

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE AUGUSTO CAMARGO DURELLO

PREVISÃO DO CRESCIMENTO DE GRÃO POR  
ELEMENTOS FINITOS A PARTIR DA  
RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA EM UM PROCESSO  
DE LAMINAÇÃO A QUENTE DE LIGA DE AÇO SAE  
4140

SÃO CARLOS -SP  
2022

HENRIQUE AUGUSTO CAMARGO DURELLO

PREVISÃO DO CRESCIMENTO DE GRÃO POR ELEMENTOS FINITOS A PARTIR DA  
RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA EM UM PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE DE  
LIGA DE AÇO SAE 4140

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Sérgio Henrique Evangelista

São Carlos-SP  
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Henrique Augusto Camargo Durello, realizada em 23/02/2022.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Sergio Henrique Evangelista (UFSCar)

Prof. Dr. Oscar Balancin (UFSCar)

Prof. Dr. Ernesto Massaroppi Junior (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

## **DEDICATÓRIA**

À minha família pelo companheirismo, paciência, carinho e amor nos momentos de  
dificuldade e alegria

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida e pelos dons que me deu nesta existência que serviram na realização deste projeto.

Agradeço de forma especial aos meus pais, Luiz e Sonia, por me proporcionar a oportunidade de estudo e acreditarem em meu potencial, além de sempre me apoiarem e incentivarem na busca da evolução intelectual e humana. E também aos meus irmãos Luiz Fernando e Vanessa pela amizade e cumplicidade, que juntos me apresentaram e ensinaram a importância da família e o caminho da honestidade e persistência.

Ao professor Dr. Sérgio Henrique Evangelista pela orientação, paciência e apoio que foram de fundamental importância para a execução deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec) pelo apoio e pela oportunidade de crescimento intelectual.

A todos os meus amigos e familiares, pelo incentivo, preocupação dedicada a mim e por compartilharem de uma forma ou de outra experiências similares desta etapa da minha vida.

E a todos aqueles que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para com este projeto.

Agradeço ainda a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo apoio durante a realização do presente trabalho.

## RESUMO

No presente estudo, analisou-se a influência dos parâmetros pertinentes ao modelo de Avrami para descrição das cinéticas de recristalização dinâmica e o tamanho final dos grãos recristalizados, além de sua distribuição em uma placa laminada a quente de liga de aço SAE 4140. A placa é analisada por Elementos Finitos (EF) no programa comercial DEFORM™ 3D para efeito de determinação dos campos de tensão, deformação e temperatura. O modelo de Avrami é pós-processado a partir dos resultados de EF, junto com dados específicos do material e aspectos gerais de modelagem numérica tomados como referência a partir do obtido na literatura. O estudo é aplicado a somente um passo de laminação, visando redução de tempo e custos fabris. Alguns pontos representativos da placa foram escolhidos para efeito das análises. Discussões baseadas no diagrama de fases de liga Fe-C e diagrama TTT (tempo, temperatura e transformação) foram apresentadas com intuito de oferecer uma interpretação do modelo de EF relacionados aos efeitos de recristalização dinâmica. Para as condições estudadas, os grãos apresentaram tamanhos finais após a recristalização da ordem entre 2,55 a 36,5  $\mu\text{m}$  com as mudanças de variáveis. Após 15 segundos de simulação da laminação, a influência da temperatura inicial da chapa indicou um aumento do tamanho de grão recristalizado, porém no caso do resfriamento da chapa (coeficiente convectivo) esse tamanho de grão final foi aproximadamente constante. Já com a redução da espessura e aumento da taxa de deformação da chapa foi observado uma redução do tamanho de grão recristalizado. Foi apresentada uma orientação sobre as condições que propiciam um aumento de tamanho de grão ao final da recristalização dinâmica. De forma oposta, é possível extrair disto as orientações práticas para a minimização do tamanho de grão no processo. Os resultados apresentados carecem de maior embasamento experimental, do que se abre a possibilidade da formação de uma coletânea ampla de dados do processo estudado e que sirvam de base para ajustes matemáticos a algoritmos automáticos que possam ser utilizados de forma ágil em chão-de-fábrica.

**Palavras-chave:** Microestrutura, Laminação a quente, Elementos finitos, Recristalização, Crescimento de Grão, Conformação Mecânica.

