3.6):

$$\sigma_1 = E e_1 \quad (3.6)$$

Conhecida como Lei de Hooke, onde  $\sigma_1$ , E e  $e_1$  são a Tensão, o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young e a Deformação, respectivamente. Verifica-se experimentalmente que, além da deformação a tração  $e_1$ , produzem-se duas

deformações negativas (contrações)  $e_2$  e  $e_3$ , nas duas outras direções, conforme mostrado na Figura 3.23. As três deformações se relacionam através da equação (3.7).

$$e_2 = e_3 = -\nu e_1 \quad (3.7)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson (cujo valor é da ordem de 0,3 para os metais). (CETLIN, 1993).

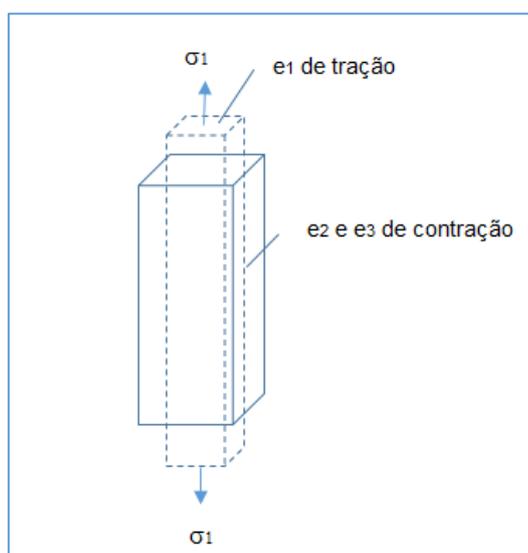


Figura 3.23 – Deformação de uma barra sob tração no regime elástico (CETLIN, 1993).

A deformação na direção 1 será a soma de todas as deformações nesta direção, o mesmo valendo para as direções 2 e 3. Então:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ e_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ e_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

À medida que a tensão aumenta, a deformação passa a ser plástica, ou seja, a alteração dimensional é permanente. De acordo com o critério de escoamento de von Mises, a deformação plástica iniciará quando a energia elástica de distorção por

unidade de volume, armazenado no material devido a um carregamento externo, atingir um valor crítico característico do material. A equação para o Critério de von Mises é expressa por:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (3.9)$$

A tensão efetiva ( $\sigma_e$ ) é uma grandeza cuja magnitude é a mesma, por exemplo, para dois estados de tensões mecanicamente equivalentes, ou seja, que produzem o mesmo efeito em um material com relação à ocorrência do escoamento, mesmo que as tensões individuais aplicadas  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , sejam diferentes. (CETLIN, 1993) (DIETER, 1988).

Frequentemente, supõe-se que o aumento da tensão de escoamento do material com a deformação, chamada de encruamento, depende do trabalho plástico realizado. O trabalho necessário para deformar o material à tração até uma deformação plástica  $e_1^f$  desde um estado inicial não deformado pode ser expresso pela equação 3.5.

$$U_0 = \int_0^{e_1^f} \sigma_1 de_1 \quad (3.10)$$

O trabalho plástico incremental por volume é a deformação efetiva,  $de_e$ , definida abaixo:

$$dU_0 = \sigma_1 de_1 + \sigma_1 de_1 + \sigma_1 de_1 = \sigma_e de_e \quad (3.11)$$

De acordo com von Mises:

$$de_e = \frac{\sqrt{2}}{3} [(de_1 - de_2)^2 + (de_1 - de_3)^2 + (de_2 - de_3)^2]^{1/2} \quad (3.12)$$

A deformação efetiva total é obtida, integrando-se a equação acima:

$$e_e = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2)} \quad (3.13)$$

### 3.6.2. Tensão e Deformação Verdadeira e Convencional

Para algumas aplicações, tais como para fins de simulação, é necessário conhecer o comportamento do material baseado na curva Tensão-Deformação verdadeira mostrada na Figura 3.24 para a região plástica chamada de curva de fluxo (SILVA, 2012).

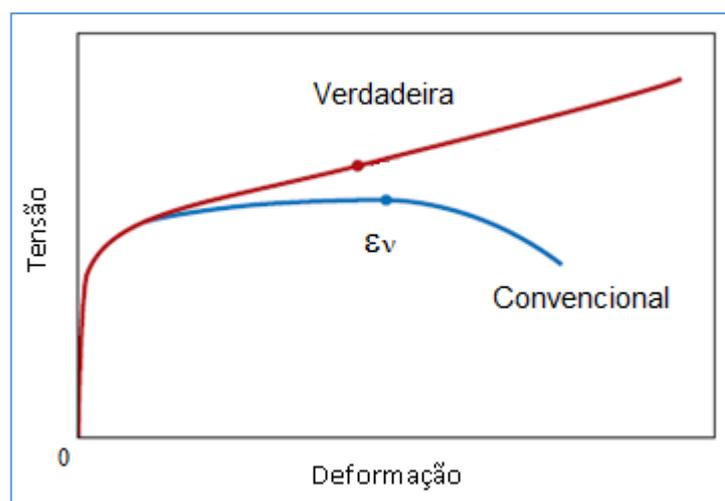


Figura 3.24 – Comparação entre a curva tensão-deformação verdadeira e convencional (CALLISTER, 2007).

A curva tensão-deformação convencional não apresenta uma informação real das características de tensão e deformação do material porque se baseia inteiramente nas dimensões originais do corpo de prova e que são continuamente alteradas durante o ensaio (GARCIA, 2000). A tensão verdadeira,  $\sigma_v$ , é dada pela equação (3.14).

$$\sigma_v = \frac{P}{S} \quad (3.14)$$

Onde P = carga (Pa) e S = área da seção transversal instantânea (m<sup>2</sup>). A deformação verdadeira,  $\varepsilon_v$ , é dada como função da variação infinitesimal da deformação e é definida pela equação (3.15)

$$d\varepsilon_v = \frac{dl}{l} \quad (3.15)$$

que é válida para uma deformação uniaxial uniforme. A deformação verdadeira é dada pela integração da equação (3.15) dentro dos limites inicial ( $l_0$ ) e instantâneo ( $l$ ) conforme equação (3.16).

$$\varepsilon_v = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3.16)$$

A equação (3.16) não é aplicável para a região após o início da estricção no ensaio de tração e assim,  $\varepsilon_v$  deve variar entre os limites 0 e  $\varepsilon_v$ , onde  $\varepsilon_v$  corresponde a uma deformação no ponto de início de estricção do gráfico da Figura 3.24. Para se avaliar a deformação nesta região, é preciso analisar outras direções além da direção de aplicação da carga. Como o volume  $V$  é constante na região plástica, desprezando-se as variações elásticas ( $V=V_0$ , onde o índice "0" corresponde à situação inicial do corpo de prova), pode-se escrever que  $S \cdot l = S_0 \cdot l_0 = \text{constante}$  ou  $Sdl + ldS = 0$  e rearranjando tem-se  $\frac{dl}{l} = -\frac{dS}{S} \rightarrow \int_0^\varepsilon d\varepsilon = \int_{S_0}^S -\frac{dS}{S}$  ou pela equação (3.17).

$$\varepsilon_v = \ln \frac{S_0}{S} \quad (3.17)$$

A equação (3.17) é válida para deformações no campo plástico já que o volume não permanece constante durante a tração no campo elástico.

### 3.6.3. Relações entre Tensões e Deformações Verdadeiras e Convencionais

#### **Deformação**

A deformação verdadeira pode ser determinada, a partir da deformação convencional, por  $\varepsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$  ou  $\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon_c$ . Mas, pelas equações (3.16) e (3.17), tem-se que:

$$\varepsilon_v = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3.18)$$

E, portanto:

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (3.19)$$

A equação (3.19) só é válida até o início da estrição.

### Tensão

Partindo da equação (3.18), tem-se que:

$$\varepsilon_v = \ln \frac{S_0}{S} = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (3.20)$$

Ou

$$S = \frac{S_0}{1 + \varepsilon_c} \quad (3.21)$$

Introduzindo a equação (3.20) na equação (3.14) chega-se a  $\sigma_v = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_0}(1 + \varepsilon_c)$  ou na equação (3.22).

$$\sigma_v = \sigma_c(1 + \varepsilon_c) \quad (3.22)$$

A equação (3.22) também só é válida até o início da estrição. A curva tensão-deformação verdadeira é traduzida pelas seguintes relações mostradas nas equações (3.23) e (3.24).

$$\text{Na região elástica: } \sigma_v = E \cdot \varepsilon_v \quad (3.23)$$

$$\text{Na região plástica: } \sigma_v = k \cdot \varepsilon_v^n \quad (3.24)$$

Onde k é o coeficiente de resistência (Pa) e n o coeficiente de encruamento (adimensional). Ambos os coeficientes são características particulares do material. A equação (3.24) é conhecida como Equação de Hollomon. Frequentemente observam-se desvios nesta equação, principalmente para altas deformações ( $\varepsilon \sim 1.0$ ) e para baixas deformações ( $10^{-3}$ ). Outras equações também são utilizadas para descrever a relação tensão-deformação no regime plástico (DIETER, 1988). Dentre elas destacam-se:

- Equação de Ludwik:

$$\sigma = \sigma_0 + k \varepsilon^n \quad (3.25)$$

onde  $\sigma_0$  é a tensão de escoamento.

- Equação de Swift:

$$\sigma = k (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (3.26)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a deformação inicial.

### 3.7. Deformação Térmica

Uma considerável parte da energia aplicada nos processos de fabricação é convertido em calor. Os motivos para geração de calor incluem o calor gerado no trabalho mecânico durante a deformação do material, o calor gerado pela fricção entre peças e ferramentas e a mudança de temperatura dos materiais com os processos de aquecimento e resfriamento. Estas mudanças de temperatura causam expansão e contração dos materiais, portanto a deformação térmica ocorre quando o coeficiente de expansão térmica e a variação de temperatura estão especificados e é dada pela equação (3.28):

$$\varepsilon^{th} = \alpha(T - T_0) = \alpha\Delta T \quad (3.28)$$

Onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica e  $T_0$  é a temperatura de referência. Dependendo das condições de contorno do sistema, a dilatação do material pode causar deformação elástica ou plástica.

### 3.8. O Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. O método pode ser usado para resolver sistemas como estruturas e processos de fabricação. Basicamente, o corpo/sistema estudado é

dividido em elementos finitos, ou elementos, conectados por nós, e a carga e os deslocamentos são calculados (BICKFORD, 1994).

O MEF foi desenvolvido na década de 1950 pela indústria aeroespacial, incluindo Boeing e Bell Aeroespacial (EUA) e Rolls Royce (Reino Unido). M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin e L.J. Topp publicaram em 1957 os primeiros artigos sobre este novo método. No início, as matrizes de elementos foram desenvolvidas, mas o termo elemento finito foi usado mais tarde por Ray Clough, que se tornou famoso como um dos desenvolvedores MEF. Inicialmente, a sociedade científica era cética em relação ao MEF. Mais tarde, muitos estudos poderiam provar as vantagens do método. Os matemáticos demonstraram, no início da década de 1960, que a solução baseada em elementos finitos converge para resultados precisos para as equações diferenciais parciais. Deste modo, quanto mais elementos utilizados no problema, maior a tendência da solução ser precisa. A Figura 3.25 exemplifica a aplicação Método de Elemento Finito. A malha de elementos finitos e o processo de fabricação da malha é chamado de geração de malha (FISH, 2007).

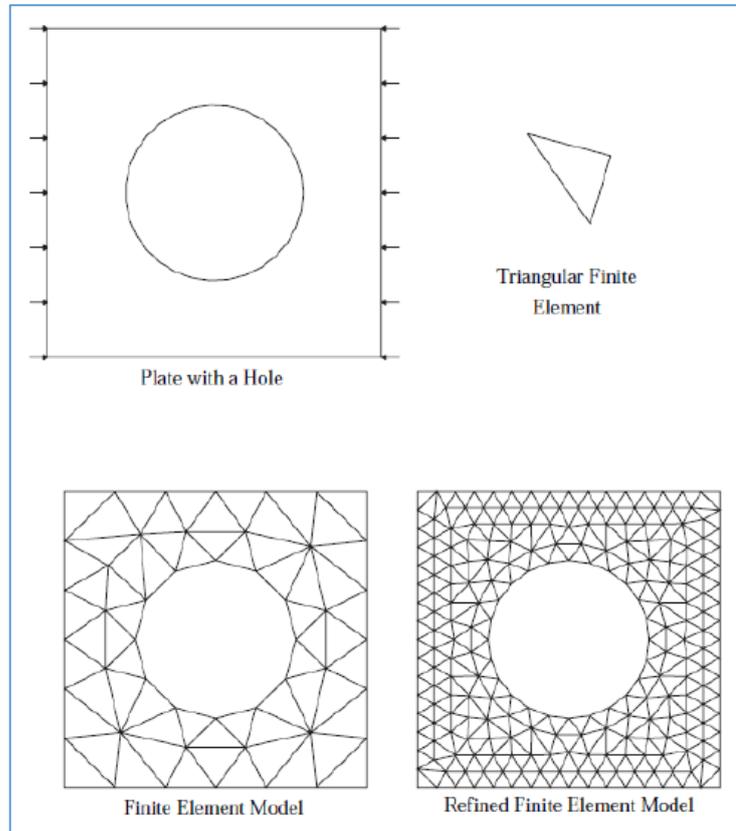


Figura 3.25 – Exemplo de modelo de elemento finito (FISH, 2007).

A aplicação do MEF é muito ampla e versátil e pode ser utilizadas em vários tipos de análise, tais como (FISH, 2007):

- Análises térmicas e de tensão de peças industriais, tais como chips eletrônicos, dispositivos elétricos, válvulas, tubos, recipientes sob pressão, motores e aeronaves automotivos;
- Análise sísmica de barragens, usinas, cidades e prédios;
- Análise de acidentes de carros, comboios e aviões;
- Análise eletromagnética de antenas, transistores e assinaturas de aeronaves;
- Análise de procedimentos cirúrgicos como cirurgia plástica, reconstrução de mandíbula, correção de escoliose e muitos outros.

Na prática, a análise por elementos finitos consiste em três passos (SOARES, 2010):

#### 1º) Pré-processamento

Esta etapa compreende o modelamento do problema a ser resolvido. Na construção do modelo é realizada a subdivisão da geometria em malhas. Aos nós são aplicadas as condições de contorno, como esforços aplicados e graus de liberdade do elemento. A escolha do formato e número de elementos da malha é um fator de extrema atenção e demanda a maior parte do tempo na elaboração do trabalho.

#### 2º) Análise

Nesta etapa, a ferramenta adequada para processamento dos dados preparados na etapa anterior é selecionada. Os dados são utilizados para alimentar o software para o processamento e fornecimento da solução matemática das equações. Normalmente, são utilizados softwares comerciais, mas algoritmos específicos também podem ser desenvolvidos para solução de sistemas.

#### 3º) Pós-processamento

Esta etapa consiste na análise, interpretação e verificação dos resultados gerados pelo aplicativo numérico. Utilizando recursos gráficos pode-se visualizar tensões,

deformações, distribuição de temperaturas, fluxo de material, força de laminação, torque, taxa de deformação, evolução microestrutural, entre outros.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

O material utilizado nas simulações foi o aço AISI 1015 com a composição química especificada pela Norma SAE J403 conforme mostrado na Tabela IV.1. Trata-se de um aço carbono que no mercado de planos pode ser aplicado para fins estruturais. 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.

Tabela IV.1 - Composição química do aço AISI 1015 (SAE INTERNATIONAL, 2014)

Elemento	C	Mn	P	S
(%peso)	0,13-0,18	0,30-0,60	0,030 máx.	0,035 máx.

Foram utilizadas as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material informadas na biblioteca do software DEFORM™ versão 10.0. À temperatura ambiente (20°C), o material apresenta Módulo de Young de 210GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

A Tabela IV.2 e a Figura 4.1 apresentam os dados de tensão e deformação e as curvas de escoamento, respectivamente, em diferentes temperaturas para o material AISI 1015 da biblioteca do software de elementos finitos segundo a taxa de deformação de  $1,6s^{-1}$ .

Tabela IV.2 - Dados de tensão e deformação das curvas de escoamento do aço AISI 1015 em diferentes temperaturas para taxa de deformação de  $1,6s^{-1}$ .

Deformação	Tensão (MPa) a $1,6s^{-1}$							
	Temperatura							
	20°C	300°C	400°C	600°C	800°C	900°C	1000°C	1200°C
0	360	360	390	250	110	120	75	20
0,05	480	480	470	290	130	130	90	30
0,1	600	600	550	330	150	140	105	40
0,2	675	675	620	350	180	170	130	60
0,4	720	720	660	360	190	200	130	60
0,6	740	740	660	360	195	200	130	60
0,8	750	750	660	360	200	200	130	60

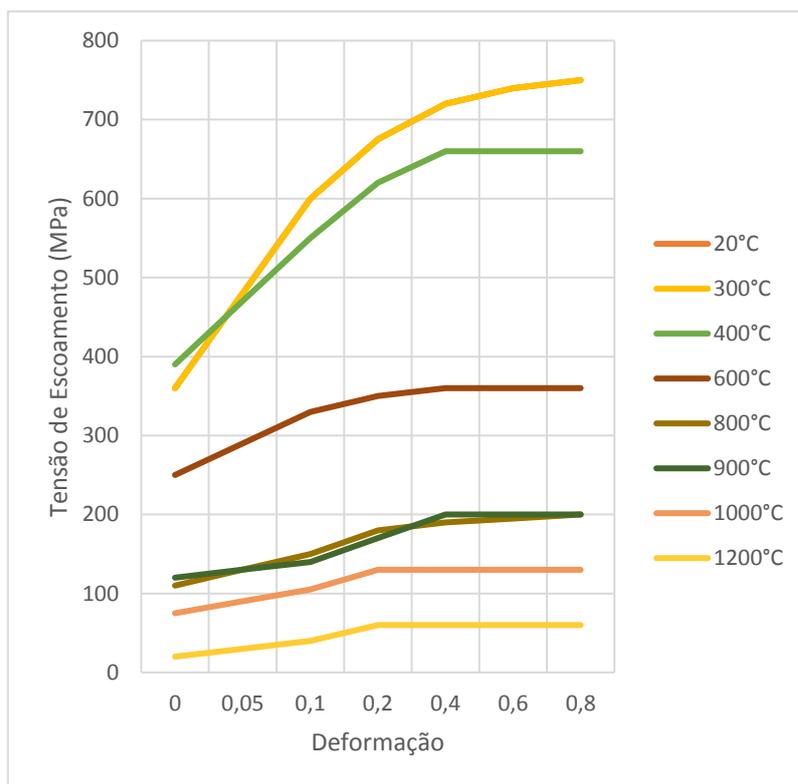


Figura 4.1 - Curvas de escoamento do Aço AISI 1015 em diferentes temperaturas a taxa de deformação de  $1,6 s^{-1}$  (SFTC, 2010).

A Tabela IV-3 e a Figura 4.2 apresentam dos dados de tensão e deformação e as curvas de escoamento, respectivamente, em diferentes taxas de deformação para o

material AISI 1015 da biblioteca do software de elementos finitos à temperatura de 20°C.

Tabela IV.3 - Dados da Curva de Escoamento do Aço AISI 1015 para várias taxas de deformação a temperatura de 20°C.

<b>Tensão (MPa) a 20°C</b>			
<b>Taxa de Deformação (s<sup>-1</sup>)</b>			
<b>Deformação</b>	<b>1,6</b>	<b>8</b>	<b>40</b>
<b>0</b>	360	362	364
<b>0,05</b>	480	482	484
<b>0,1</b>	600	602	604
<b>0,2</b>	675	677	679
<b>0,4</b>	720	722	724
<b>0,6</b>	740	742	744
<b>0,8</b>	750	752	754

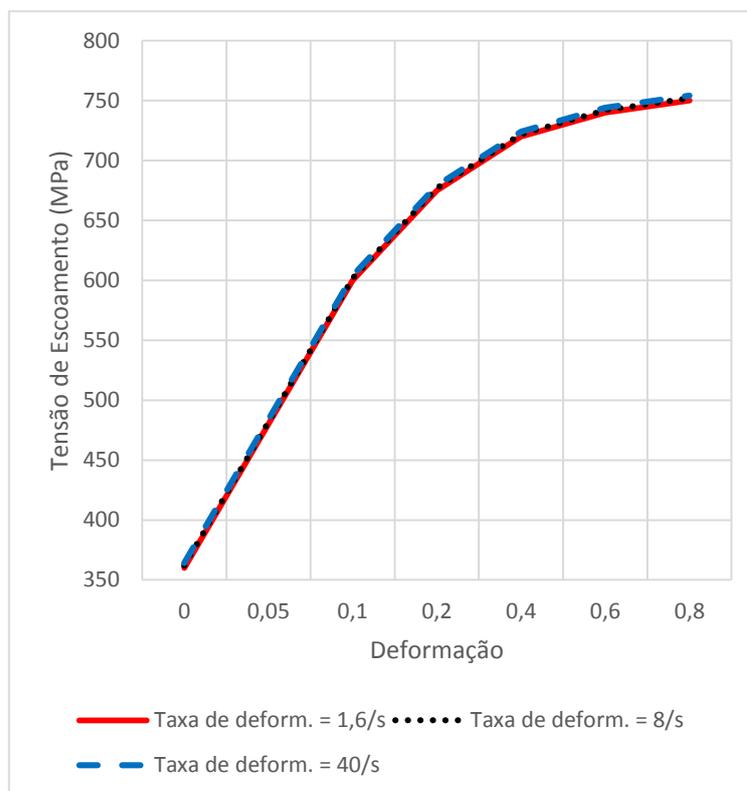


Figura 4.2 - Curvas de escoamento do Aço AISI 1015 em diferentes taxas de deformação a 20°C (SFTC, 2010).

## 4.2. Métodos

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 e do comprimento da chapa.

A espessura, largura e comprimento da chapa simulada foram 12, 2.500 e 13.000 mm, respectivamente. A espessura e largura correspondem às dimensões comerciais mais comuns no mercado de chapas grossas. O comprimento utilizado, menor do que o comprimento usual no resfriamento acelerado, foi escolhido com o objetivo de simplificar a malha de elementos e as simulações. A malha definida corresponde a 4 elementos na espessura, 912 na largura e 4.534 no comprimento. 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.