## ABSTRACT

In the present study, we analyzed the influence of the parameters relevant to the Avrami model to describe the dynamic recrystallization kinetics and the final size of the recrystallized grains, in addition to their distribution on a hot-rolled plate of steel alloy SAE 4140. is analyzed by Finite Elements (EF) in the commercial program DEFORM™ 3D for the purpose of determining the stress, strain and temperature fields. Avrami's model is post-processed from the EF results, together with material-specific data and general numerical modeling aspects taken as a reference from what is obtained in the literature. The study is applied to only one lamination step, aiming to reduce manufacturing time and costs. Some representative points of the plate were chosen for the purpose of the analyses. Discussions based on the Fe-C alloy phase diagram and TTT diagram (time, temperature and transformation) were presented in order to provide an interpretation of the EF model related to dynamic recrystallization effects. For the conditions studied, the grains showed final sizes after recrystallization in the order of 2.55 to 36.5  $\mu\text{m}$  with changes in variables. After 15 seconds of rolling simulation, the influence of the initial temperature of the sheet indicated an increase in the recrystallized grain size, but in the case of sheet cooling (convective coefficient) this final grain size was approximately constant. With the reduction in thickness and increase in the deformation rate of the plate, a reduction in the recrystallized grain size was observed. Guidance was presented on the conditions that provide an increase in grain size at the end of dynamic recrystallization. Conversely, it is possible to extract from this practical guideline for the minimization of grain size in the process. The results presented lack a greater experimental basis, which opens the possibility of forming a wide collection of data from the studied process and that serve as a basis for mathematical adjustments to automatic algorithms that can be used in an agile way on the factory floor.

**Keywords:** Microstructure, Hot rolling, Finite elements, Recrystallization, Grain Growth, Metal Forming.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Micrografia do ensaio de aço SAE 4140 posterior ao tratamento térmico de têmpera: solução de polímero (a) e (b) 10%; (c) e (d) 20% e (e) e (f) 30%.	23
Figura 2 - Alteração de propriedades e da estrutura do grão durante a recuperação e a recristalização.	24
Figura 3 - Ilustração da curva de escoamento plástico de materiais com DRX.	26
Figura 4 - Diagrama de Fases do Fe-C.	31
Figura 5 - Diagrama TTT para o aço SAE 4140.	32
Figura 6 - Exemplo de resposta em °C dada pelo programa computacional de elementos finitos após uma análise de deformação de uma chapa laminada.	34
Figura 7 - Ilustração das forças atuantes no deslizamento de um corpo.	38
Figura 8 - Ilustração do contato microscópico entre duas superfícies sujeitas ao atrito.	39
Figura 9 - Fluxograma de processo de Cálculo Computacional.	49
Figura 10 - Curva Tensão-Deformação do aço SAE 4140 presente no DEFORM™ 3D.	50
Figura 11 - Modelo criado no DEFORM™ para estudo.	51
Figura 12 - Fluxograma do planejamento de cálculo e análise.	55
Figura 13 - Posição geométrica na chapa dos quatro pontos escolhidos para análises.	56
Figura 14 - Posição dos quatro pontos de análise com relação a face inicial.	57
Figura 15 - Resultado da análise de temperatura do Caso 1 após 15s. Temperatura inicial de 1000°C.	59
Figura 16 - Variação de temperatura do Caso 1 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1000°C.	59
Figura 17 - Resultado da análise de temperatura do Caso2 após 15s. Temperatura inicial de 1200°C.	60
Figura 18 - Gráficos: variação de temperatura do Caso 2 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1200°C.	60
Figura 19 - Resultado da análise de temperatura do Caso 3 após 15s. Temperatura inicial de 1400°C.	61
Figura 20 - Gráficos: variação de temperatura do Caso 3 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1400°C.	61
Figura 21 - Resultado da análise de temperatura do Caso 4 após 15s. Coeficiente convectivo de $0,01 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .	62
Figura 22 - Gráficos: variação de temperatura do Caso 4 nos quatro pontos. Coeficiente convectivo: $0,01 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .	62
Figura 23 - Resultado da análise de temperatura do Caso 5 após 15s. Coeficiente convectivo de $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .	63
Figura 24 - Gráficos: variação de temperatura do Caso 5 nos quatro pontos. Coeficiente convectivo: $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .	63
Figura 25 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para redução de espessura de 5 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).	65
Figura 26 - Gráficos: variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Redução de espessura de 5 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).	65
Figura 27 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para redução de espessura de 10 mm (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).	66
Figura 28 - Gráficos: variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Redução de espessura de 10 mm (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).	66

Figura 29 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para redução de espessura de 15 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).....	67
Figura 30 - Gráficos: variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Redução de espessura de 15 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).....	67
Figura 31 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para uma taxa de deformação de $0,5 s^{-1}$ (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).....	68
Figura 32 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Taxa de deformação de $0,5 s^{-1}$ (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).....	68
Figura 33 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para uma taxa de deformação de $1,5 s^{-1}$ (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).....	69
Figura 34 - Gráficos: variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Taxa de deformação de $1,5 s^{-1}$ (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).....	69
Figura 35 - Resultado da máxima deformação principal após 15s para temperatura inicial de $1000^{\circ}C$ (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).....	71
Figura 36 - Gráficos: variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: $1000^{\circ}C$ (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).....	71
Figura 37 - Resultado da máxima deformação principal após 15s para temperatura inicial de $1400^{\circ}C$ (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).....	72
Figura 38 - Gráficos: variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: $1400^{\circ}C$ (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).....	72
Figura 39 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para a temperatura inicial de $1000^{\circ}C$ (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).....	75
Figura 40 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: $1000^{\circ}C$ (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).....	75
Figura 41 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para a temperatura inicial de $1200^{\circ}C$ (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).....	76
Figura 42 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: $1200^{\circ}C$ (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).....	76
Figura 43 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para a temperatura inicial de $1400^{\circ}C$ (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).....	77
Figura 44 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: $1400^{\circ}C$ (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).....	77
Figura 45 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para um coeficiente convectivo de $0,01 kWm^{-2}C^{-1}$ (condições do Caso 4 conforme Tabela 5).....	78
Figura 46 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Coeficiente convectivo de $0,01 kWm^{-2}C^{-1}$ (condições do Caso 4 conforme Tabela 5).....	78
Figura 47 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para um coeficiente convectivo de $0,05 kWm^{-2}C^{-1}$ (condições do Caso 5 conforme Tabela 5).....	79
Figura 48 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Coeficiente convectivo de $0,05 kWm^{-2}C^{-1}$ (condições do Caso 5 conforme Tabela 5).....	79
Figura 49 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para uma redução de espessura de 5 mm sobre uma espessura inicial de 30,7 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).....	80
Figura 50 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Redução de espessura 5 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).....	80
Figura 51 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para uma redução de espessura de 15 mm sobre uma espessura inicial de 30,7 mm (condições do Caso	

7 conforme Tabela 5).....	81
Figura 52 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Redução de espessura 15 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).....	81
Figura 53 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para uma taxa de deformação de $0,5 s^{-1}$ (condições do Caso 8 conforme Tabela 5). ....	82
Figura 54 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Taxa de deformação de $0,5 s^{-1}$ (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).....	82
Figura 55 - Recristalização dinâmica e tamanho de grão recristalizado após 15s para uma taxa de deformação de $1,5 s^{-1}$ (condições do Caso 9 conforme Tabela 5). ....	83
Figura 56 - Gráficos: tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Taxa de deformação de $1,5 s^{-1}$ (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de fator de atrito de cisalhamento.....	41
Tabela 2 - Composição química do aço SAE 4140 [% de massa].....	50
Tabela 3 - Parâmetros de simulação adotados no DEFORM™ para estudo.....	53
Tabela 4 - Valores das constantes do modelo de Avrami para DRX adotadas no DEFORM™ para o aço SAE 4140.....	54
Tabela 5 - Parâmetros e suas variações para análise de sensibilidade de laminação a quente.....	55
Tabela 6 - Síntese dos resultados obtidos para análise da distribuição de temperatura da chapa.....	84
Tabela 7 - Síntese dos resultados obtidos para análise da distribuição de máxima deformação principal da chapa.....	86
Tabela 8 - Síntese dos resultados obtidos para DRX e tamanho de grão da chapa.....	88