As simulações foram conduzidas de forma a avaliar a influência do resfriamento não homogêneo entre diferentes superfícies da chapa na geração de defeitos de forma e de tensões residuais. Para isso as simulações foram agrupadas em três casos (A, B e C). Cada caso corresponde a uma condição de resfriamento onde foram definidas as superfícies e as suas respectivas taxas de resfriamento. Para cada caso foram realizadas quatro simulações (1, 2, 3 e 4). Em cada uma destas simulações variou-se a diferença das taxas de resfriamento entre as superfícies predeterminadas. Os percentuais correspondentes a estas diferenças foram 5, 10, 20 e 30% supondo situações hipotéticas.

Nos três casos 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 0,007s/step. Estes parâmetros de simulação foram definidos após a realização dos testes de convergência, que consistem em determinar a partir de qual valor de “time step” os resultados de mantem os mesmos. Determinou-se o tempo de 5,83 segundos para duração do processo, que corresponde ao tempo para resfriar de 850°C a 500°C a uma taxa de 60°C/s.

### Caso A – Resfriamento não Homogêneo entre a Superfície Inferior e a Superior 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 4.3. 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.

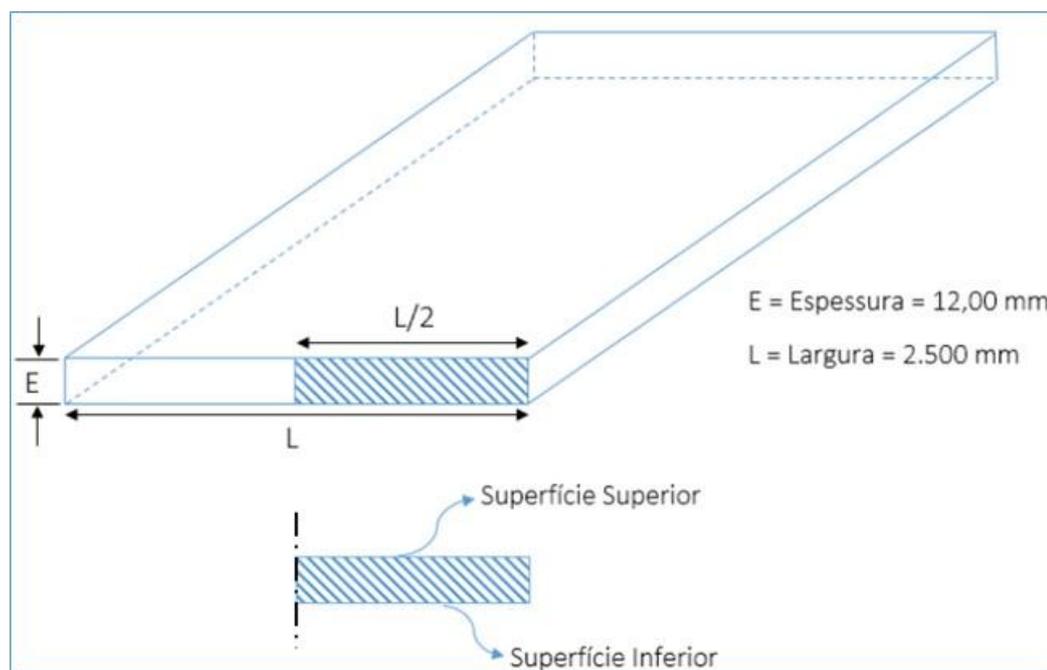


Figura 4.3 - Geometria da chapa e detalhe da área utilizada nas simulações dos Casos A e B.

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

As taxas e as condições de resfriamento utilizadas nas simulações deste estudo foram definidas em função da sua representatividade em outros casos estudados (KOO, 2007), (SUSUKI, 1998), (EVANS, 2001).

A Figura 4.4 mostra em destaque as superfícies que foram resfriadas na simulação e as respectivas taxas de resfriamento utilizadas.

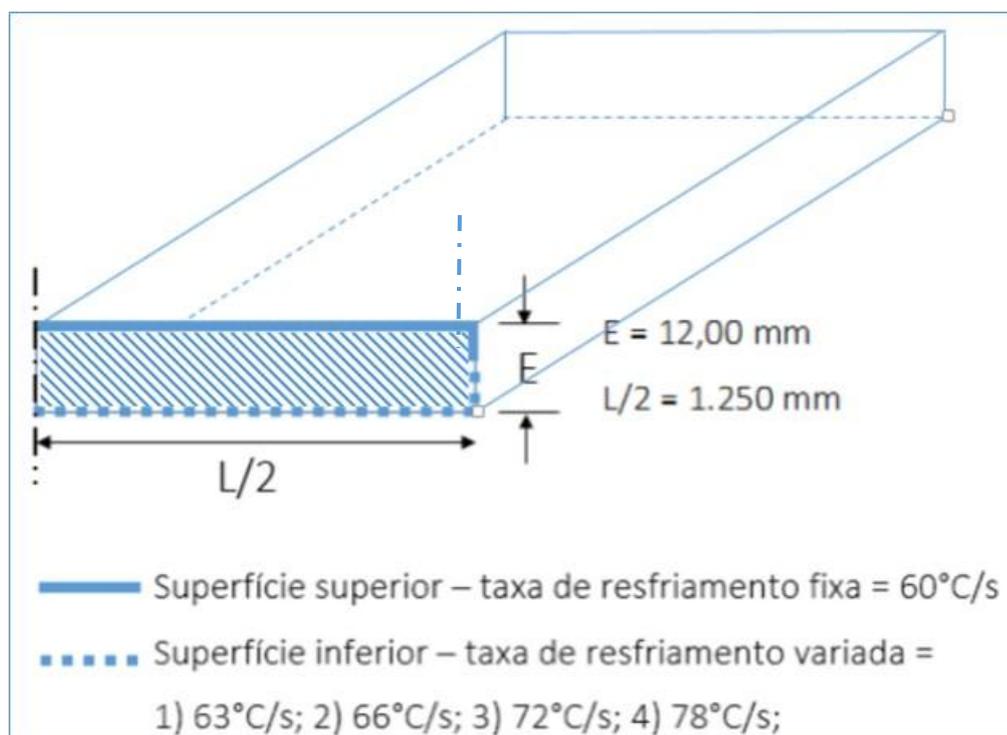


Figura 4.4 – Destaque das superfícies resfriadas (superior e inferior) e as respectivas taxas de resfriamento – Caso A.

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. A Figura 4.5 mostra o detalhe da malha descrita acima.

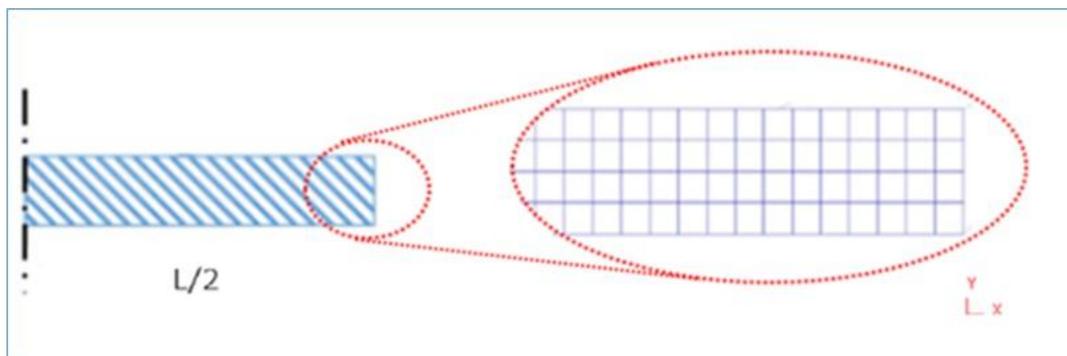


Figura 4.5 – Detalhe da malha utilizada nas simulações - Casos A e B.

### Caso B - Resfriamento não Homogêneo entre a Borda Lateral e o Meio Chapa

Sabe-se que as extremidades das chapas são resfriadas mais rapidamente do que o meio. Os sistemas de resfriamento acelerado mais modernos são equipados com recursos tecnológicos capazes de controlar a vazão de água nestas regiões com o objetivo de compensar as diferenças de resfriamento. O resfriamento não uniforme nestas condições pode gerar variações de tensões residuais ao longo da largura, ondulações e em processos subsequentes, como o corte longitudinal ou “slitting”, podem causar o “camber” que se caracteriza pela curvatura lateral da tira cortada.

A geometria e as dimensões da chapa utilizadas nas simulações foram as mesmas usadas no Caso A, conforme mostrado na Figura 4.3. A malha considerada foi a mesma utilizada no Caso A, conforme ilustrado anteriormente na Figura 4.5.

A Figura 4.6, mostra em destaque as superfícies que foram resfriadas na simulação e as respectivas taxas de resfriamento. A borda lateral da chapa, considerada neste estudo, foi equivalente a 150 mm da largura localizada na extremidade lateral. O meio da chapa corresponde, portanto, a 1.100 mm. No Caso B foram realizadas quatro simulações variando-se a taxa de resfriamento da borda lateral e mantendo-se fixa a taxa de resfriamento no meio. A taxa de resfriamento do meio nas quatro simulações foi de 60°C/s. Para as bordas foram adotadas as mesmas taxas utilizadas no caso A:

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

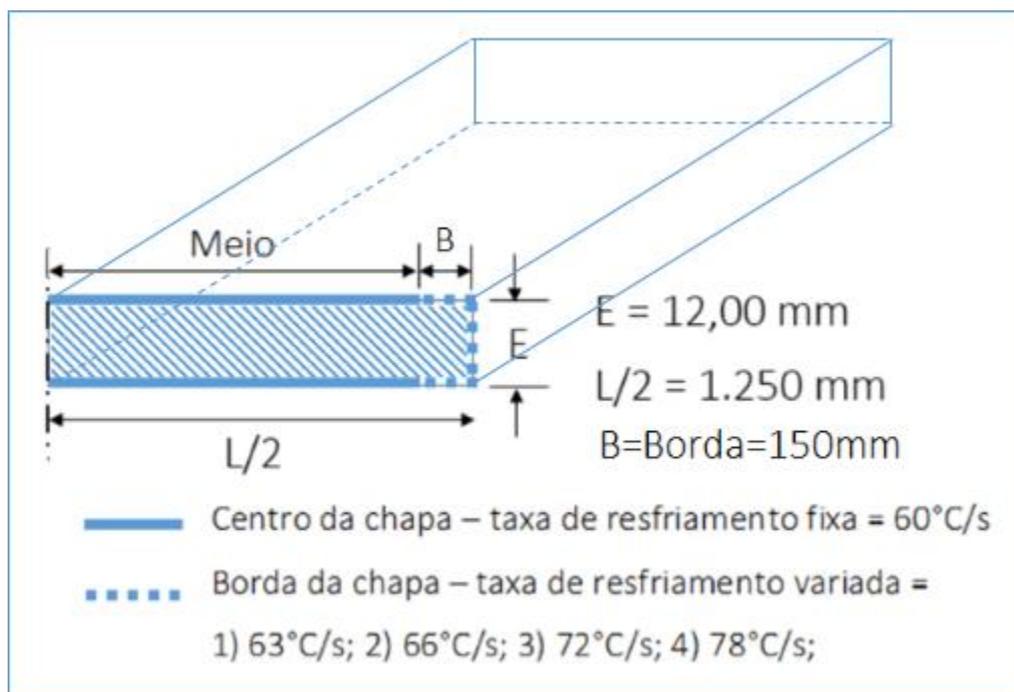


Figura 4.6 – Destaque das superfícies resfriadas (borda e meio) e as respectivas taxas de resfriamento – Caso B.

### Caso C - Resfriamento não Homogêneo entre Superfícies Alternadas

As simulações realizadas no Caso C objetivaram avaliar o resfriamento não homogêneo entre diferentes faixas transversais ao longo do comprimento da chapa. Variações de resfriamento na direção do comprimento da chapa são capazes de gerar ondulações transversais ao longo de todo o comprimento.

A geometria e as dimensões da chapa utilizadas nas simulações são dadas na Figura 4.7. Devido à simetria da geometria somente metade do comprimento da chapa foi simulada.

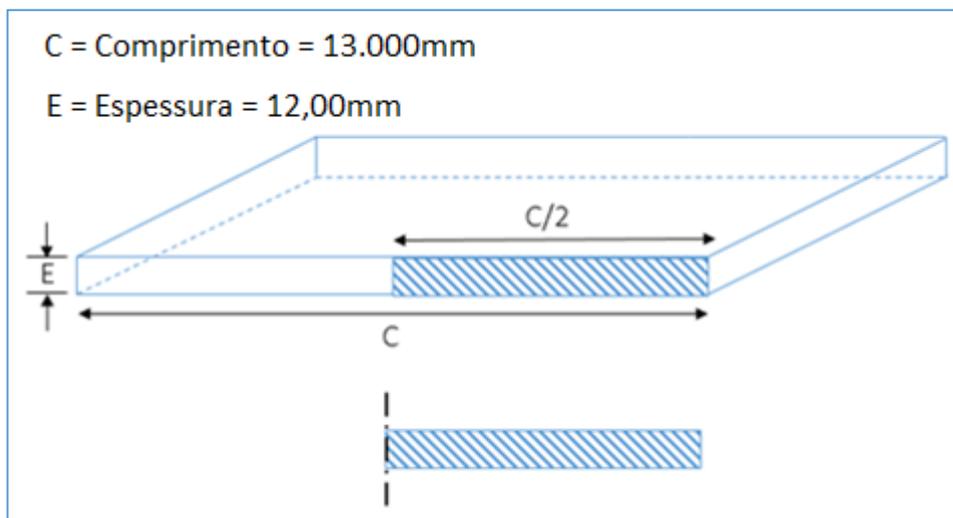


Figura 4.7 – Geometria da chapa e detalhe da área utilizada nas simulações do Caso C.

Conforme ilustrado na Figura 4.8, as superfícies  $\beta$  foram resfriadas mais rapidamente do que as superfícies  $\alpha$ . Foram realizadas quatro simulações variando-se a taxa de resfriamento das superfícies  $\beta$  e mantendo-se fixa a taxa de resfriamento das superfícies  $\alpha$ . A taxa de resfriamento das superfícies  $\alpha$  nas quatro simulações foi de  $60^\circ\text{C/s}$ . As taxas utilizadas nas superfícies  $\beta$  foram:

- Simulação C.1 –  $63^\circ\text{C/s}$  (5% maior do que a superfície superior);
- Simulação C.2 –  $66^\circ\text{C/s}$  (10% maior do que a superfície superior);
- Simulação C.3 –  $72^\circ\text{C/s}$  (20% maior do que a superfície superior);
- Simulação C.4 –  $78^\circ\text{C/s}$  (30% maior do que a superfície superior).

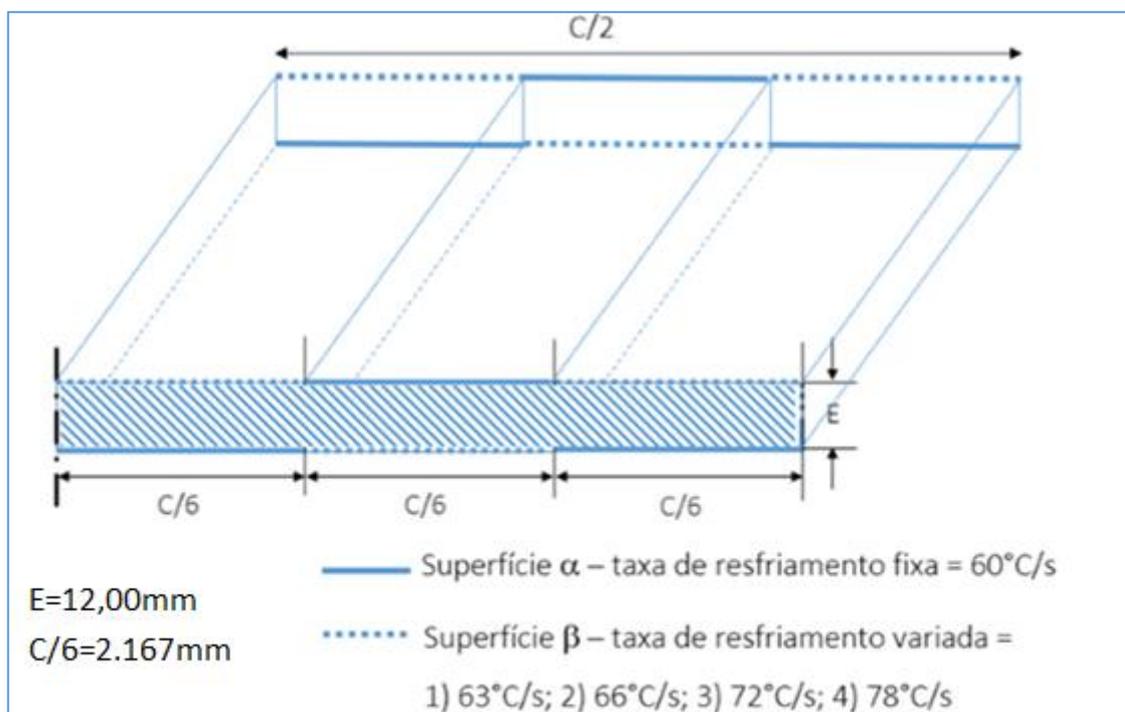


Figura 4.8 – Destaque das superfícies resfriadas ( $\alpha$  e  $\beta$ ) e as respectivas taxas de resfriamento – Caso C.

Foram utilizados 9.068 elementos, sendo 4 elementos da direção Y, correspondente a espessura da chapa e 4.534 na direção X, correspondente a  $\frac{1}{2}$  do comprimento da chapa como mostrado na Figura 4.9.

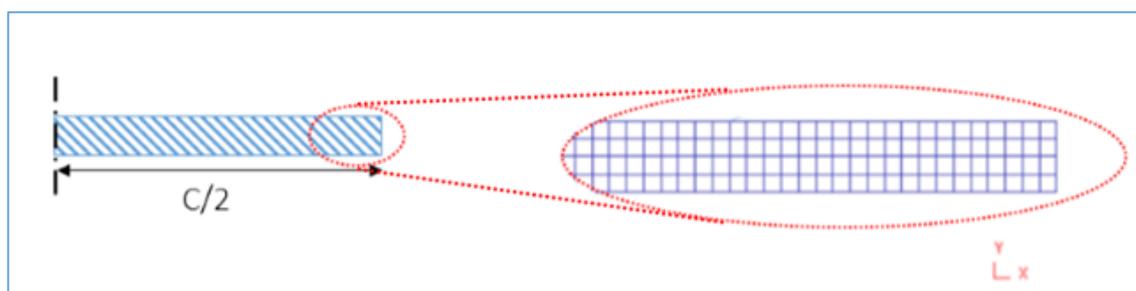


Figura 4.9 – Detalhe da malha utilizada nas simulações – Caso C.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelas simulações foram organizados de forma a permitir a comparação das simulações para as condições de contorno propostas em cada caso estudado. Foram avaliados a evolução da temperatura durante o resfriamento, a distorção após o resfriamento e os perfis de tensões residuais.

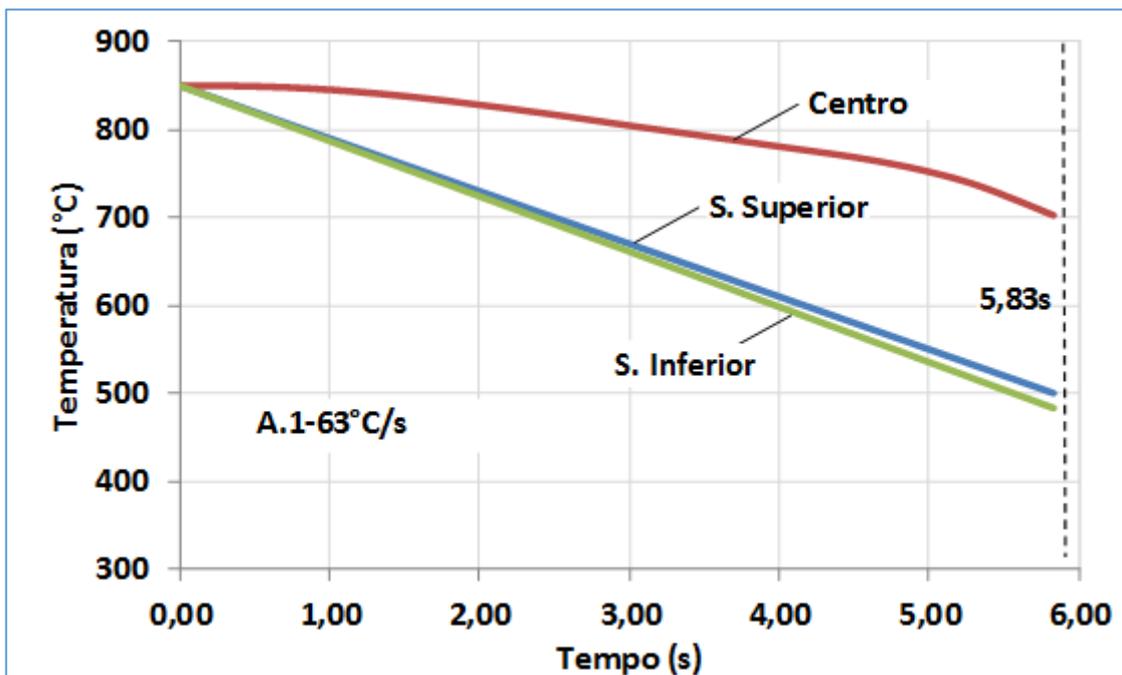
### 5.1. Caso A – Resfriamento não Homogêneo entre a Superfície Inferior e a Superior da Chapa

#### I) Evolução da temperatura durante o resfriamento

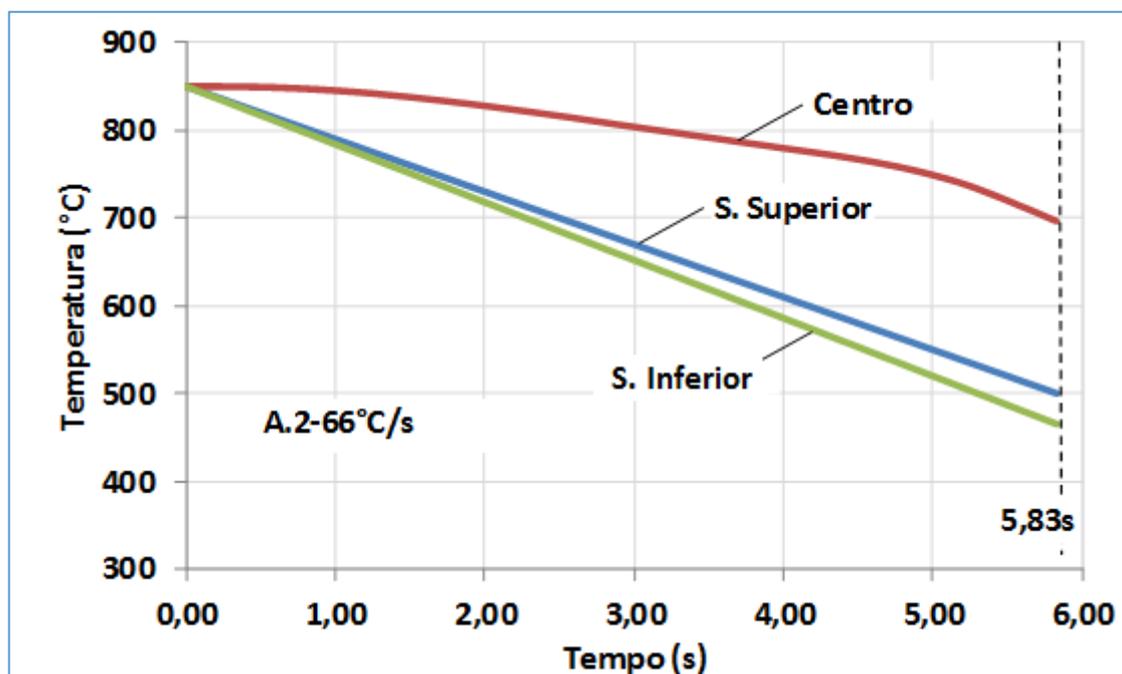
Os gráficos da Figura 5.1 mostram a evolução da temperatura nas superfícies superior e inferior e no centro da chapa durante o processo de resfriamento acelerado para cada uma das quatro taxas de resfriamento utilizadas. A Figura 5.1 (a) mostra a evolução da temperatura para a simulação A.1, a Figura 5.1 (b) mostra a evolução da temperatura para a simulação A.2, a Figura 5.1 (c) mostra a evolução da temperatura para a simulação A.3 e a Figura 5.1 (d) mostra a evolução da temperatura para a simulação A.4.