## LISTA DE SIGLAS

DEMa	Departamento de Engenharia de Materiais
DRX	Dynamic Recrystallization
EF	Elementos Finitos
EFE	Energia de Falha de Empilhamento
FEA	Finite Element Analysis
GDL	Grau de Liberdade
KJMA	Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami
MDRX	Metadynamic Recrystallization
PPGEMec	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RAM	Random Access Memory
SAE	Society of Automobile Engineers
SFTC	Scientific Forming Technologies Corporation
SI	Sistema Internacional
SRX	Static Recrystallization
SSD	Solid State Drive
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$	Área de contato	mm <sup>2</sup>
$A_n$	Área normal	mm <sup>2</sup>
$A_s$	Área de cisalhamento	mm <sup>2</sup>
$d_{drex}$	Tamanho de grão na DRX no Deform	µm
$d_{DRX}$	Tamanho de grão na DRX	µm
$d_{inc}$	Tamanho de grão após recristalização incompleta	µm
$d_{mrex}$	Tamanho de grão na MDRX no Deform	µm
$d_r$	Crescimento do tamanho de grão no Deform	µm
$d_{srex}$	Tamanho de grão na SRX no Deform	µm
$d_{SRX}$	Tamanho de grão na SRX	µm
$d_o$	Tamanho Inicial do Grão	µm
$F$	Força de atrito estática	N
$F'$	Força de atrito dinâmica	N
$F''$	Força de atrito de cisalhamento	N
$f_c$	Tensão de atrito de Coulomb no Deform	MPa
$f_s$	Tensão de atrito por cisalhamento no Deform	MPa
$k_s$	Resistência ao cisalhamento	N.mm
$m$	Coefficiente de atrito por cisalhamento	-
$m'$	Expoente de crescimento de grão (constante do material)	-
$n$	Expoente de Avrami	-
$P$	Carga aplicada	N
$P'$	Pressão aplicada	MPa
$Q_{cg}$	Energia de ativação de crescimento de grão	kJ.mol <sup>-1</sup>
$Q_{dDRX}$	Energia de ativação de crescimento de grão na DRX	kJ.mol <sup>-1</sup>
$Q_{DRX}$	Energia de ativação da deformação na DRX	kJ.mol <sup>-1</sup>
$Q_{MDRX}$	Energia de ativação da deformação na MDRX	kJ.mol <sup>-1</sup>
$Q_{SRX}$	Energia de ativação da deformação na SRX	kJ.mol <sup>-1</sup>
$Q_{1...9}$	Energia de ativação do material no Deform	kJ.mol <sup>-1</sup>
$R$	Constante universal dos gases	J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$R'$	Reação normal	N
$T$	Temperatura	K
$t_{0,5}$	Tempo para 50% de recristalização	s
$X$	Fração de recristalização	-
$X_{drex}$	Fração recristalizada dinamicamente no Deform	-
$X_{DRX}$	Fração recristalizada dinamicamente	-
$X_{MDRX}$	Fração recristalizada metadinamicamente	-
$X_{mrex}$	Fração recristalizada metadinamicamente no Deform	-
$X_{srex}$	Fração recristalizada estaticamente no Deform	-
$X_{SRX}$	Fração recristalizada estaticamente	-