As curvas relativas à superfície superior se mantiveram constantes, uma vez que a taxa de resfriamento foi a mesma nas quatro simulações. Comparando as curvas relativas à superfície inferior, observam-se mudanças 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 resfriava-se mais lentamente do que as superfícies. Os perfis destas curvas se mantem praticamente os mesmos 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. Ao final do resfriamento, ocorrido após 5,83 segundos, os gradientes de temperatura em ambas as superfícies foram 17°C para a simulação A.1, 35°C para a simulação A.2, 70°C para a simulação A.3 e 105°C para a simulação A.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 A.1, A.2, A.3 e A.4,

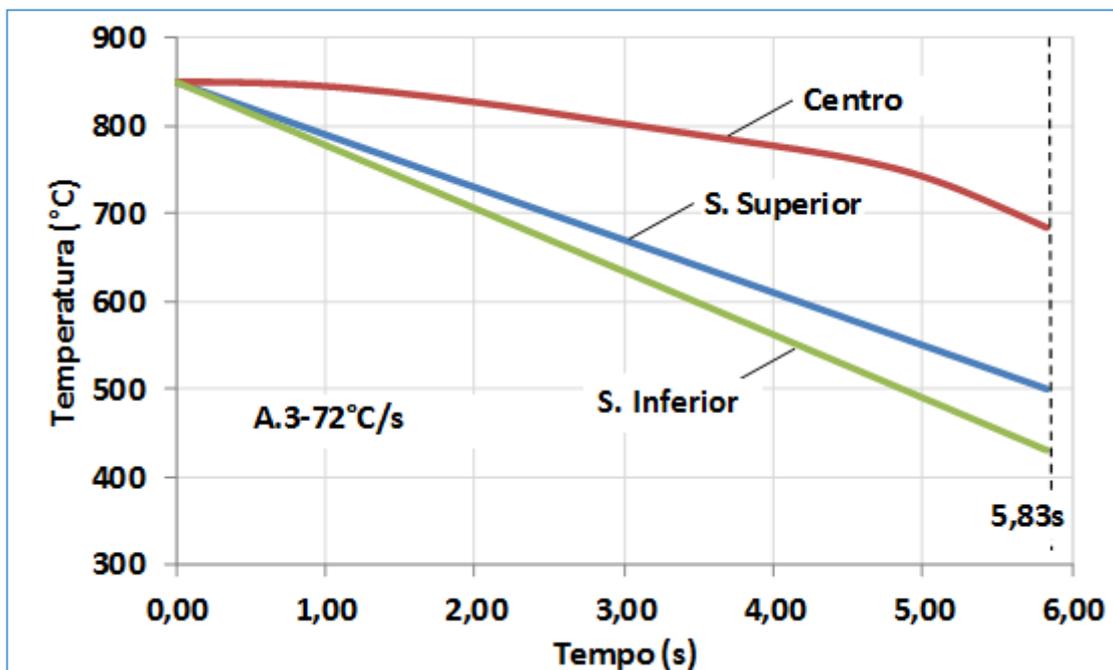
respectivamente. A variação nas taxas de resfriamento na superfície inferior influenciou a curva de resfriamento do centro da chapa.



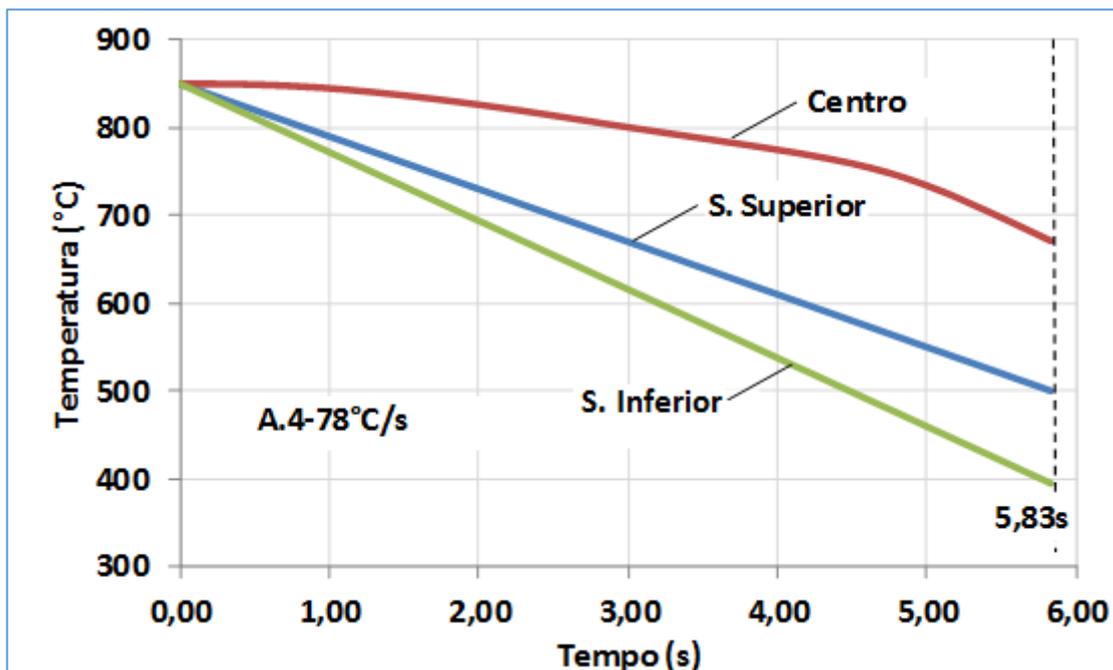
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1 - Evolução da temperatura durante o resfriamento para as simulações A.1 (a), A.2 (b), A.3 (c) e A.4 (d).

II) Distorção

A Figura 5.2 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 conforme indicado na Figura 5.3 pela linha pontilhada. 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.

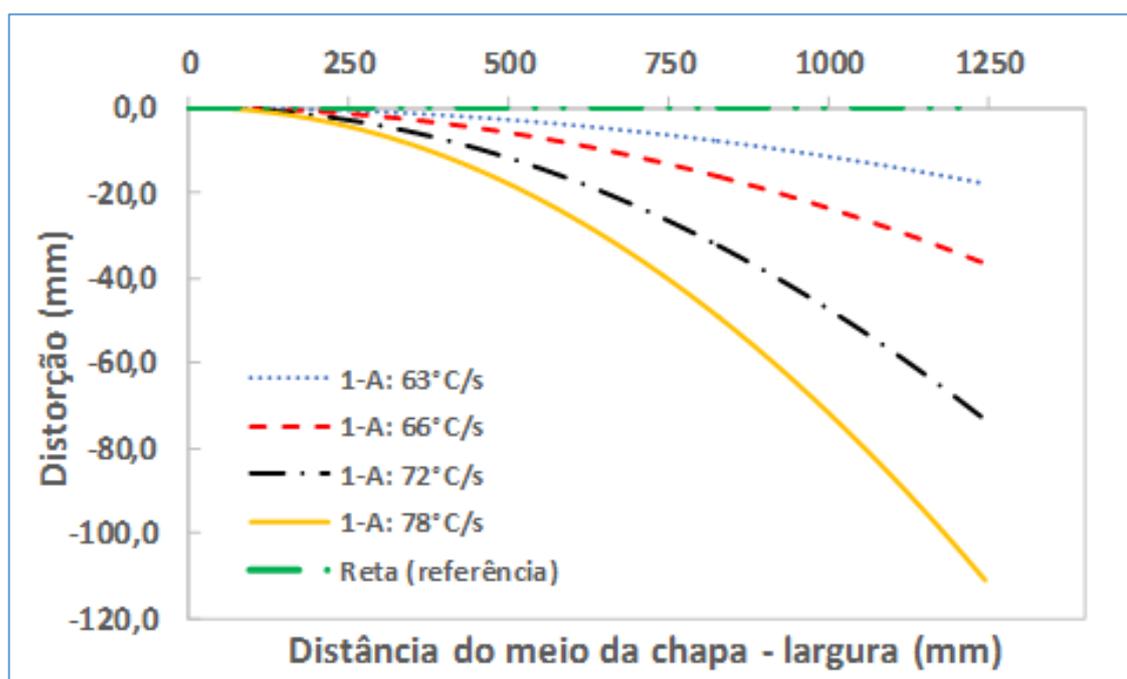


Figura 5.2 – Perfis de distorção na superfície inferior da chapa, na direção Y, para diferentes taxas de resfriamento – Caso A.

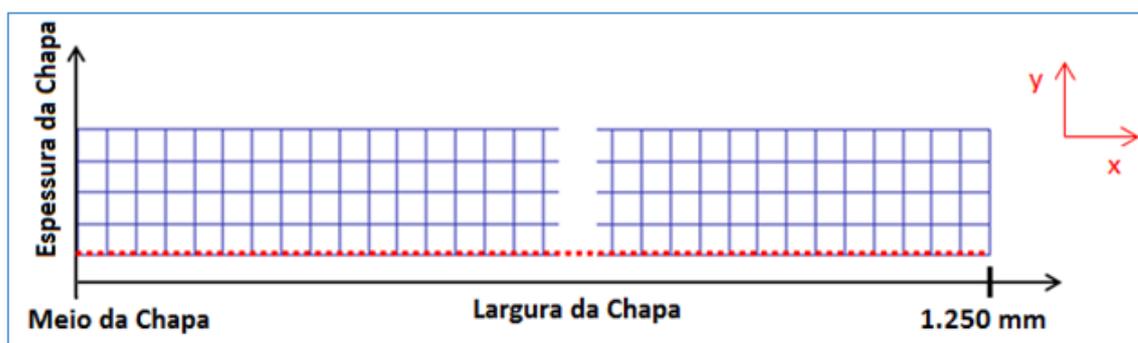


Figura 5.3 – Nós utilizados para medição da distorção após o resfriamento.

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 V.1.

Tabela V.1 - Resultados de planicidade do Caso A – Referência: Norma DIN EN 10029.

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

Os resultados aprovados pela norma citada, em destaque na tabela acima (sombreados em cinza), correspondem às simulações A.1 63°C/s para os padrões de medição que utilizam réguas de referência de 1.000 e 2.000 mm de comprimento e A.2 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.

### III) Tensões Residuais

A Figura 5.4 ilustra os perfis de tensões longitudinais ( $\sigma_x$ ) 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 5.1. 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.

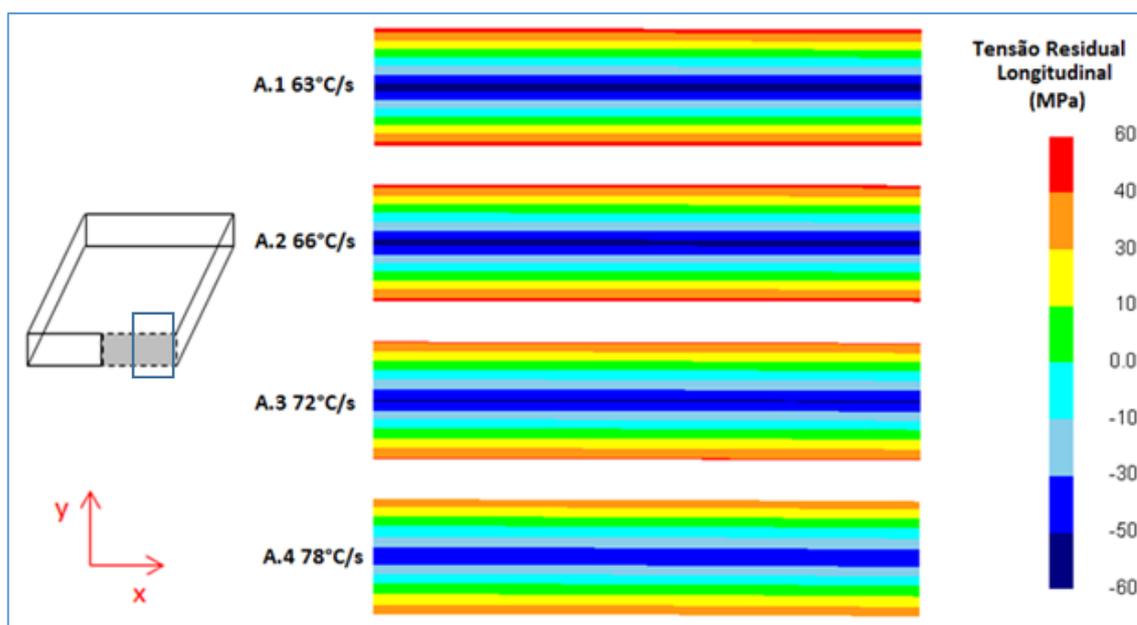
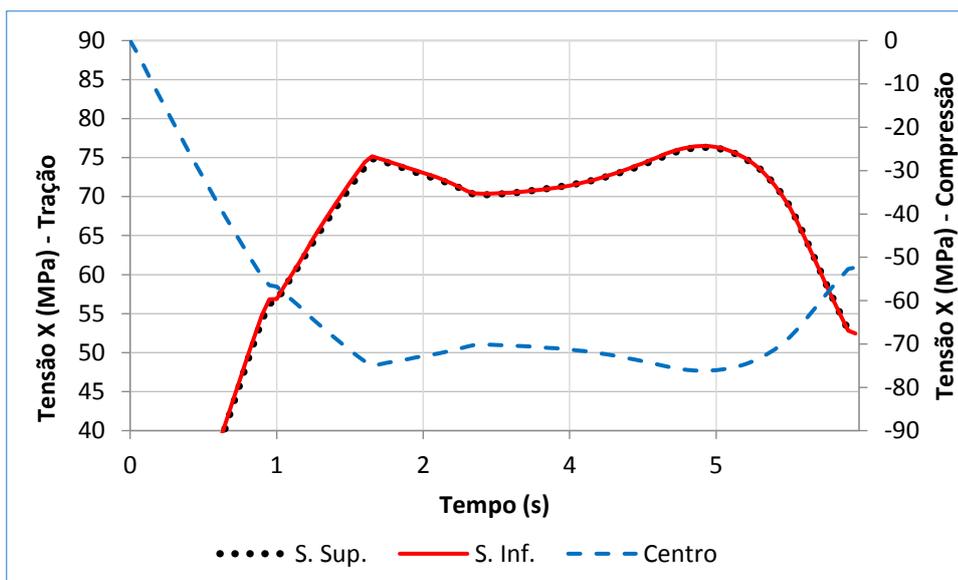


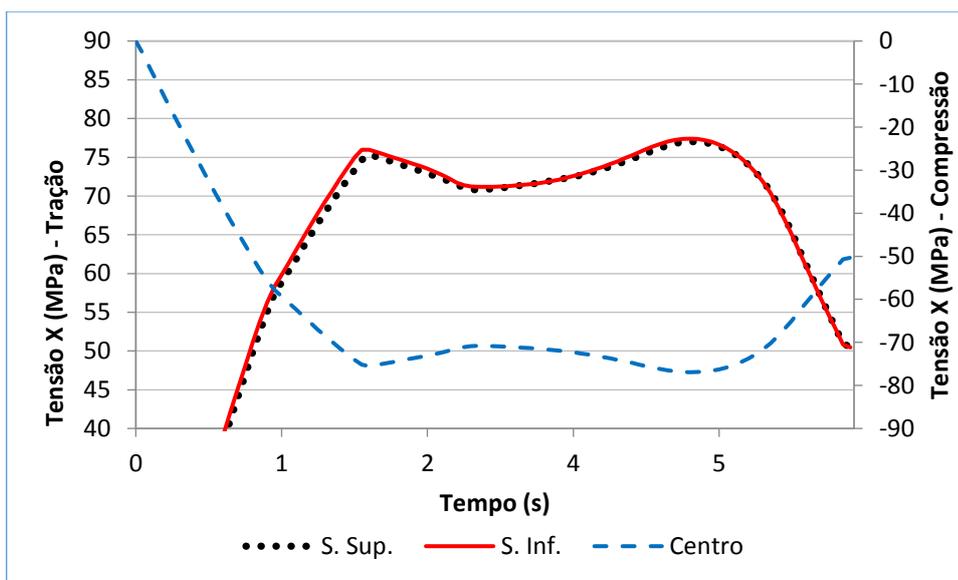
Figura 5.4 - Perfis de tensão residual longitudinal ( $\sigma_x$ ) no plano XY para diferentes taxas de resfriamento na superfície inferior – Caso A. *A figura está colorida no texto original.*

A Figura 5.5 mostra a evolução das tensões ( $\sigma_x$ ) durante o resfriamento para cada taxa de resfriamento. A Figura 5.5 (a) mostra a evolução da tensão residual para a simulação A.1, a Figura 5.5 (b) mostra a evolução da tensão residual para a simulação A.2, a Figura 5.5 (c) mostra a evolução da tensão residual para a simulação A.3 e a Figura 5.5 (d) mostra a evolução da tensão residual para a simulação A.4.

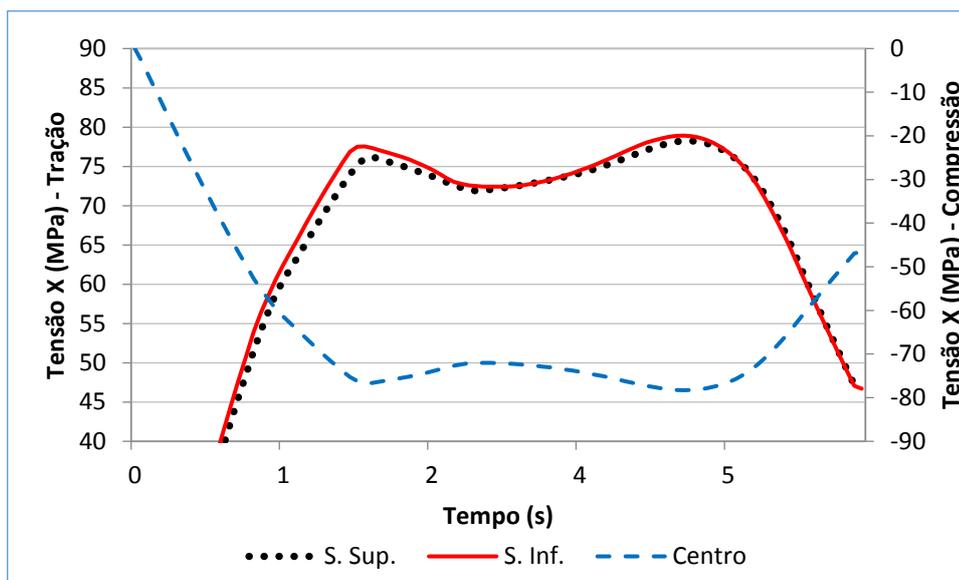
Observam-se diferenças entre as tensões de tração da superfície inferior e da superior que crescem quando se aumenta a taxa de resfriamento. Mesmo a altas temperaturas, pode-se afirmar que não ocorrem deformações plásticas na chapa em nenhuma das quatro condições. As tensões alcançadas durante o resfriamento, que inicia com temperatura igual a 850°C, não ultrapassam 85 MPa.



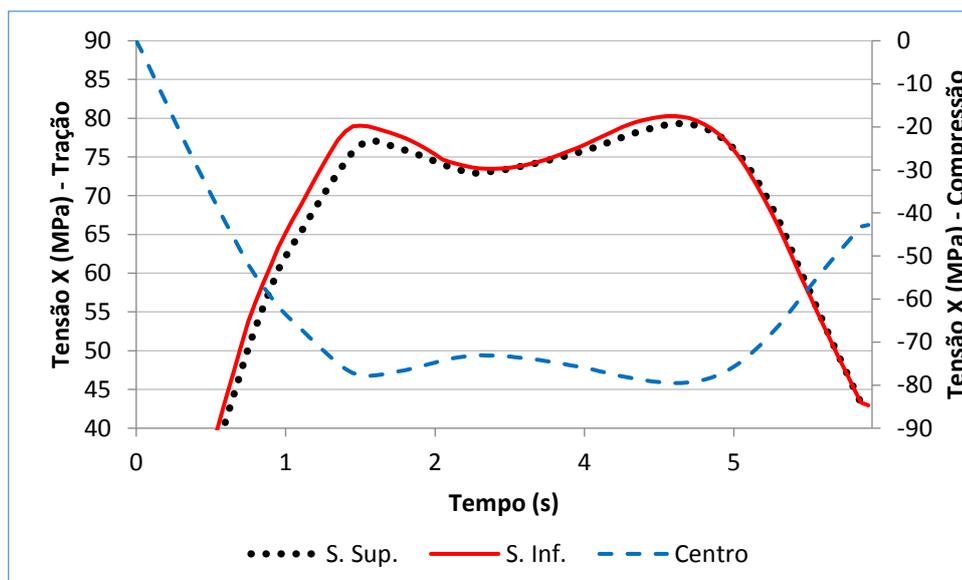
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.5 – Evolução da tensão longitudinal residual ( $\sigma_x$ ) durante o resfriamento para as simulações A.1 (a), A.2 (b), A.3 (c) e A.4 (d).

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 induzido pela transferência de calor do centro para as superfícies.

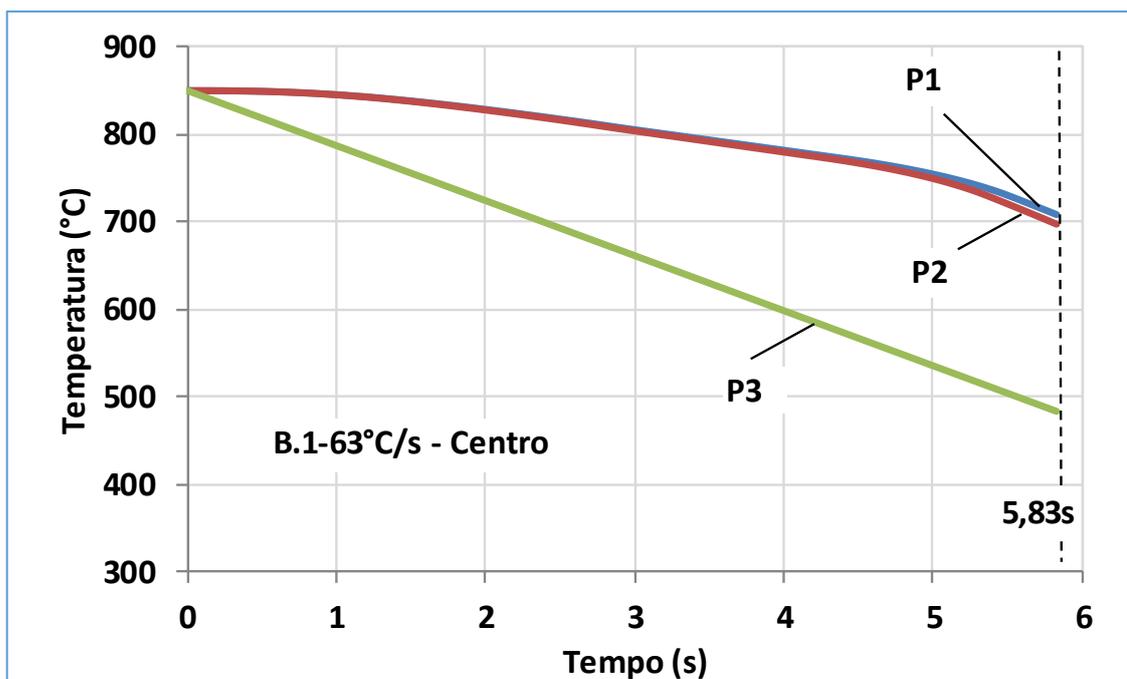
## **5.2. Caso B - Resfriamento não Homogêneo entre a Borda Lateral e o Meio Chapa**

### **I) Evolução da temperatura durante o resfriamento**

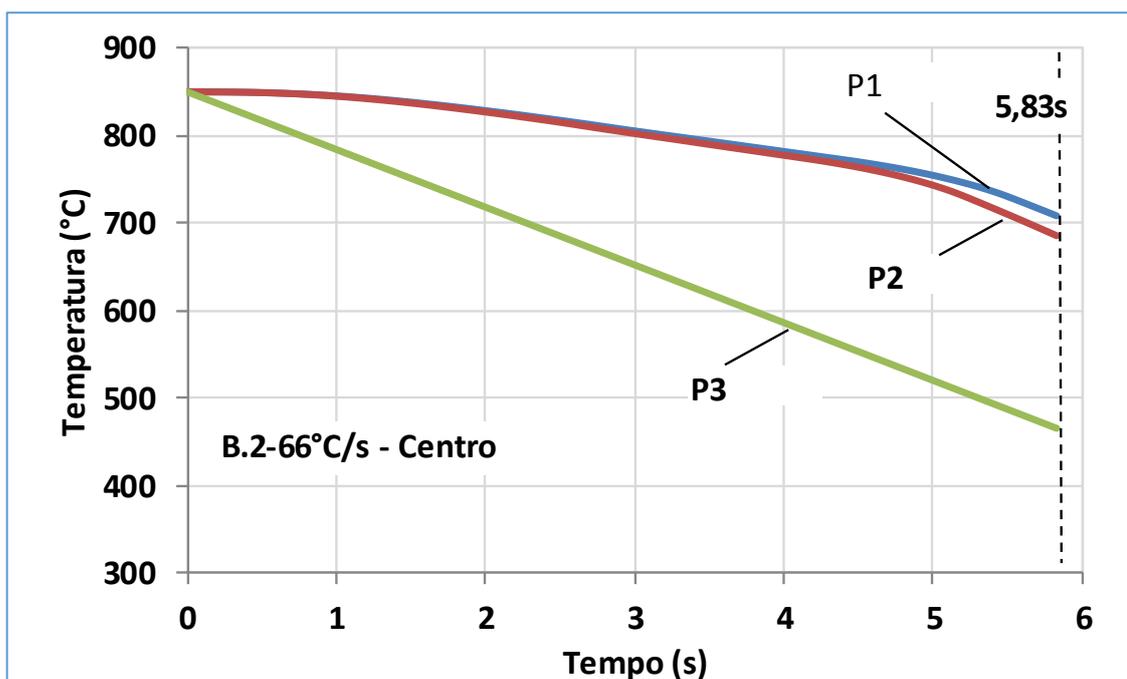
Os gráficos da Figura 5.6 mostram a evolução da temperatura no centro da chapa para as quatro simulações. A Figura 5.6 (a) mostra a evolução da temperatura para a simulação B.1, a Figura 5.6 (b) mostra a evolução da temperatura para a simulação B.2, a Figura 5.6 (c) mostra a evolução da temperatura para a simulação B.3 e a Figura 5.6 (d) mostra a evolução da temperatura para a simulação B.4. Foram escolhidos três pontos ao longo da largura da chapa que estão representados na Figura 5.7. Os pontos 1, 2, e 3, representam respectivamente, o meio da chapa, 1.100mm e 1.245mm de distância do meio da chapa em direção à borda lateral. O ponto 2 representa o ponto a partir do qual ocorreu a mudança na taxa de resfriamento e o ponto 3 representa a extremidade da chapa.

Nas curvas referentes ao ponto 3 observaram-se alterações nas inclinações acompanhando a variação da taxa de resfriamento. Quanto maior a taxa de resfriamento maior a inclinação da curva. As curvas referentes ao ponto 1 se mantiveram constantes nas quatro simulações uma vez que a taxa de resfriamento utilizada foi a mesma. As curvas referentes ao ponto 2, informam que o incremento na taxa de resfriamento aumenta a velocidade de resfriamento neste ponto. Este aumento

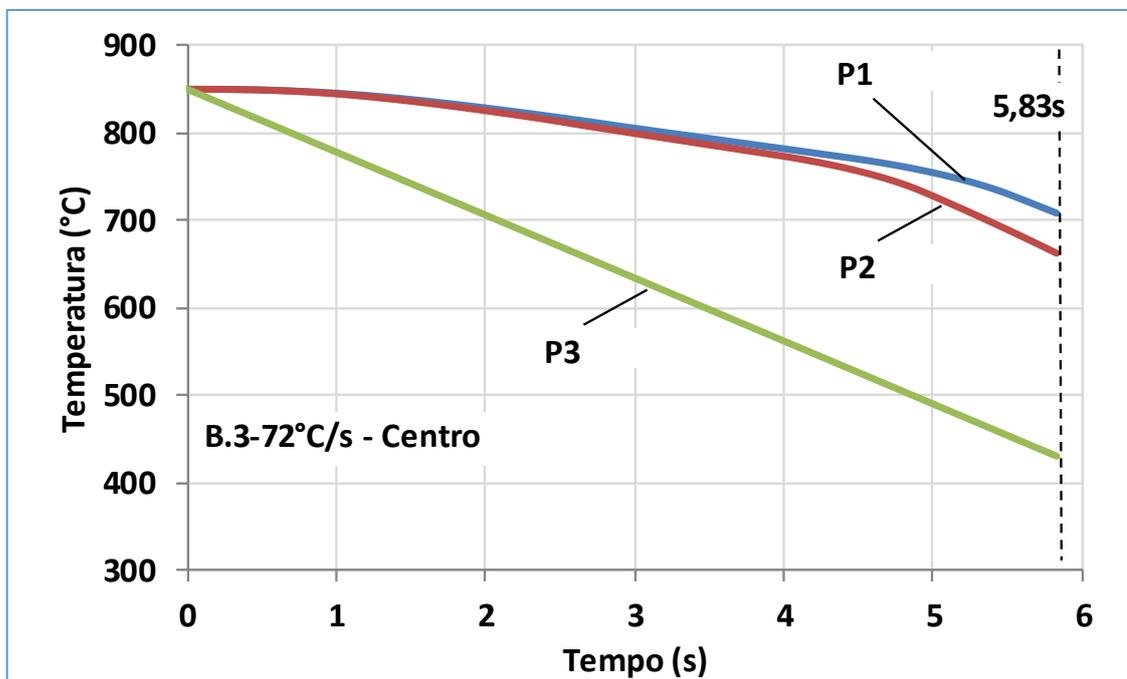
faz com que o centro na região da borda resfrie mais rapidamente do que nas regiões mais distantes da borda. Além disso, percebe-se que o resfriamento se tornou levemente mais rápido após aproximadamente 4,5 segundos de resfriamento que pode ser observado pelo aumento na inclinação das curvas.



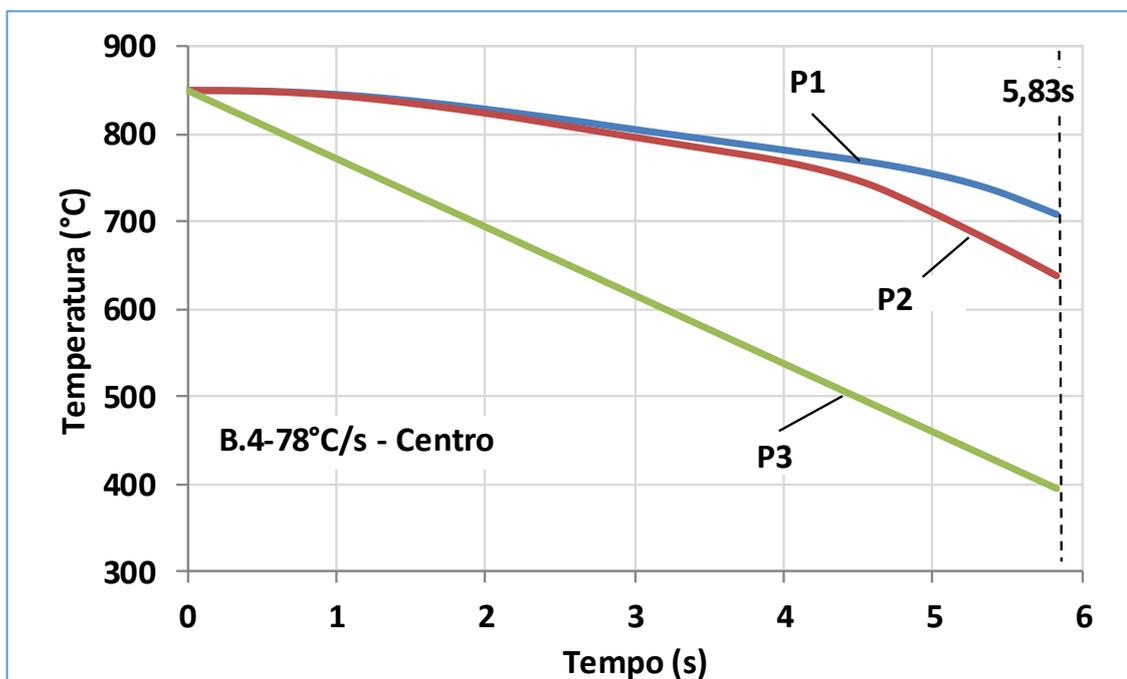
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.6 - Evolução da temperatura no centro da chapa durante o resfriamento para as simulações B.1 (a), B.2 (b), B.3 (c) e B.4 (d).

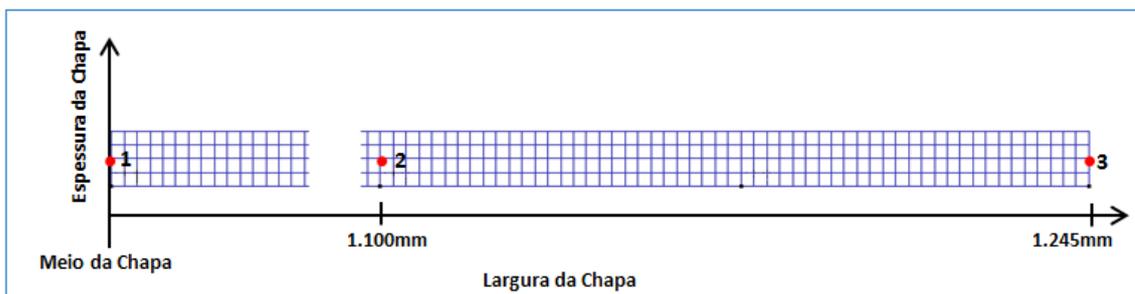


Figura 5.7 – Nós utilizados para obtenção das curvas de resfriamento – Caso B.

Ao final do resfriamento, ocorrido após 5,83 segundos, os gradientes de temperatura entre o meio e a borda da chapa foram 225°C para a simulação B.1, 243°C para a simulação B.2, 278°C para a simulação B.3 e 313°C para a simulação B.4. A variação nas taxas de resfriamento na borda influenciou a curva de resfriamento do centro da chapa nesta região. As temperaturas finais de resfriamento em cada ponto são encontradas na Tabela V.2.

Tabela V.2 - Temperaturas finais de resfriamento no centro da chapa

SIMULAÇÃO	TEMPERATURA FINAL DE RESFRIAMENTO (°C)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
<b>B.1 - 63°C/s</b>	708	697	483
<b>B.2 - 66°C/s</b>	708	685	465
<b>B.3 - 72°C/s</b>	708	662	430
<b>B.4 - 78°C/s</b>	708	638	395

Foram avaliadas também a evolução das temperaturas na superfície da chapa, da mesma forma que no centro foram obtidas as temperaturas finais de resfriamento em três pontos, conforme mostrado na Figura 5.8. A evolução das temperaturas nestes três pontos mostrou comportamento linear condizente com as taxas de resfriamento utilizadas no meio e na borda. O comportamento das curvas de resfriamento nos pontos 2 e 3 assim como as temperaturas finais foram exatamente os mesmos. As temperaturas finais para cada simulação nos três pontos estão mostradas na Tabela V.3. Quanto maior a taxa de resfriamento utilizada, menor foi temperatura final.

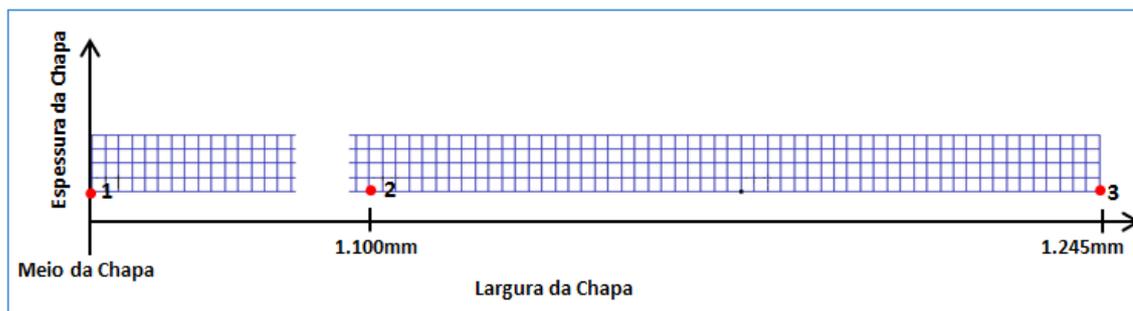


Figura 5.8 – Nós utilizados para obtenção das curvas de resfriamento e temperaturas finais na superfície da chapa – Caso B.

Tabela V.3 - Temperaturas finais de resfriamento na superfície da chapa

SIMULAÇÃO	TEMPERATURA FINAL DE RESFRIAMENTO (°C)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
<b>B.1-63°C/s</b>	500	483	483
<b>B.2-66°C/s</b>	500	465	465
<b>B.3-72°C/s</b>	500	430	430
<b>B.4-78°C/s</b>	500	395	395

## II) Distorção

A Figura 5.9 mostra o perfil de distorção apresentado pelas chapas, para cada condição de resfriamento. As curvas correspondem ao conjunto de nós presentes na superfície inferior da chapa conforme indicado na Figura 5.3 pela linha pontilhada (os mesmos utilizados para avaliação da distorção no caso A). Foi avaliado o deslocamento destes nós em relação à direção X, correspondente à largura da chapa, após o resfriamento. O deslocamento em relação à direção Y foi praticamente nulo. As curvas indicam que as diferenças de distorção entre as quatro simulações são observadas somente na borda a partir da posição que está próxima a 1.100mm de distância do meio da chapa. Nota-se que a distorção da chapa na borda aumenta quando a taxa de resfriamento nesta região cresce. A distorção na direção X está relacionada com a contração da chapa quando esta é resfriada, tornando-se ligeiramente menor em relação às dimensões da chapa antes do resfriamento. Nestas simulações observa-se que esta contração se encontra concentrada nas bordas que

foi a região resfriada mais rapidamente. A contração na direção X foi de aproximadamente 5mm.

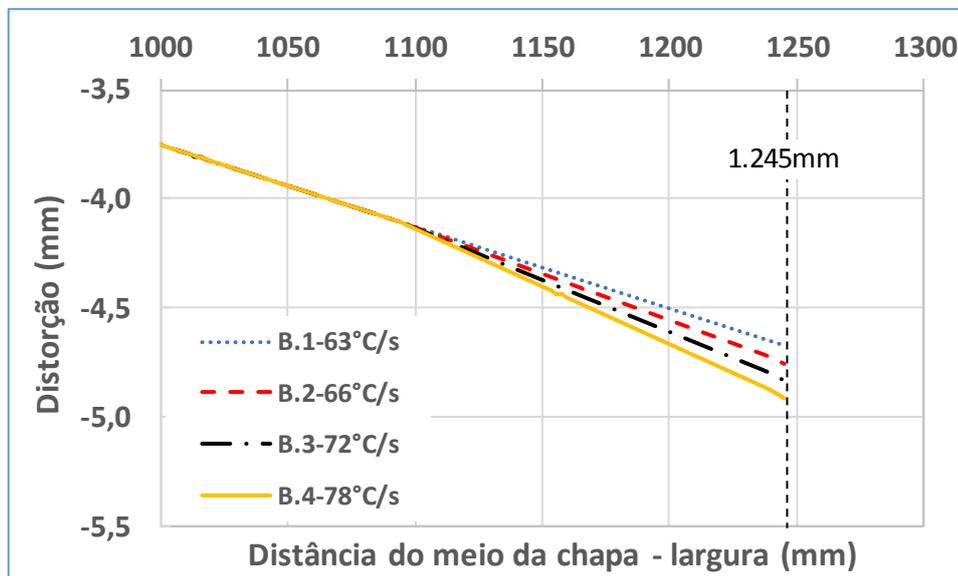


Figura 5.9 – Perfis de distorção na direção X para diferentes taxas de resfriamento - Caso B.

Não houve distorção significativa que comprometesse a planicidade da chapa ao final do resfriamento para as simulações realizadas no Caso B.

### III) Tensões Residuais

A Figura 5.10 mostra os perfis de tensões longitudinais ( $\sigma_x$ ) no plano XY para cada condição de resfriamento. Nota-se que ao final do resfriamento as bordas apresentam um perfil de tensões parecido ao perfil observado no meio da chapa com tensões de tração nas superfícies e compressão no centro. Os motivos são os mesmos já discutidos no caso anterior. No entanto, verifica-se uma pequena diferença na magnitude entre as tensões apresentadas na borda e no meio da chapa. A diferença pode ser percebida a partir do ponto equivalente a 1.100mm de distância do meio da chapa. Além disso, percebe-se que as tensões finais presentes nas chapas com maiores taxas de resfriamento são menores em grandeza do que nas chapas resfriadas com menores taxas de resfriamento.