$\gamma$	Tensão de escoamento	MPa
$Z$	Parâmetro de Zener-Hollomon	-
$\gamma$	Deformação por Cisalhamento	-
$\varepsilon$	Deformação	-
$\varepsilon_c$	Deformação Crítica	-
$\varepsilon_{cs}$	Deformação crítica na SRX no Deform	-
$\varepsilon_p$	Deformação de Pico	-
$\varepsilon_{0,5}$	Deformação em 50% de recristalização	-
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação	s <sup>-1</sup>
$\bar{\varepsilon}$	Deformação plástica efetiva	-
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	Taxa de deformação efetiva	s <sup>-1</sup>
$\mu$	Coefficiente de atrito estático	-
$\mu_c$	Coefficiente de atrito de Coulomb no Deform	-
$\mu'$	Coefficiente de atrito dinâmico	-
$\sigma$	Tensão	MPa
$\sigma_c$	Tensão crítica	MPa
$\sigma_p$	Tensão de pico	MPa
$\bar{\sigma}$	Tensão efetiva	MPa
$\tau$	Tensão de Cisalhamento	MPa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	19
2.1	PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE .....	19
2.2	MICROESTRUTURA, FORMAÇÃO DE GRÃO, RECUPERAÇÃO E RECRISTALIZAÇÃO .....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b> .....	22
<b>2.2.2</b>	<b>Tensão e Deformação Efetiva</b> .....	25
<b>2.2.3</b>	<b>Cinética de Recristalização Dinâmica</b> .....	25
<b>2.2.4</b>	<b>Cinética de Recristalização Estática</b> .....	28
<b>2.2.5</b>	<b>Cinética de Recristalização Metadinâmica</b> .....	28
<b>2.2.6</b>	<b>Crescimento de Grão</b> .....	29
<b>2.2.7</b>	<b>Tamanho do Grão com Recristalização Incompleta</b> .....	30
2.3	DIAGRAMA DE FASES PARA LIGAS Fe-C.....	30
2.4	DIAGRAMA TEMPO-TEMPERATURA-TRANSFORMAÇÃO (TTT) .....	32
2.5	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS (FEA).....	33
<b>2.5.1</b>	<b>Programas para Análise por Elementos Finitos</b> .....	34
<b>2.5.2</b>	<b>Aspectos da Modelagem do Material</b> .....	36
2.5.2.1	Equação Constitutiva de Material .....	37
2.5.2.2	Funções de Encruamento.....	37
<b>2.5.3</b>	<b>Aplicação e Modelos de Atrito no DEFORM™</b> .....	38
2.5.3.1	Atrito de Cisalhamento no DEFORM™ .....	41
2.5.3.2	Atrito de Coulomb no DEFORM™ .....	41
<b>2.5.4</b>	<b>Cinética de Recristalização Dinâmica no DEFORM™</b> .....	42
<b>2.5.5</b>	<b>Cinética de Recristalização Estática no DEFORM™</b> .....	43
<b>2.5.6</b>	<b>Cinética de Recristalização Metadinâmica no DEFORM™</b> .....	44
<b>2.5.7</b>	<b>Crescimento de Grão no DEFORM™</b> .....	45
<b>2.5.8</b>	<b>Recristalização Incompleta no DEFORM™</b> .....	46
2.6	ALGUMAS REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES PARA COMPARAÇÃO COM AS ANÁLISES NUMÉRICAS.....	46
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	48
3.1	MATERIAIS.....	48
3.2	MÉTODOS .....	48
<b>3.2.1</b>	<b>Fluxogramas de Trabalho</b> .....	48
<b>3.2.2</b>	<b>Propriedades da liga de aço SAE 4140</b> .....	50

<b>3.2.3</b>	<b>Implementação do Modelo FEA</b> .....	51
<b>3.2.4</b>	<b>Previsão de Tamanho do Grão após a Recristalização Dinâmica – Casos a Serem Analisados</b> .....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	58
4.1	TESTE DE ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE - TEMPERATURA INICIAL.....	58
4.2	TESTE DE ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE - DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS.....	64
4.3	RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA E TAMANHO DE GRÃO RECRISTALIZADO .....	73
<b>5</b>	<b>SÍNTESE DA DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	84
5.1	DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA (INTERVALO DE 15 SEGUNDOS) .....	84
5.2	DISTRIBUIÇÃO DA MÁXIMA DEFORMAÇÃO PRINCIPAL .....	85
5.3	RECRISTALIZAÇÃO E TAMANHO DE GRÃO RECRISTALIZADO (INTERVALO DE 15 SEGUNDOS).....	87
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	90
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	92

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço de novas tecnologias e a preocupação com a sustentabilidade, as indústrias vêm procurando reduzir custos e otimizar o tempo de produção. Para isso, realizam pesquisas desde a estrutura organizacional até melhoria contínua de processos.

No âmbito dos processos de conformação mecânica, a influência das variáveis do processo de deformação a quente relacionadas à evolução microestrutural é complexa, devido às elevadas temperaturas envolvidas no processamento e ao fator da geometria das peças, além das altas taxas de deformação. Todavia, utilizando-se modelos computacionais bem construídos e validados e levando-se em conta os fenômenos metalúrgicos que ocorrem ao longo do processamento, é possível analisar e controlar as heterogeneidades, de tal maneira que seja possível esperar ótimas propriedades mecânicas de forma assertiva.