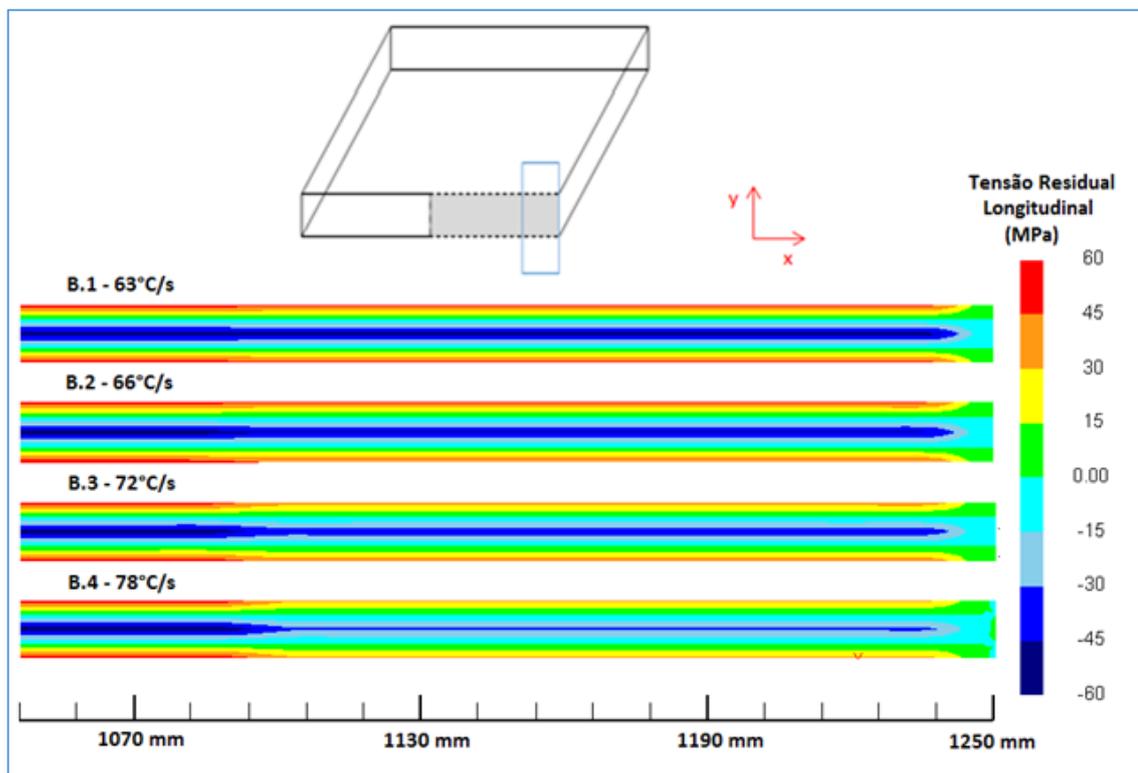
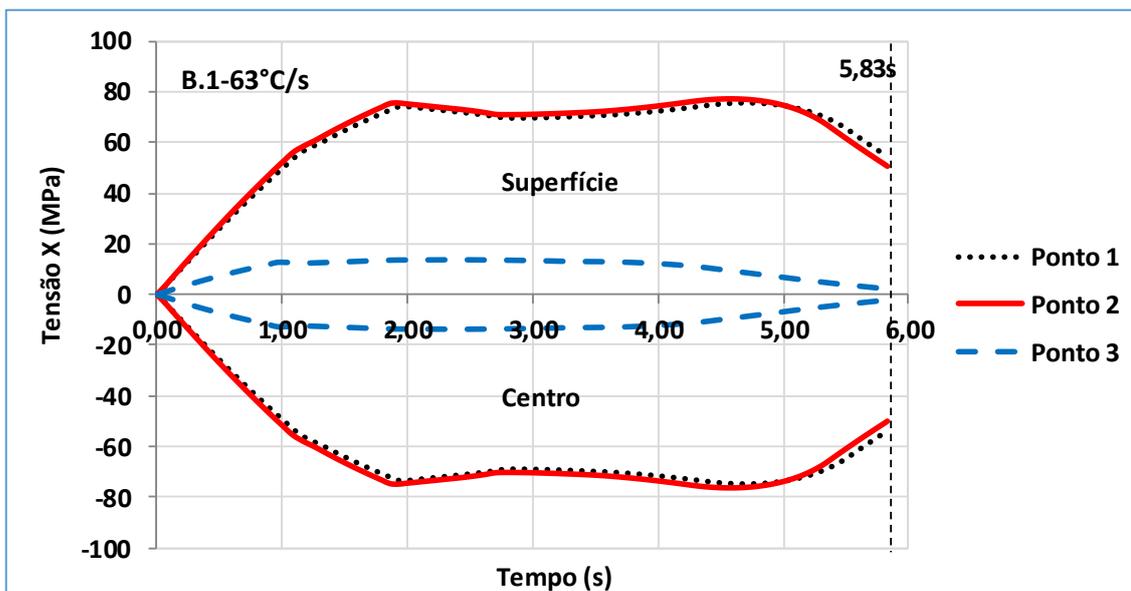
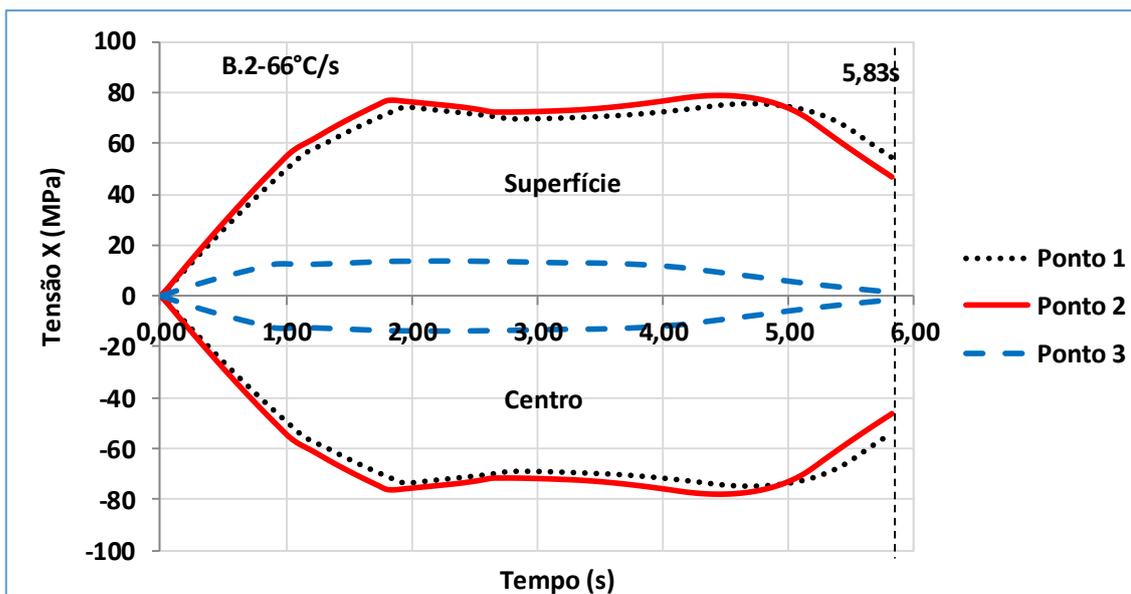


Figura 5.10 – Perfis de tensão longitudinal residual ( $\sigma_x$ ) no plano XY para diferentes taxas de resfriamento na borda – Caso B. *A figura está colorida no texto original.*

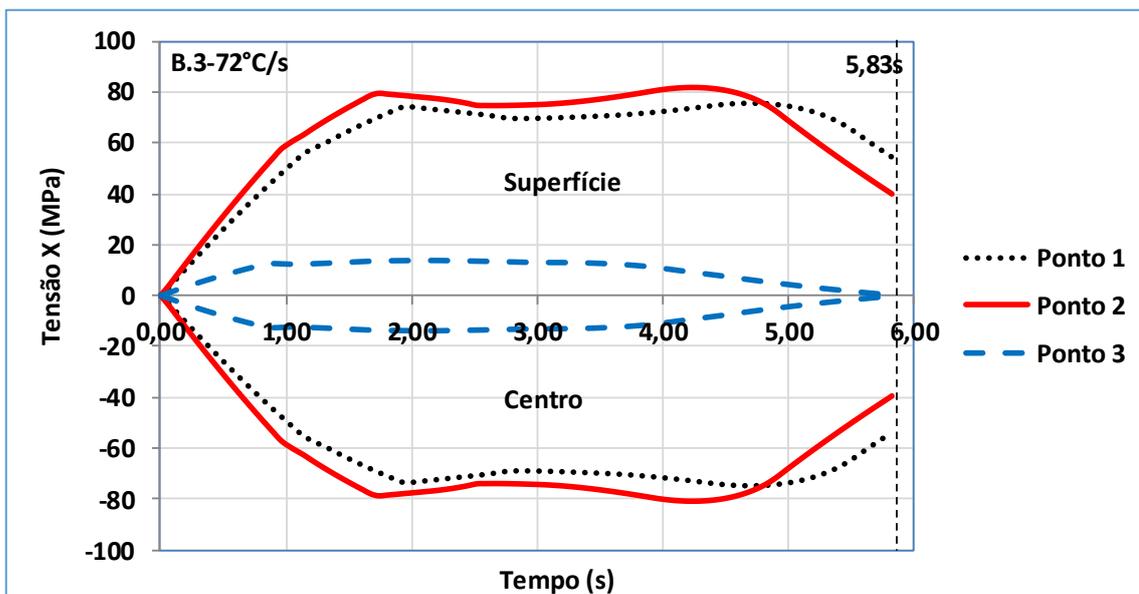
A Figura 5.11 mostra a evolução das tensões ( $\sigma_x$ ) durante o resfriamento para cada taxa de resfriamento. A Figura 5.11 (a) mostra a evolução da tensão residual para a simulação B.1, a Figura 5.11 (b) mostra a evolução da tensão residual para a simulação B.2, a Figura 5.11 (c) mostra a evolução a evolução da tensão residual para a simulação B.3 e a Figura 5.11 (d) mostra a evolução da tensão residual para a simulação B.4. São mostrados os comportamentos das tensões em três posições: meio, borda e extremidade da chapa na superfície e no centro da chapa. As três posições são representadas pelos nós mostrados na Figura 5.12.



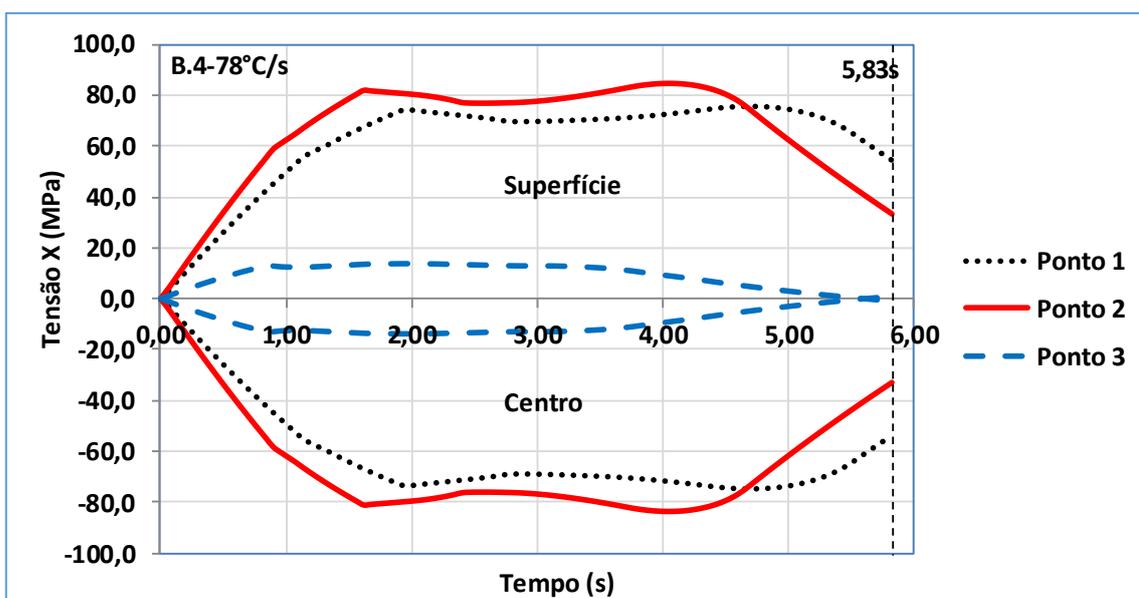
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.11 - Evolução da tensão longitudinal residual ( $\sigma_x$ ) durante o resfriamento as simulações B.1 (a), B.2 (b), B.3 (c) e B.4 (d).

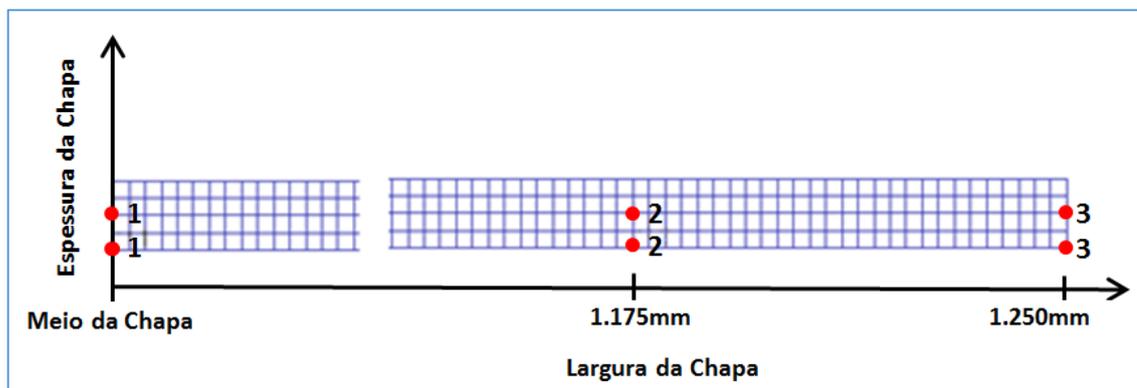


Figura 5.12 - Nós utilizados para avaliação da evolução das tensões residuais – Caso B.

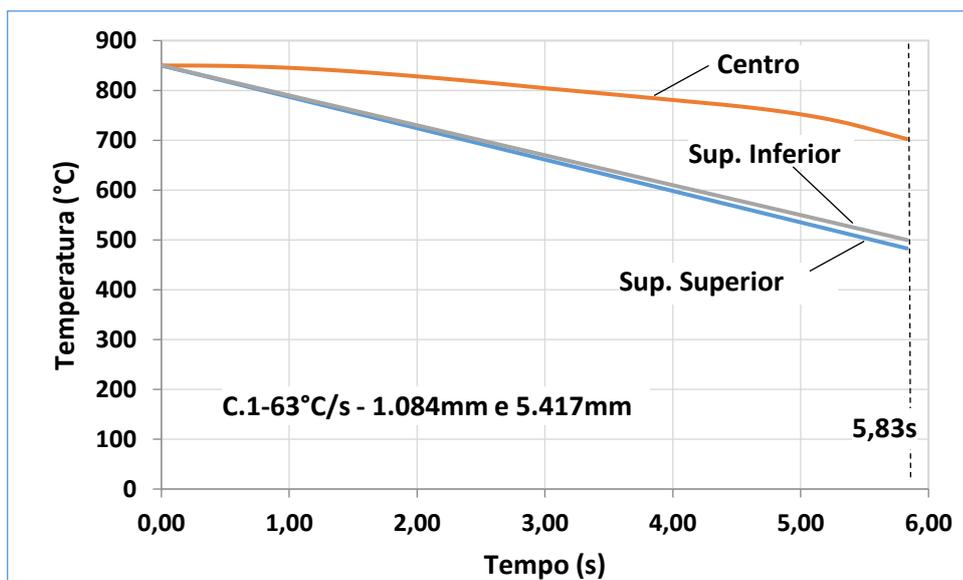
Tanto na superfície quanto no centro da chapa notam-se diferenças na evolução das tensões referentes a cada ponto analisado. As tensões presentes no meio da chapa (Ponto 1) não variaram de uma simulação para outra, pois a taxa de resfriamento utilizada foi a mesma nas quatro simulações. No entanto, houve um aumento da tensão residual nesta região. As tensões presentes na borda (Ponto 2) mostrou que o comportamento da tensão residual é influenciado pelo aumento da taxa de resfriamento, aumentando cada vez mais para taxas de resfriamento maiores. As magnitudes das tensões de tração e de compressão observadas na superfície e no centro, respectivamente apresentaram-se sempre maiores do que as do meio da chapa (Ponto 1), exceto a partir do tempo aproximado de 4,5 segundos. A partir deste momento, as tensões diminuem gradativamente e ao final do resfriamento são menores do que as tensões presentes no meio. A causa desta mudança no comportamento da curva possivelmente está relacionada ao aumento do gradiente de temperatura entre as superfícies e o centro no térmico do processo. Com a interrupção do resfriamento, o centro começa a transferir calor para as superfícies e faz com que as tensões sejam aliviadas. As tensões presentes na extremidade da chapa (Ponto 3) permanecem fixas com o aumento das taxas de resfriamento até o tempo próximo a 4,5 segundos. A partir de então, as tensões apresentam o comportamento compatível com um provável processo de alívio de tensões que fica cada vez mais intenso com o aumento da taxa de resfriamento.

Da mesma forma como observado no Caso A, não ocorrem deformações plásticas na chapa em nenhuma das quatro simulações. As tensões alcançadas durante o resfriamento, que se inicia com temperatura igual a 850°C, não ultrapassam 90 MPa.

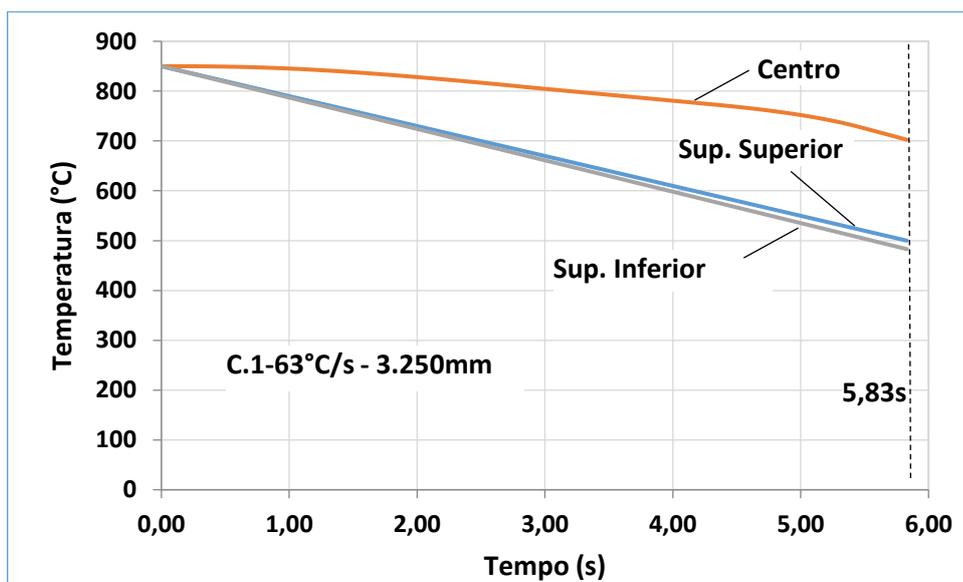
### **5.3. Caso C - Resfriamento não Homogêneo entre Superfícies Alternadas ao longo da largura**

#### **I) Evolução da temperatura durante o resfriamento**

Os gráficos das Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 mostram a evolução da temperatura durante o resfriamento para as quatro simulações. As Figuras 5.13 (a) e (b) mostram a evolução das temperaturas para a simulação C.1, as Figuras 5.14 (a) e (b) mostram a evolução das temperaturas para a simulação C.2, as Figuras 5.15 (a) e (b) mostram a evolução das temperaturas para a simulação C.3 e as Figuras 5.16 (a) e (b) mostram a evolução das temperaturas para a simulação C.4. Foram escolhidas três posições distribuídas ao longo do comprimento chapa, definidas com o objetivo de avaliar o comportamento do resfriamento nas três regiões que tiveram variações nas taxas de resfriamento pré-definidas para a simulação. A primeira posição refere-se ao ponto equivalente a 1.084 mm de distância do meio da chapa na direção do comprimento. Nesta região da chapa, a superfície superior foi resfriada mais rapidamente do que a inferior. A segunda posição refere-se ao ponto equivalente a 3.250 mm de distância do meio onde a superfície inferior foi resfriada mais rápido do que a superior. Finalmente, a terceira posição refere-se ao ponto equivalente a 5.517 mm de distância do meio onde a condição de resfriamento foi igual a da região da primeira posição. Para cada uma das três posições descritas acima foram obtidas as curvas de resfriamento para o centro e para as superfícies superior e inferior. Os nós que representam cada uma das curvas de resfriamento são mostrados na Figura 5.17.

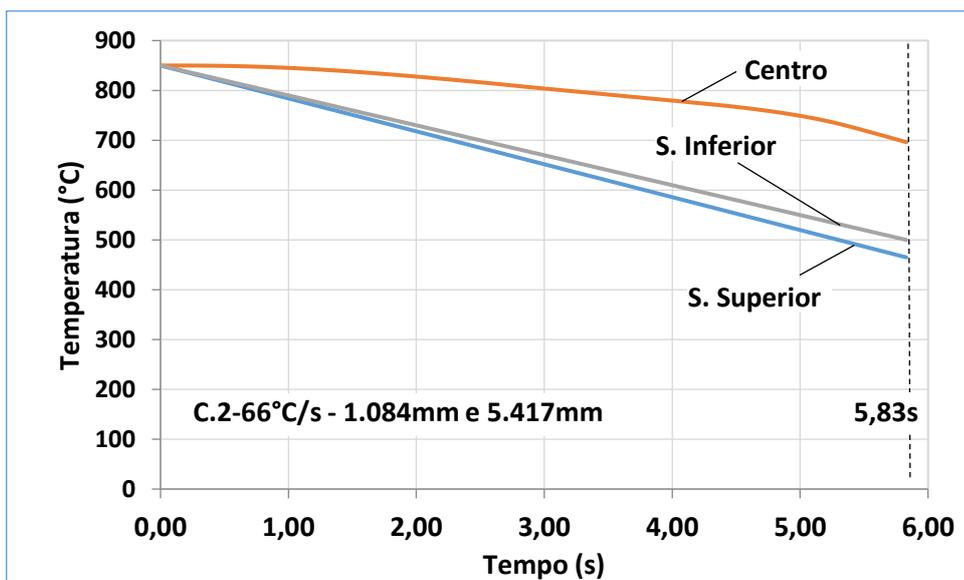


(a)

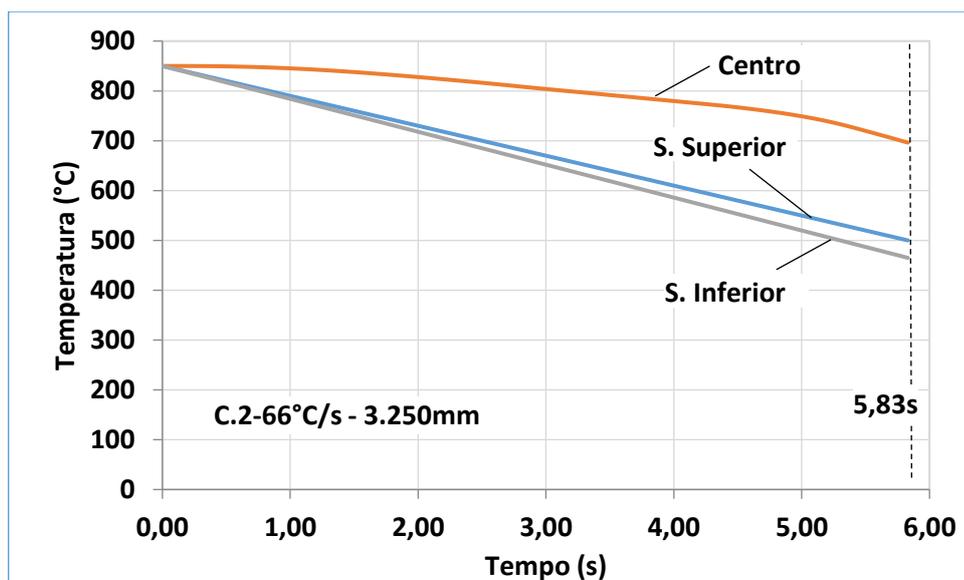


(b)

Figure 5.13 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.1.

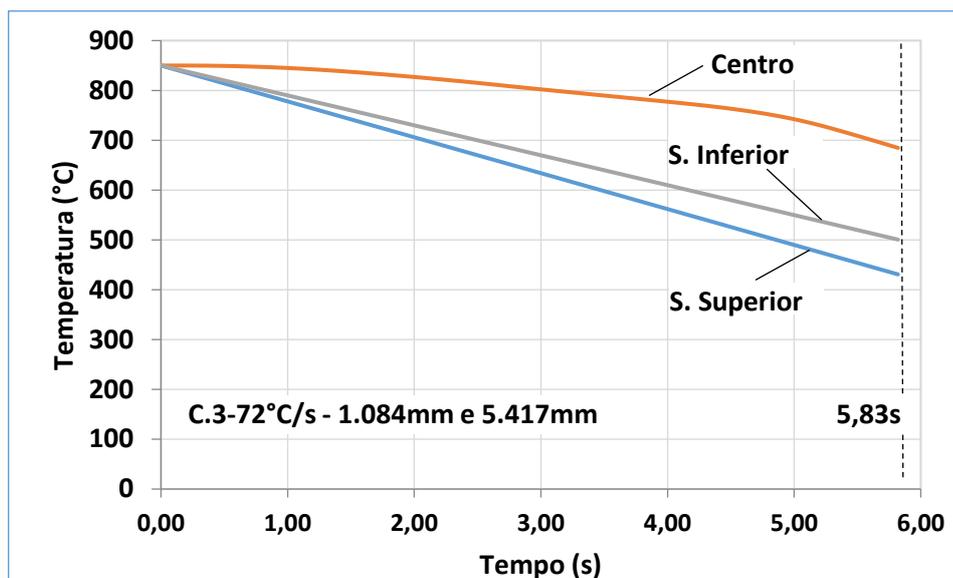


(a)

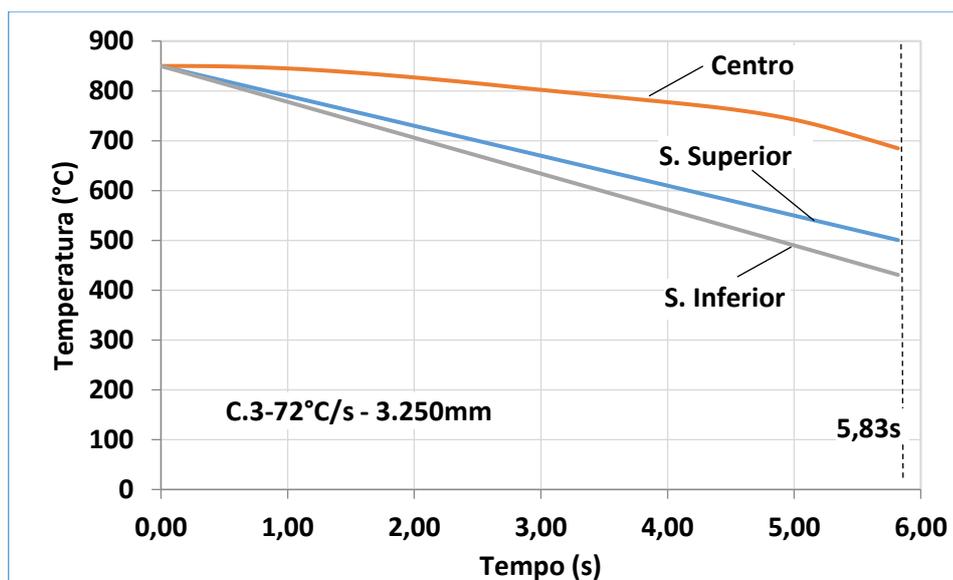


(b)

Figure 5.14 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.2.

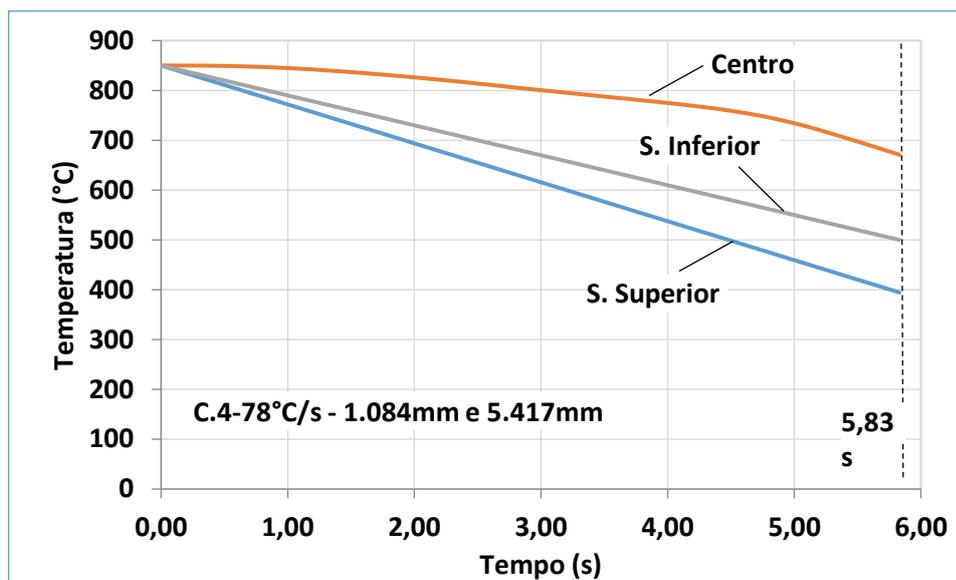


(a)

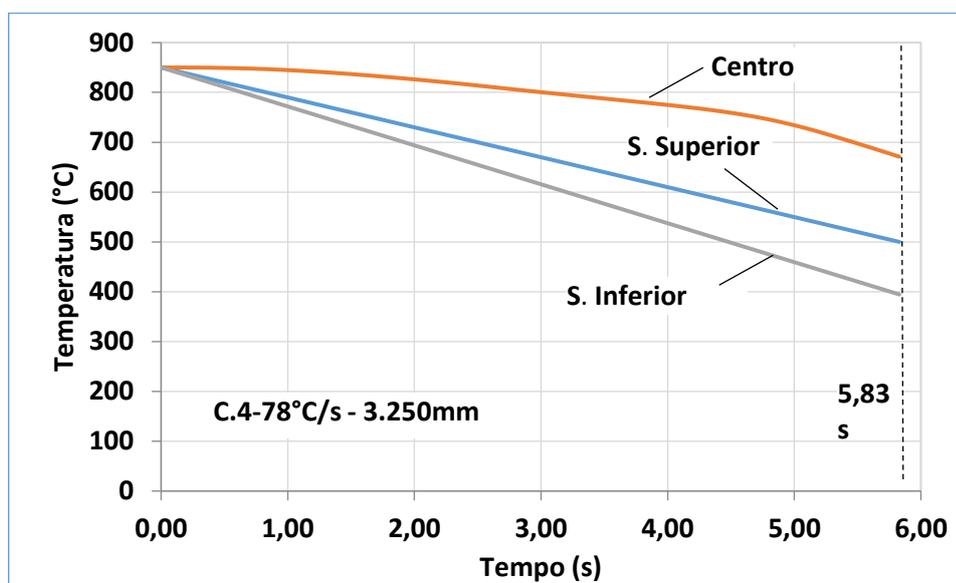


(b)

Figure 5.15 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.3.



(a)



(b)

Figura 5.16 - Evolução da temperatura no centro e nas superfícies inferior e superior da chapa em três posições ao longo do comprimento 1.084 e 5.417mm (a) e 3.250mm (b) durante o resfriamento para a simulação C.4.

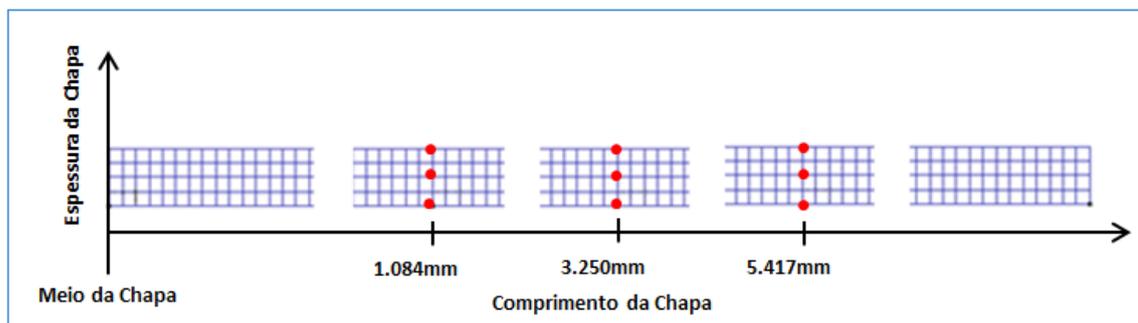
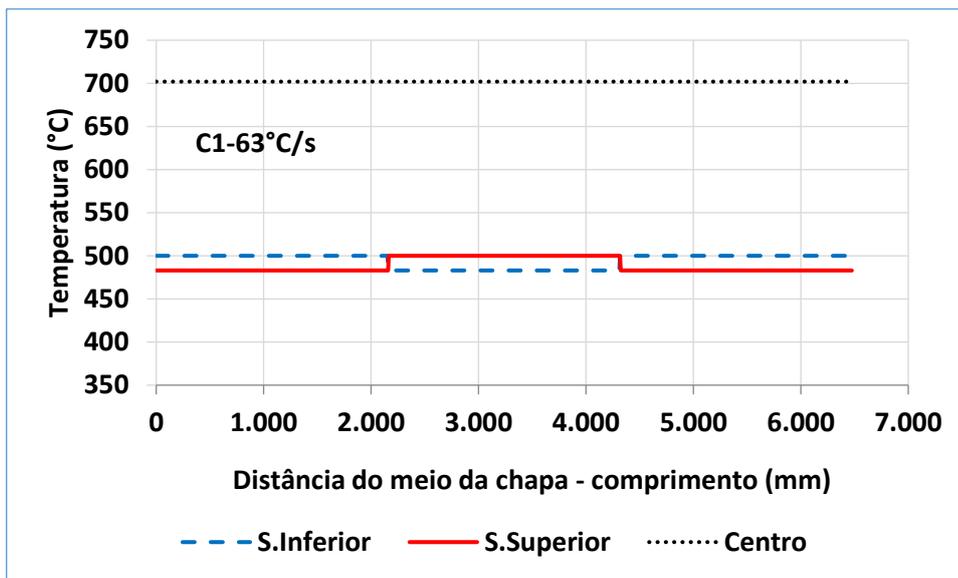


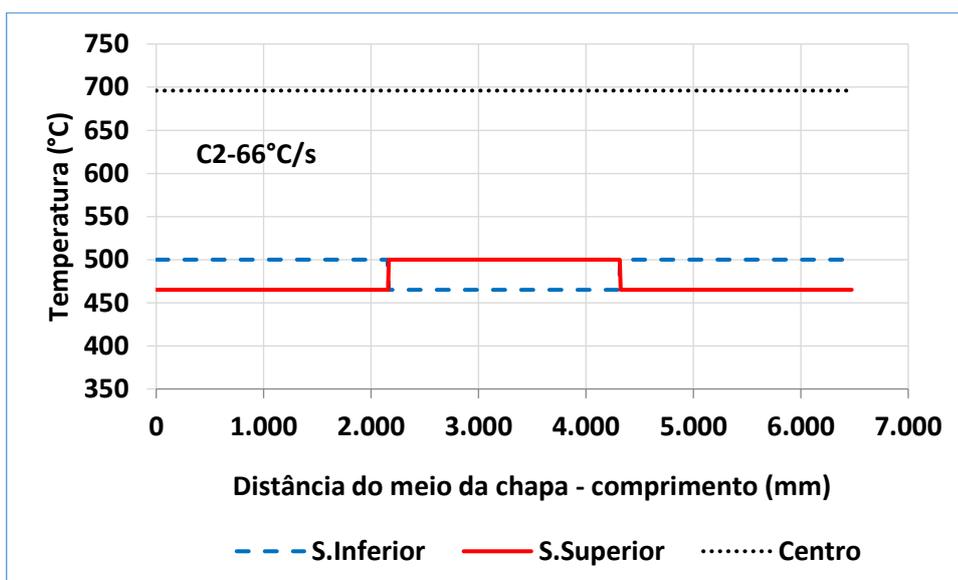
Figura 5.17 - Nós utilizados para avaliação da evolução do resfriamento – Caso C.

As curvas apresentadas confirmam que nas posições equivalentes a 1.084mm e 5.417mm a superfície superior resfriou-se mais rapidamente do que a superfície inferior. De forma inversa, na posição 3.250mm a superfície inferior resfriou-se mais rapidamente do que a superior. O resfriamento do centro não se altera em relação a posição medida, mas se torna ligeiramente mais rápido em função do aumento da taxa de resfriamento, sendo observada pouca influência da não-homogeneidade sobre a evolução do resfriamento no centro da chapa.

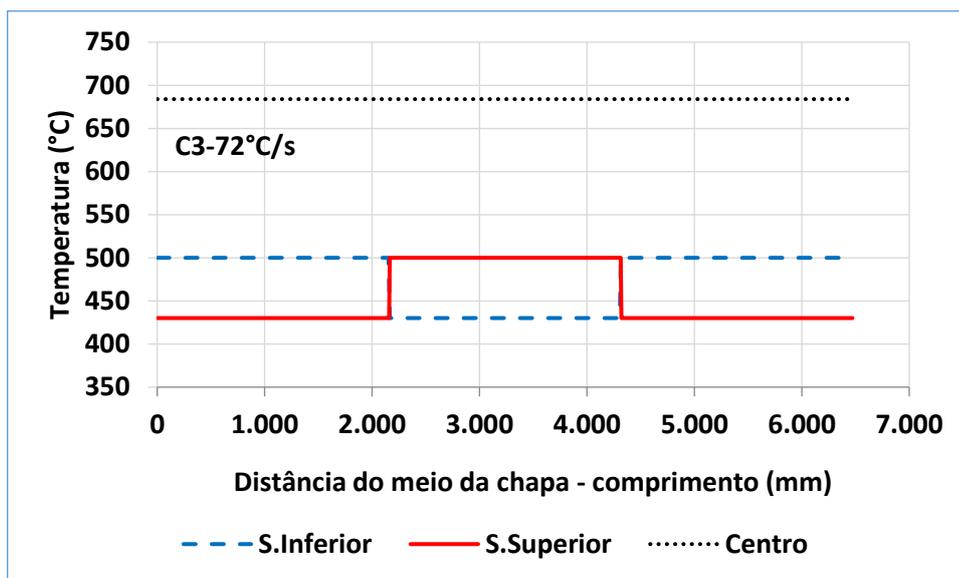
Os perfis finais de temperaturas ao longo de todo o comprimento, em ambas as superfícies e no centro da chapa para cada simulação, estão representados nos gráficos da Figura 5.18. A Figura 5.18 (a) mostra o perfil de temperaturas para a simulação C.1, a Figura 5.18 (b) mostra o perfil de temperaturas para a simulação C.2, a Figura 5.18 (c) mostra o perfil de temperaturas para a simulação C.3 e a Figura 5.18 (d) mostra o perfil de temperaturas para a simulação C.4. O conjunto de nós utilizados para avaliação dos perfis de temperatura nas superfícies inferior e superior estão representados pela linha pontilhada na Figura 5.19.



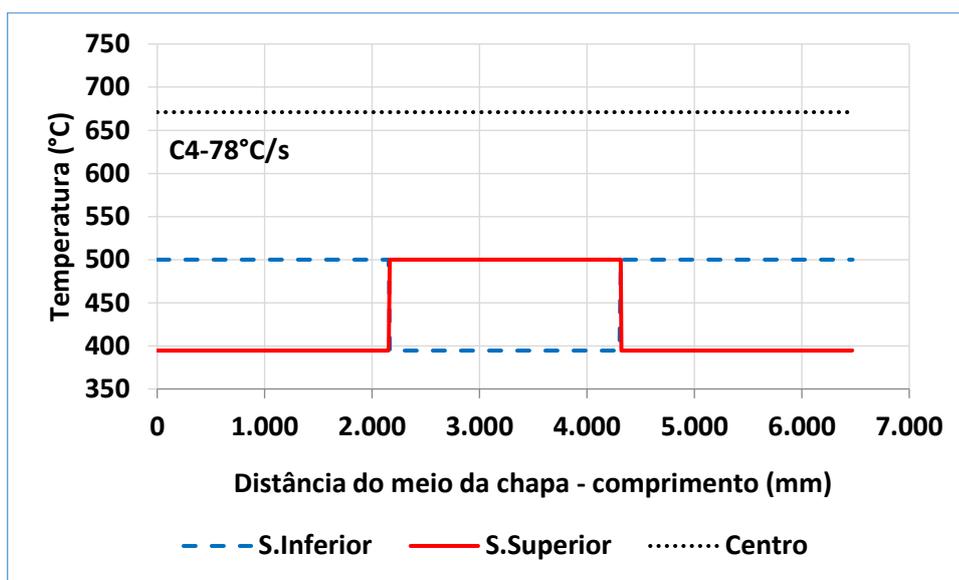
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.18 – Perfis de temperaturas ao longo do comprimento no centro e nas superfícies superior e inferior da chapa ao final do resfriamento para as simulações C.1 (a), C.2 (b), C.3 (c) e C.4 (d).

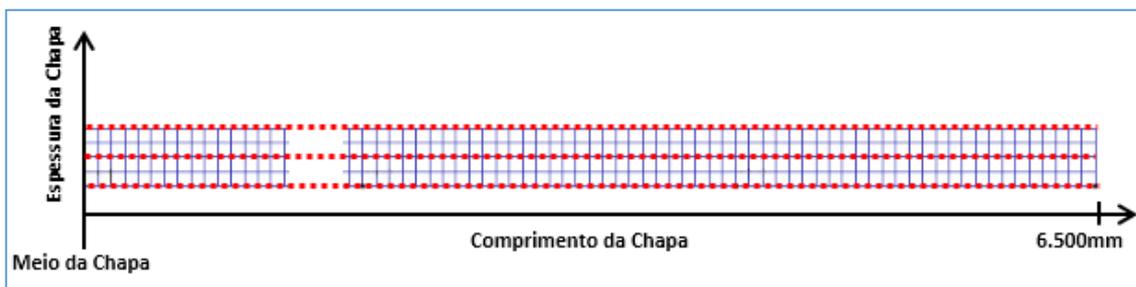


Figure 5.19 - Conjunto de nós utilizados para avaliação dos perfis de temperatura e de tensão no centro e nas superfícies inferior e superior – Caso C.

Nota-se que a temperatura do centro para cada simulação é constante ao longo de todo o comprimento, porém se torna menor com o aumento da taxa de resfriamento. Além disso, pode-se verificar o aumento no gradiente de temperatura entre as superfícies à medida que a taxa de resfriamento aumenta. As temperaturas finais nas superfícies resfriadas com maior taxa são cada vez menores à medida que a taxa de resfriamento é aumentada.

## II) Distorção

A Figura 5.20 mostra o perfil de distorção apresentado pelas chapas, para as quatro simulações propostas. Foi avaliado o deslocamento dos nós na direção Y, representados pela linha pontilhada na Figura 5.21, em relação à posição antes do resfriamento acelerado. Identifica-se na figura apresentada, que a distorção se altera com a variação da taxa de resfriamento, destacando-se as maiores taxas de resfriamento cujas chapas apresentaram maior distorção. Observa-se significativa distorção em todas as chapas chegando a 994 mm de deslocamento na extremidade da chapa para a simulação C.4, realizada com a maior taxa de resfriamento. Além da ponta alta, observa-se também a ondulação da chapa com amplitudes cada vez maiores com o aumento da taxa de resfriamento.

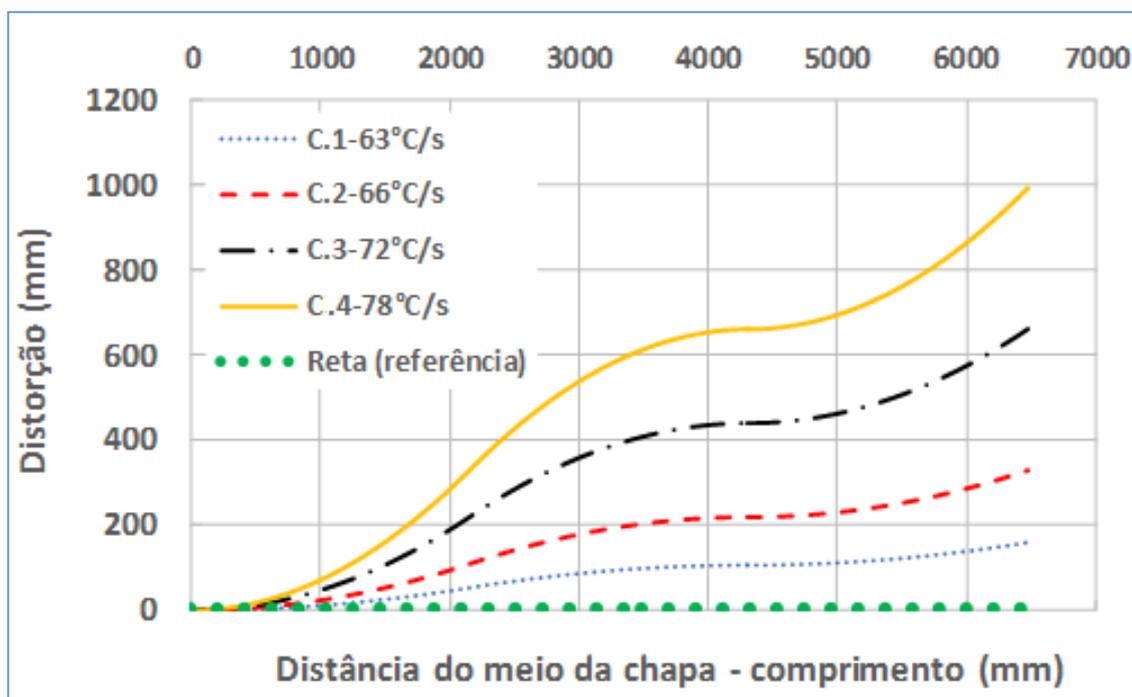


Figura 5.20 - Perfis de distorção para diferentes taxas de resfriamento – Caso C.