O objetivo deste trabalho pautou-se em análises por elementos finitos (FEA) sobre o processo de laminação a quente de uma placa feita na liga de aço SAE 4140. O foco do trabalho voltou-se à compreensão, por meio das análises numéricas, da evolução da recristalização dinâmica e do tamanho dos grãos considerando-se variações no processo de laminação citado que contemplam casos diferenciados de temperatura inicial, recalque, taxa de compressão e na condição de transferência de calor por convecção. Tomando-se alguns pontos relevantes da placa de estudo, demonstra-se por meio dos resultados previstos e de sua comparação mediante o diagrama de fase e o diagrama TTT (tempo-temperatura-transformação) da liga como que a abordagem pode ser implementada em um chão-de-fábrica para oferecer orientações embasadas que visem aos ajustes objetivos de melhoria no processo durante sua própria execução. Nisto, analisam-se alguns casos propostos para se estudar o problema da variação dos parâmetros de entrada e a sensibilidade do modelo quanto ao tamanho de grão decorrente após a recristalização dinâmica. Esta proposta é justificada pelo intuito de se compreender a robustez da técnica de modelagem empregada, de se explorar um espaço das soluções conforme a variação dos parâmetros de entrada segundo uma faixa prática delimitada e, por fim, oferecer uma coleção de soluções que possa ser pós-processada por algoritmos para

automatização dos processos preditivos em chão-de-fábrica e em tempo real, tais como aqueles baseados em inteligência artificial.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Os processos metalúrgicos existem a muitos anos, alguns datados desde a antiguidade quando o ser humano começou a manusear metais e ao longo do tempo, os métodos foram sendo aperfeiçoados com a adição de fornos, mistura com outros materiais para geração de ligas e até mesmo a inclusão de robôs para controle de qualidade, esse último de forma mais recente com a inclusão da informática nas linhas de produção.

Atualmente as indústrias se preocupam com a sustentabilidade, um exemplo é a utilização de aços de alta ou ultra-alta resistência em estruturas de peso crítico, já que apresenta relação com a economia energética, otimização da emissividade de carbono e redução de custos de manufatura (CIPRIANI, 2017).

### 2.1 PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE

De acordo com Reis (2007), estudos de metalurgia voltados aos processos de conformação a quente, vem sendo desenvolvidos e aplicados nos últimos anos para laminações de placas, tiras, barras e fios-máquina. Estas pesquisas revelam a possibilidade de analisar a evolução da microestrutura final em cada parte do processo, através de modelos matemáticos e conseqüentemente FEA. Alguns benefícios que podem ser alcançados por essas metodologias são: redução de custo e tempo, aumento da produtividade, previsão de variáveis ligadas a evolução microestrutural, maior compreensão da interação de fenômenos mecânicos e térmicos do processo, melhoria de qualidade e otimização do desempenho do equipamento.

Por definição, o processo a quente consiste em aquecer o material até a temperatura de transformação microestrutural, sendo que para o aço é dado pela zona austenítica e posteriormente, aplica-se deformações até que se chegue na dimensão pré-estabelecida da peça, finalizando com resfriamento controlado. Durante o processo, ocorrem oscilações microestruturais que variam de acordo com as características do material e dos parâmetros operacionais como deformação, temperatura, deformação e tempo de passe (REGONE et al., 2000).

A deformação que ocorre no processamento de uma chapa causada pela diferença na espessura da mesma, é chamada redução por passe. Quanto maior a

redução, maior será energia necessária para deformar o material, além de maior o alargamento resultante do passe e o aumento da temperatura devido ao processo de conformação. Há um limite de redução proporcionado pela resistência mecânica do equipamento, cilindro e potência de motor. Além destas limitações, existe também um limite para redução em um passe devido às condições de agarre do material nos cilindros de laminação (MILANEZ, 2006).

Após a aplicação de deformação mecânica em peças aquecidas, ocorre mecanismos de alívio de tensão, chamado de recuperação. Quando o material é aquecido acima da temperatura de recristalização, ocorre o mecanismo de recristalização na microestrutura, sendo este responsável por devolver as propriedades do material até seu estágio inicial. Por fim, com as temperaturas ainda elevadas, ocorre o fenômeno de crescimento de grão (SOUZA, 2015 e MILANEZ, 2006).

No caso do aço, o mecanismo de crescimento de grão durante o processo de laminação a quente consiste em quatro estágios, iniciando com a recristalização dinâmica durante a deformação a quente aplicada pelos cilindros laminadores, posteriormente, ocorrem as recristalizações estática e a metadinâmica após o fim das deformações e ao final das etapas, ocorre o crescimento dos grãos, sendo que as recuperações dinâmica e estática são ignoradas (SOUZA, 2015).

O mecanismo de recristalização estática ocorre após a deformação, normalmente com baixa energia de falha de empilhamento (EFE), o qual reduzem a energia armazenada e conseqüentemente remove a microestrutura deformada. Além disso, na laminação a quente, tal mecanismo é visível após a deformação e nos intervalos entres os passes (SOUZA, 2015).