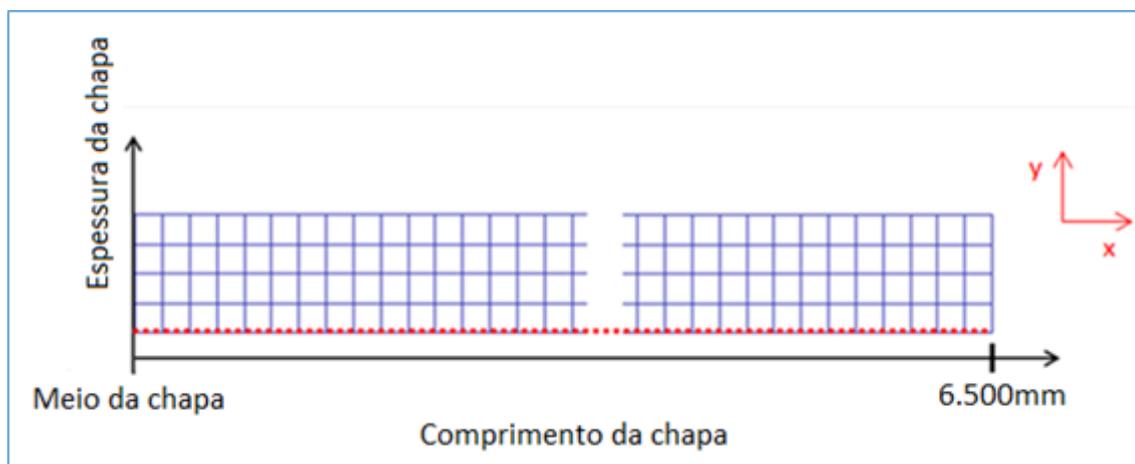


Figura 5.21 - Nós utilizados para avaliação da distorção – Caso C.

A ondulação da chapa se deve ao resfriamento não homogêneo que se distribui em faixas transversais alternadas ao longo do comprimento. A ponta alta é resultado de um resfriamento mais rápido na superfície superior do que na superfície inferior. Esta análise considera a média das taxas de resfriamento em ambas as superfícies. Deste modo, a superfície superior possui dois segmentos de superfície com curvatura para cima e um com curvatura para baixo.

A Figura 5.22 destaca as distorções das chapas em uma visualização em 3-D.

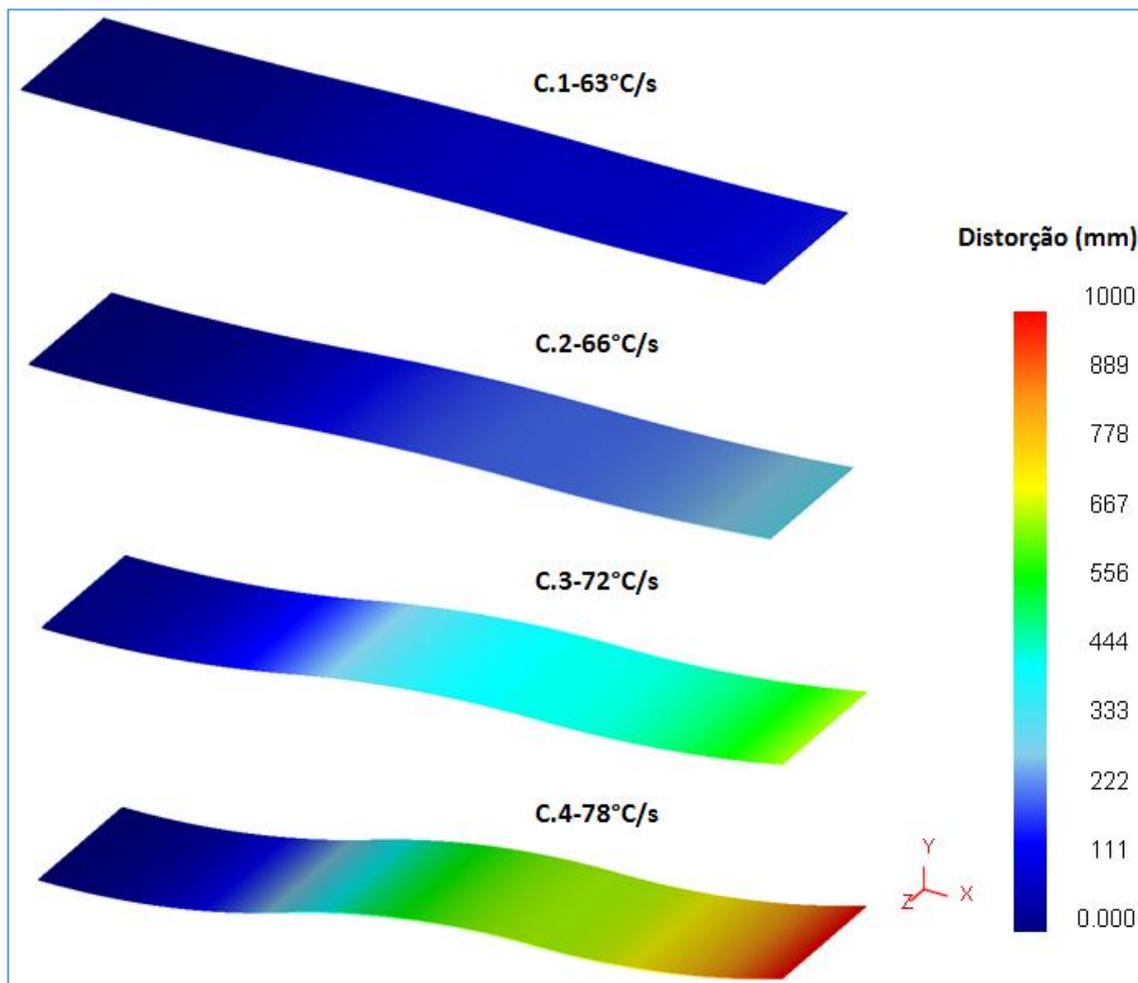


Figura 5.22 - Perfis de distorção em 3D para as quatro simulações – Caso C. *A figura está colorida no texto original.*

Utilizando a norma europeia DIN EN 10029 como referência para medição e avaliação dos resultados de planicidade têm-se os seguintes valores conforme informado na Tabela V.4.

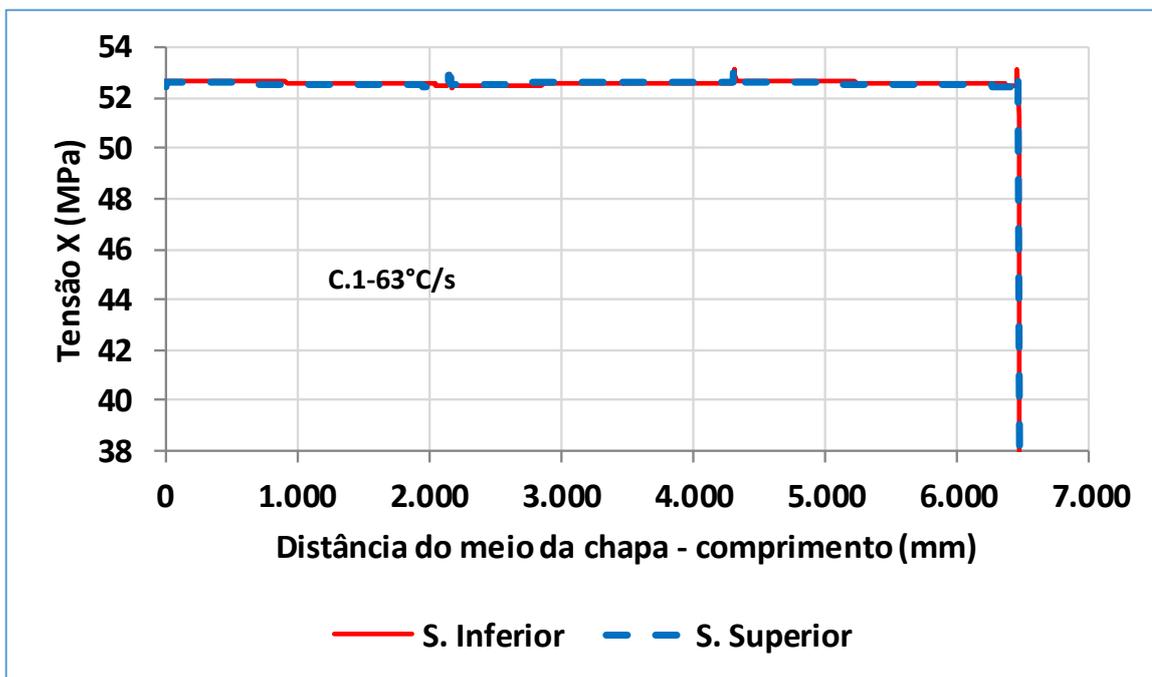
Tabela V.4 - Resultados de planicidade do Caso C – Referência: Norma DIN EN 10029.

REFERÊNCIA	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES		
<b>Norma DIN EN 10029</b>	<b>Simulação</b>	<b>Padrão de 1.000 mm</b>	<b>Padrão de 2.000 mm</b>
<b>Classe N</b>			
<b>(8 ≤ espessura &lt; 15)</b>	C.1 - 63°C/s	38 mm	53 mm
<b>Padrão de 1.000 mm</b>			
<b>Máximo = 7 mm</b>	C.2 - 66°C/s	78 mm	110 mm
<b>Padrão de 2.000 mm</b>			
<b>Máximo = 11 mm</b>	C.3 - 72°C/s	157 mm	220 mm
	C.4 - 78°C/s	236 mm	331 mm

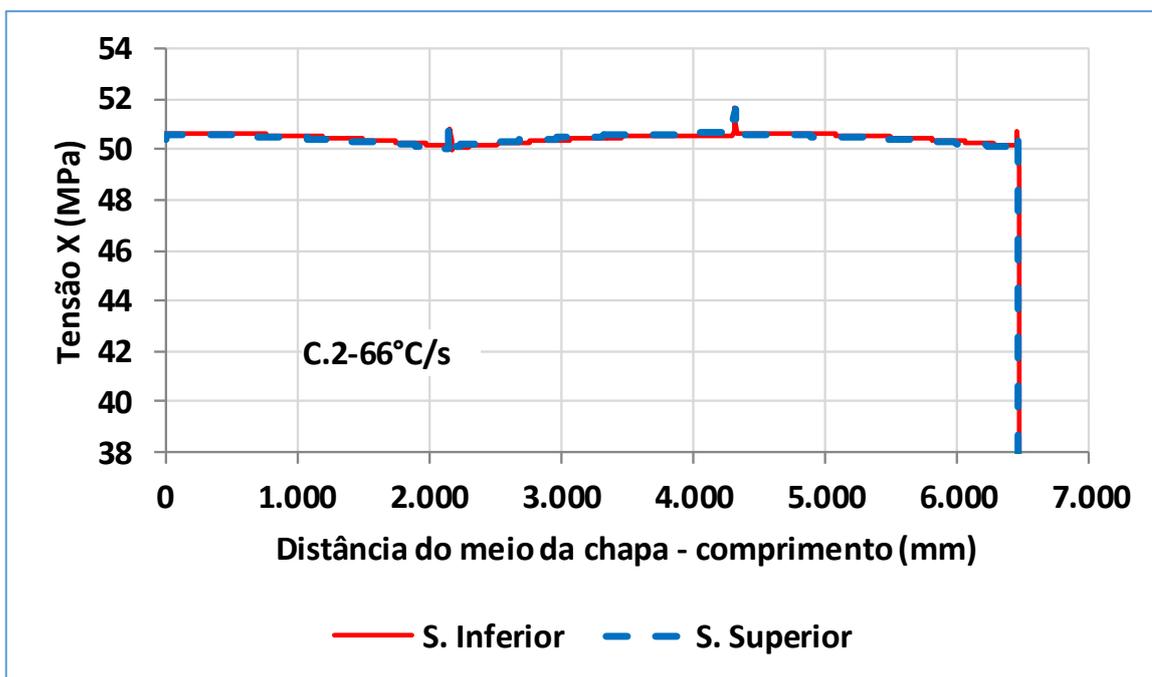
Os resultados foram avaliados utilizando os critérios para as régua de referência de 1.000 e 2.000mm de comprimento. As quatro simulações realizadas no Caso C apresentaram valores muito acima dos valores de referência e, portanto, reprovadas pela Norma citada. Pelos mesmos motivos mencionados na avaliação dos resultados de planicidade no Caso A, os valores obtidos referem-se somente a etapa de resfriamento acelerado simulado sob as condições definidas neste estudo.

### III) Tensão Residual

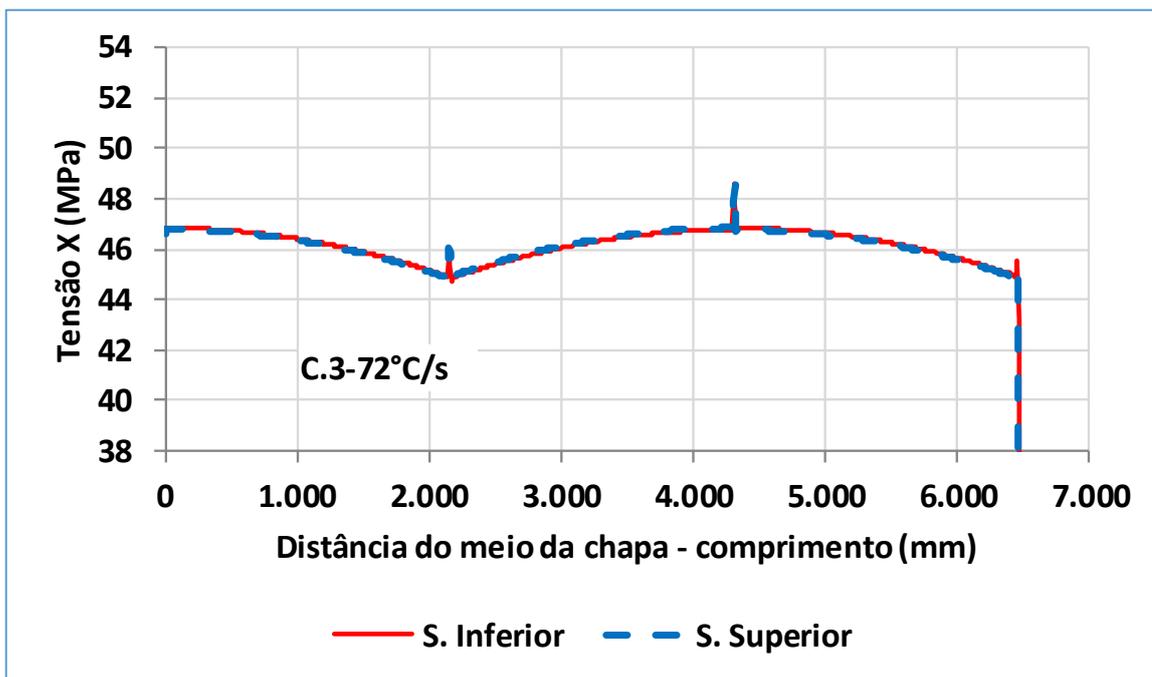
Os gráficos da Figura 5.23 destacam os perfis de tensões residuais longitudinais, ao final do processo, nas superfícies superior e inferior das chapas ao longo de todo o comprimento para cada simulação. A Figura 5.23 (a) mostra os perfis de tensões residuais para a simulação C.1, a Figura 5.23 (b) mostra os perfis de tensões residuais para a simulação C.2, a Figura 5.23 (c) mostra os perfis de tensões residuais para a simulação C.3 e a Figura 5.23 (d) mostra os perfis de tensões residuais para a simulação C.4. O conjunto de nós utilizados para avaliação dos perfis de tensões residuais nas superfícies inferior e superior foi o mesmo usado para avaliar o perfil de temperaturas e está representado na Figura 5.19 com exceção da linha do centro.



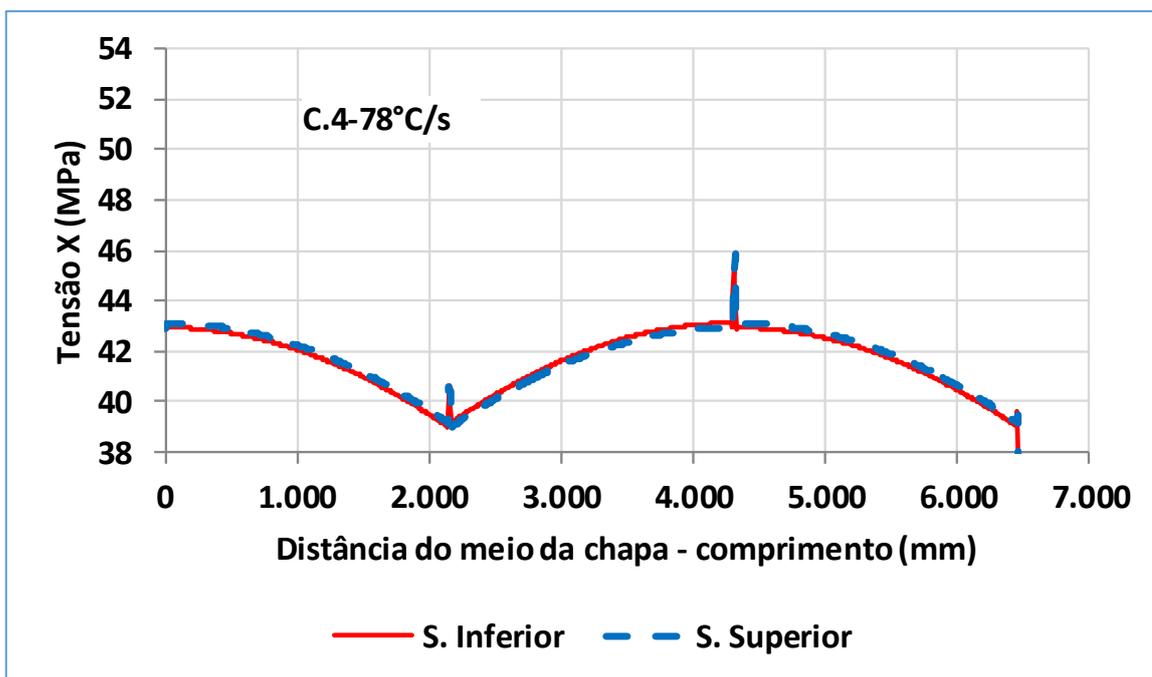
(a)



(b)



(c)

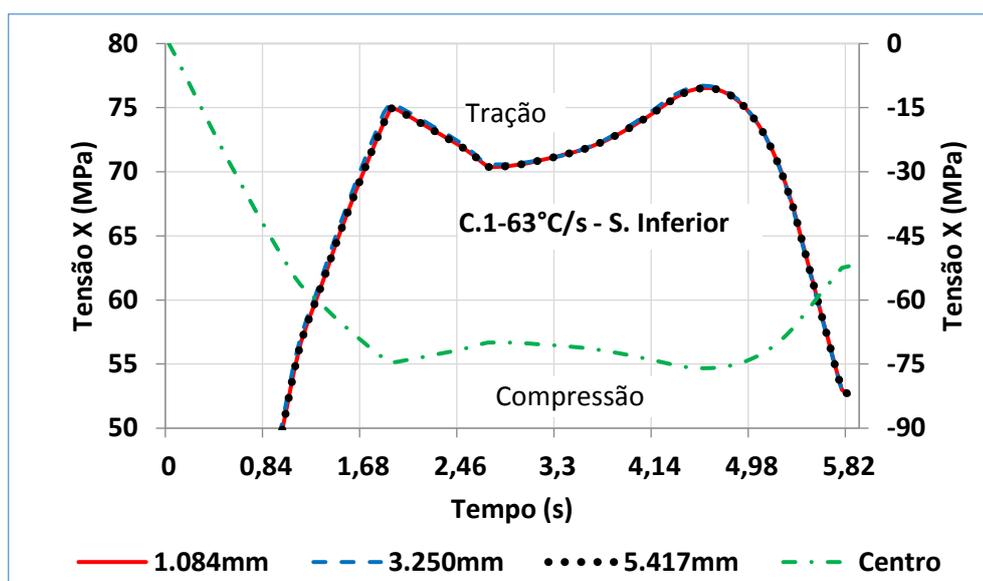


(d)

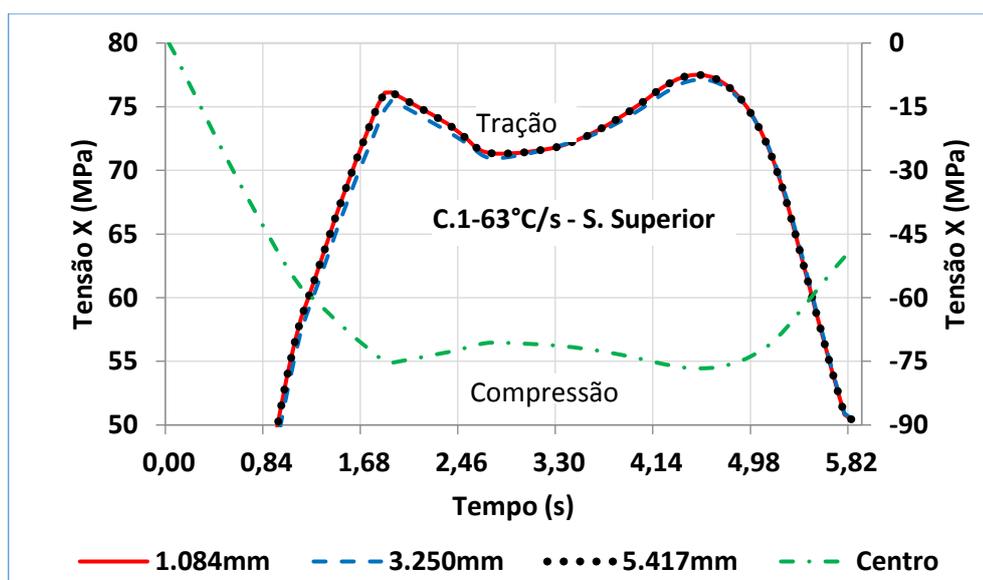
Figura 5.23 - Perfis de tensão residual longitudinal ao longo do comprimento da chapa nas superfícies inferior e superior para as simulações C.1 (a), C.2 (b), C.3 (c) e C.4 (d) - Caso C.

Os perfis apresentados mostram que o aumento na taxa de resfriamento altera o perfil de tensões nas superfícies após o resfriamento. Comparando os perfis de tensões nas superfícies inferior e superior percebe-se o mesmo comportamento em cada simulação. Verifica-se que os valores das tensões diminuem quando se aumenta a taxa de resfriamento. Adicionalmente, percebe-se que nos casos em que as taxas foram maiores houve uma variação de tensão ao longo do comprimento, evidenciado pelas curvas em formato de parábolas. Destaca-se a mudança de comportamento das curvas nas posições que delimitam as diferentes taxas de resfriamento demonstrando a influência do resfriamento não homogêneo no perfil de tensões residuais.

Os gráficos das Figuras 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 mostram a evolução das tensões residuais durante o resfriamento para as quatro simulações. As Figuras 5.24 (a) e (b) mostram a evolução das tensões residuais para a simulação C.1, as Figuras 5.25 (a) e (b) mostram a evolução das tensões residuais para a simulação C.2, as Figuras 5.26 (a) e (b) mostram a evolução das tensões residuais para a simulação C.3 e as Figuras 5.27 (a) e (b) mostram a evolução das tensões residuais para a simulação C.4. Os nós utilizados para obtenção destas curvas foram os mesmos utilizados para a avaliação da evolução das temperaturas e estão representados na Figura 5.17.

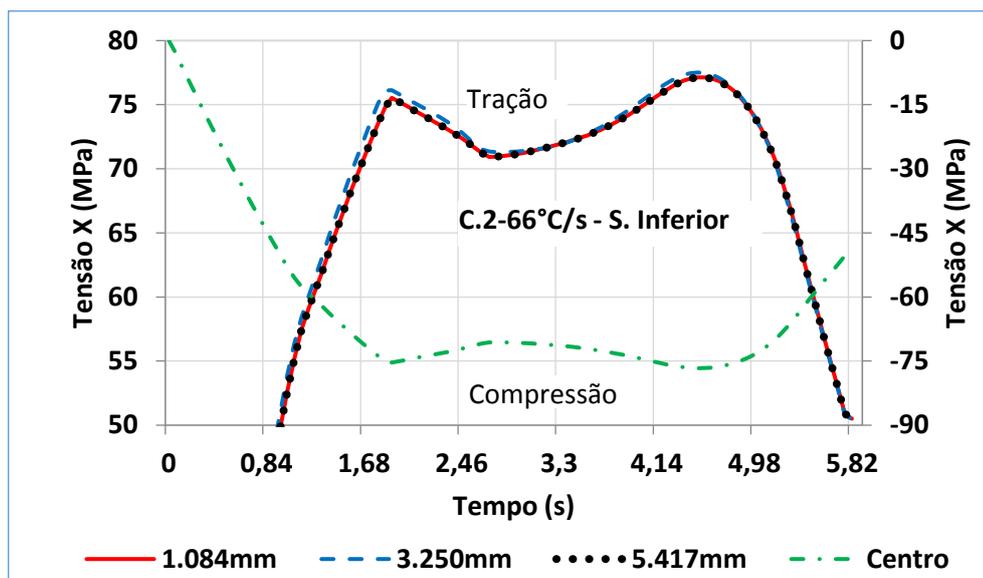


(a)

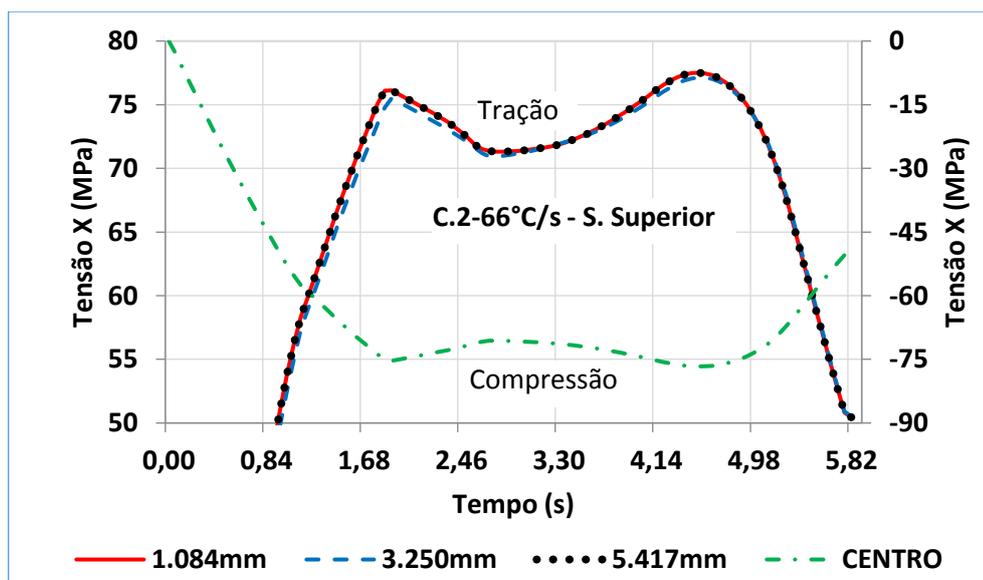


(b)

Figure 5.24 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.1 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C.

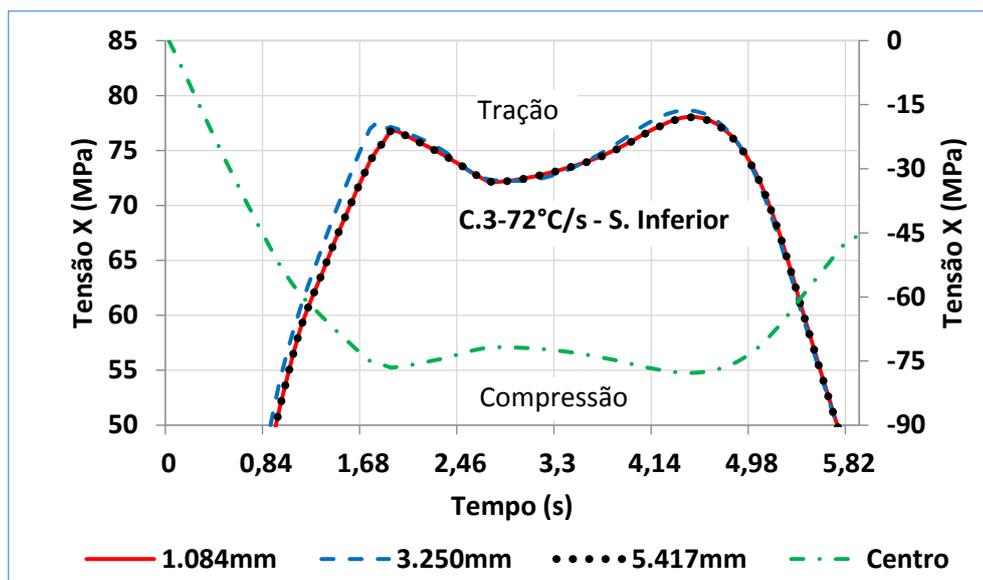


(a)

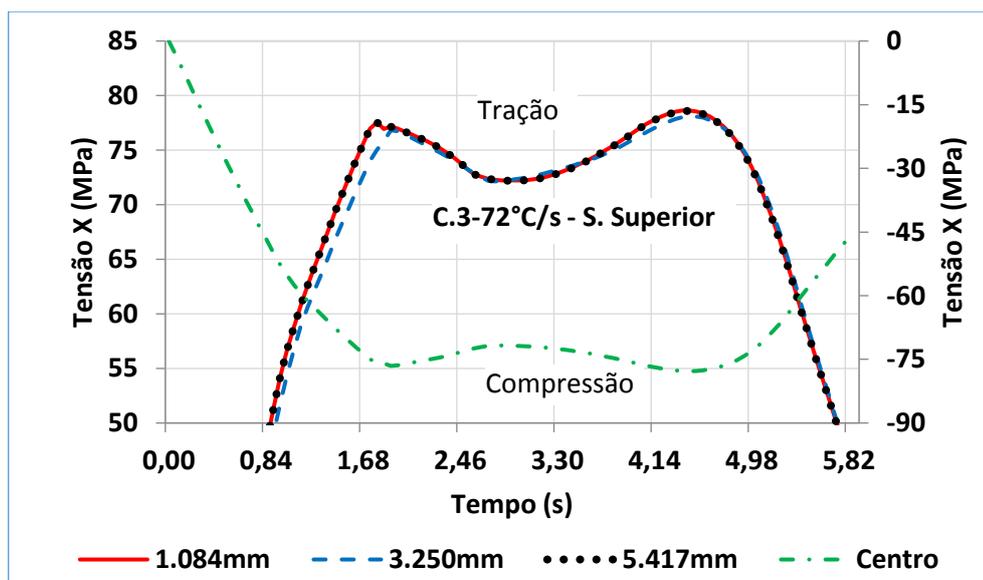


(b)

Figure 5.25 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.2 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C.

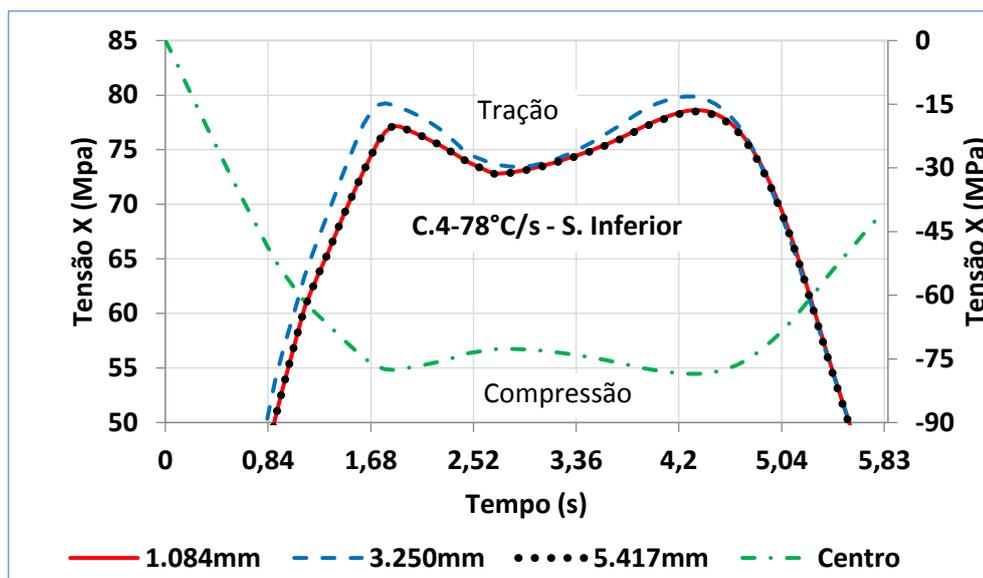


(a)

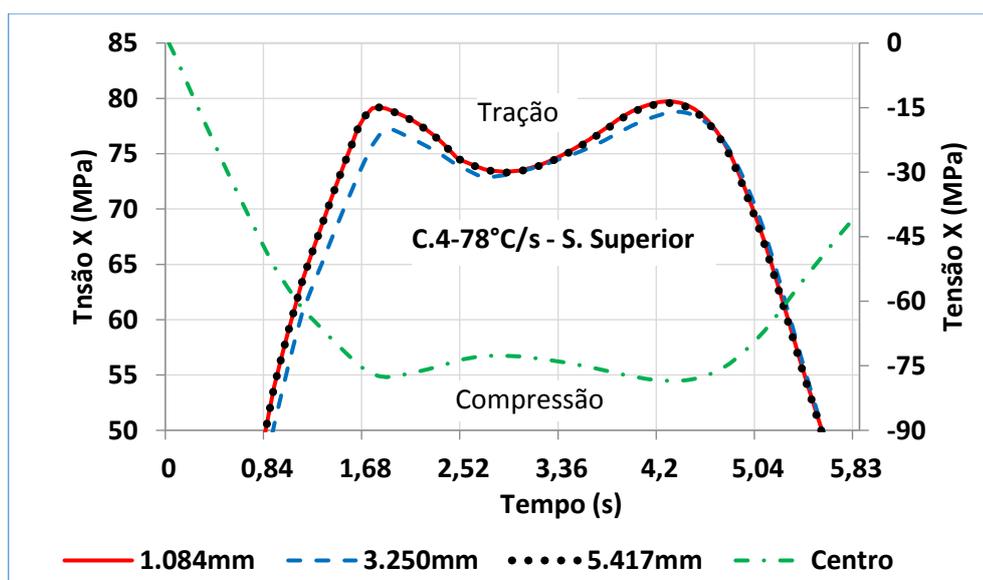


(b)

Figure 5.26 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.3 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C.



(a)



(b)

Figura 5.27 - Evolução das tensões residuais longitudinais para a simulação C.4 nas posições 1.084, 3.250 e 5.417mm nas superfícies inferior (a) e superior (b) – Caso C.

A evolução das tensões referentes as posições 1.084mm e 5.417mm foi a mesma em cada simulação uma vez que as condições de resfriamento foram as mesmas. Até o tempo aproximado de 4,5 segundos, as tensões referentes a posição 3.250mm apresentam constantemente valores maiores na superfície inferior e valores menores na superfície superior. A taxa de resfriamento nesta posição é maior na superfície superior e menor na superfície inferior indicando que o aumento na taxa de

resfriamento tem influência sobre os valores das tensões. Onde a taxa de resfriamento foi maior, as tensões evoluíram com valores menores e vice-versa. As tensões no centro da chapa acompanharam o comportamento das tensões nas superfícies, porém apresentando naturezas diferentes, as superfícies apresentam tensões trativas e o centro trações compressivas. O incremento da taxa de resfriamento não influenciou o comportamento das tensões no centro da chapa.

Como observado nos casos anteriores, pode-se afirmar que não ocorrem deformações plásticas na chapa em nenhuma das quatro simulações. As tensões alcançadas durante o resfriamento, que se inicia com temperatura igual a 850°C, não ultrapassam 80MPa. Além disso observou-se também que com o aumento do gradiente de temperatura nos momentos finais do resfriamento, ocorre o alívio parcial das tensões induzido pela transferência de calor do centro para as superfícies.

(KOO, 2007) apresentou modelos de elementos finitos (FE) para a análise da transferência de calor e para a análise de deformação 3-D elástico-viscoplástica de aço a temperaturas elevadas. Desenvolveu modelos para a previsão da fração volumétrica das fases obtidas e propriedades térmicas e mecânicas. A partir destes modelos obteve-se um modelo de elementos finitos integrado capaz de prever aspectos detalhados do comportamento térmico e mecânico da chapa submetida ao resfriamento acelerado. Utilizando o modelo, os autores investigaram o efeito de algumas variáveis de processo nas distribuições de tensão residual. Observou-se que o estado de tensão inicial, produzido pelo resfriamento ao ar ou pela laminação antes do início do resfriamento acelerado, apresentou um efeito insignificante sobre a evolução da tensão durante o restante do processo de resfriamento. Assim como neste trabalho, no final do resfriamento observou-se o início do processo de alívio da tensão longitudinal. Durante o resfriamento ao ar a ondulação central se transformou em ondulação de borda devido ao resfriamento mais rápido das bordas que conseqüentemente causou maior deformação plástica nesta região.

(SUZUKI, 1998) estudou a contribuição do processo de desempenho a quente na geração de tensões residuais em chapas grossas. Foram desenvolvidos modelos utilizando elementos finitos para avaliar duas condições de desempenho a quente de chapas. A primeira foi a condição de não uniformidade do processo na largura das chapas e a outra foi a presença de tensão térmica gerada pela distribuição da

temperatura durante o processo de resfriamento ao ar. Confirmou-se que a tensão térmica durante o resfriamento ao ar pode causar tensão residual. Assim como obtido neste trabalho, a temperatura uniforme na chapa durante o desempenho a quente se mostrou importante para controlar a tensão residual e melhorar a planicidade das chapas. A diminuição da tensão interna pelo processo de desempenho a quente e a prevenção da tensão térmica se mostraram efetivas no controle da tensão residual que causa a ondulação e o camber após o corte longitudinal.

(DA SILVA, 2012) estudou o processo de têmpera em anéis sem costura fabricados através do processo de laminação a quente. Devido à complexidade de se controlar a distorção durante a têmpera torna-se necessário prever estas distorções. Utilizou-se a metodologia baseada em simulação por elementos finitos do tratamento térmico (normalização e têmpera) e do processo de desempenho de um anel laminado a quente de aço AISI 4140. A simulação por tratamento térmico foi validada usando-se o Teste do Anel em "C". A simulação de têmpera, utilizando o software DEFORM™ e dados de material da JMatPro, levou a resultados muito semelhantes aos obtidos experimentalmente, tanto para distorções geométricas quanto para microestruturas e dureza finais. A formação de martensita não simétrica na seção transversal do anel induz tensões circunferenciais não simétricas na seção transversal do anel, distorcendo o anel. Os resultados podem ser considerados aceitáveis, uma vez que o valor de distorção se enquadra na faixa de distorção relatada pela indústria.

## 6. CONCLUSÕES

Foi possível desenvolver um modelo 2D por FEM para simulação do processo de resfriamento acelerado de chapas, envolvendo modificações das taxas de resfriamento em regiões distintas. Além disso, as simulações permitiram a previsão das tensões longitudinais residuais originadas em um processo de resfriamento acelerado, assim como a alteração do perfil de tensões em função das taxas de resfriamento avaliadas. As simulações realizadas com as maiores taxas de resfriamento apresentaram maiores gradientes de tensões residuais, bem como maiores níveis de distorção.

O formato final da chapa, ou seja, o defeito de forma obtido depende do quão uniforme é o resfriamento e de como esta uniformidade se distribui em diferentes regiões da chapa. O resfriamento mais rápido em uma das superfícies da chapa se mostrou crítico para a formação de acanoamento, assim como o resfriamento mais rápido em regiões alternadas ou em faixas na chapa se mostrou crítico para a formação de ondulação e arqueamento (ponta alta).

Os parâmetros simulados no resfriamento mais rápido das bordas, como as taxas de resfriamento e comprimento da borda (150mm), não foi suficiente para gerar distorção significativa na chapa.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar os efeitos das transformações de fase durante o resfriamento acelerado de chapas na geração das tensões residuais e distorções com o objetivo de obter um modelo de previsão integrado: transformações de fase e deformações térmicas.
- Estudar os efeitos das deformações e temperaturas na laminação antes do resfriamento acelerado na geração das tensões residuais e distorções.
- Estudar os efeitos dos processos de alívio de tensão e aplainamento na redução das distorções e tensões residuais.
- Estudar os efeitos dos processos de alívio de tensão e aplainamento na redução das distorções e tensões residuais.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, R. A. N. M, BORATTO, F. J. M., SANTOS, D. B. *Fundamentos da Laminação Controlada*. Belo Horizonte, 1989. 328p.

BICKFORD, W. B. *A First Course in the Finite Element Method*. 2ª. ed., 652 p. Illinois: Irwin, 1994.

CALLISTER JR, W. D. *Materials Science and Engineering; An Introduction*. 7<sup>th</sup> Edition: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 975p.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. *Fundamentos da Conformação*. Mecânica dos Metais. 2ª ed., 170 p. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Otoni, 1993.

DIETER, G. E., *Mechanical Metallurgy*. Singapore, McGraw-Hill Book , 1988. 766p.

FISH, J., BELYTSCHKO, T. *A First Course in Finite Elements*. West Sussex: JohnWiley and Sons, Ltd, 2007.

EVANS, J. F., CLARK, M. T. 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, Florianópolis, SC, 2001. p.136-145.

GARCIA, A., SPIM, J. A. SANTOS, C. A., *Ensaio dos Materiais*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 247p.

GINZBURG, V. B., *Flat –Rolled Steel Process; Advanced Technologies*. CRC Press, 2009. 373p.

GORNI, A. A., Resfriamento Acelerado de Chapas Grossas: O Futuro Chegou. *Revista Metalurgia e Materiais*, v. 63, n.564, p. 103-105, mar. 2006.

GUO, Z. SAUNDERS, N., MIODOWNIK, P., SCHILLÉ, J. P. Modelling Phase Transformations and Material Properties Critical to the Prediction of Distortion During

the Heat Treatment of Steels. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, v.4, n.2, p. 187-195, 2009.

HORN, G., DEHMEL, R., SHIMIDT D. Advanced Cooling Technologies for High-Strength Plate Production. Düsseldorf, Alemanha, *Millennium Steel*. p.102-105, 2009.

HULLEY, M., CHALMERS, M., Mulpic - Model Temperature Uniformity and Shape Control. *Primetals Technologies*. 13p., nov. 2013.

KOO, J. M., RYOO, S. R., LEE, C. S., SUN, H. N., HWANG, S. M., Prediction of Residual Stresses in a Plate Subject to Accelerated Cooling - A 3D Finite Element Model and an Approximate Model. *ISIJ International*. Japão, v. 47, n. 8, p. 1149-1158, mai. 2007.

MAHTUK, J.O.; GUIDETTI, G.; BARROS, A.L.F. *Aplainamento, Curso de Laminação de Produtos Planos*. Edição 1994, ABM, cap. 3, p277-326.

MEDEIROS, M. V., *Desenvolvimento de Modelos Termomecânicos para Cálculo de Tensões Residuais em Chapas Temperadas*. Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, 2010. 115p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B., *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 211p. (Apostila da Disciplina Metalurgia da Soldagem).

NSSMC – Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. Mulpic Accelerated Cooling System. Missão de Assistência Técnica a Gerdau nº 6. Brasil. 2012.

OUCHI, C. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of Gamma-Alpha Transformation After Hot Rolling. *Transactions of the ISIJ*. Japão, p.214-222, mar. 1982.

OUCHI, C., Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes. *ISIJ International*. Japão, vol. 41, n. 6, p.542-553, 2001.

PEREIRA, M., M., *Influência da Espessura de Espera nas Propriedades Mecânicas dos Aços da Classe API Obtidos por Laminação Controlada*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 96p. (Monografia do Curso de Pós-Graduação MBA em Siderurgia).

SAE INTERNATIONAL, Local da entidade.J403 Chemical Compositions of SAE Carbon Steels. Local de publicação, 2014. 11p.

SILVA, A. D., *Prediction and Control of Geometric Distortion and Residual Stresses in Hot Rolled and Heat Treated Large Rings*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 171p. (Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação da Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).

SOARES, I. R., *Simulação por Elementos Finitos da Etapa de Desbaste na Laminação de Longos*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 98p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

SFTC. *DEFORMTM 3D Version 10.1.2. User's Manual*. Columbus: Scientific Forming Technologies Corporation. 2010.

SUSUKI, T., ISAKA, K., *Control of the Residual Stress of Plates*, Proceedings of The 7th International Conference on Steel Rolling (Steel Rolling '98), Chiba, Japan, The Iron and Steel Institute of Japan, p.601-605, 1998.

TANAKA, T., Science and Technology of Hot Rolling Process of Steel. *International Conference Microalloying*, Pittsburgh, p.165-181, 1995.