A recristalização dinâmica também ocorre em metais com baixa e média EFE, cujas taxas de deformações são elevadas. Ocorre a geração de um número elevado de defeitos durante o processo a quente devido as taxas de criação de defeitos serem maiores que as de aniquilação dos mesmos, devido ao fato desse tipo de recristalização ser lento (SOUZA, 2015).

Durante o processo de laminação a quente, os grãos reduzem de tamanho no instante em que a seção da chapa passa pelo cilindro laminador. Tal efeito é proveniente do aumento de tensão localizado devido a taxa de deformação imposta pela máquina, o que dificulta a modelagem usando células unitárias (MCWILLIAMS et

al., 2013).

Também, na região das bordas da chapa ocorrem tensões de tração na direção perpendicular ao cilindro, em contrapartida, ocorrem deformações compressivas na direção da espessura da chapa, o que gera uma distribuição de tensões que resultam em propagação de trincas ao longo da direção de rolagem (ZHOU et al., 2016).

Quando o cilindro entra em contato com a peça a ser laminada, diversas forças atuam nas partes, umas delas é a carga proveniente do atrito entre as superfícies. Tal força influencia diretamente as condições de tensão na superfície, deformando a microestrutura e gerando calor, o que não é visto na mesma intensidade no centro da chapa processada (INOUE et al., 2013).

O controle da influência dos parâmetros do processo de deformação a quente considerando a evolução microestrutural e com previsão da ocorrência de precipitação em condições industriais é difícil e dispendioso, devido às altas temperaturas envolvidas no processo, além de considerar a complexidade das geometrias e altas taxas de deformação envolvidas (SOUZA, 2019).

Um dos mecanismos de resistência mais importante em aços ferríticos é o refinamento de grãos, já que uma diminuição em seu tamanho leva geralmente a um aumento da resistência à tração e da tenacidade. Durante o processamento termomecânico, o tamanho de grão final da fase ferrita é fortemente governado pelo tamanho de grão austenítico anterior. Este por sua vez é dada pela resultante das forças motrizes para recristalização e crescimento de grãos, além do ancoramento dos contornos de grão dado por átomos de soluto e precipitados, decorrente da adição de elementos de liga ao aço (SOUZA, 2019).

Conforme mencionado por Milanez (2006), o controle dos parâmetros do processo de deformação a quente sob a evolução microestrutural é complexo, devido às altas temperaturas envolvidas. Todavia, utilizando-se modelos, bem construídos e validados, dos fenômenos metalúrgicos, é possível controlar as heterogeneidades de tal modo a esperar uma otimização das propriedades mecânicas.

Este método pode ser muito útil na produção de laminados e forjados a quente, ou qualquer outro processo de conformação em altas temperaturas. Esses modelos devem ser capazes de prever condições críticas de deformação e temperatura para uma ampla gama de materiais (SOUZA, 2019).

Uma das justificativas associada a utilização do FEA nesta previsão encontra-

se na possibilidade de tratar problemas complexos, as quais seriam inviáveis em modelos analíticos. Com o uso de modelos computacionais é possível analisar problemas de heterogeneidade em materiais submetidos a processos reais, de tal modo a prever o comportamento dos mecanismos de recristalização e precipitação em geometrias complexas. Além disso, pode-se destacar a economia significativa de recursos materiais e de tempo quando comparados os métodos de ensaios físicos com a FEA. Ensaios virtuais estão em crescente utilização, já que fornecem aos usuários informações relevantes e indicam quais parâmetros devem ser aplicados considerando as respostas a serem obtidas. Porém, há poucos estudos na literatura, as quais, apresentam modelos que preveem o refino de grão por deformação, levando-se em consideração os aspectos tridimensionais do processo (SOUZA, 2019).

## 2.2 MICROESTRUTURA, FORMAÇÃO DE GRÃO, RECUPERAÇÃO E RECRISTALIZAÇÃO

### 2.2.1 Considerações Iniciais

Os materiais sólidos apresentam uma estrutura microscópica, chamada de microestrutura, a qual é formada a partir do resfriamento da massa fundida, sendo que o início dessa solidificação ocorre em diversos pontos ao longo do material e isso gera direções diferentes de crescimento desses sólidos, chamados de grãos. Ao final do processo, há diversos grãos formados e é visível uma área de fronteira entre eles, conhecido como contorno de grão.

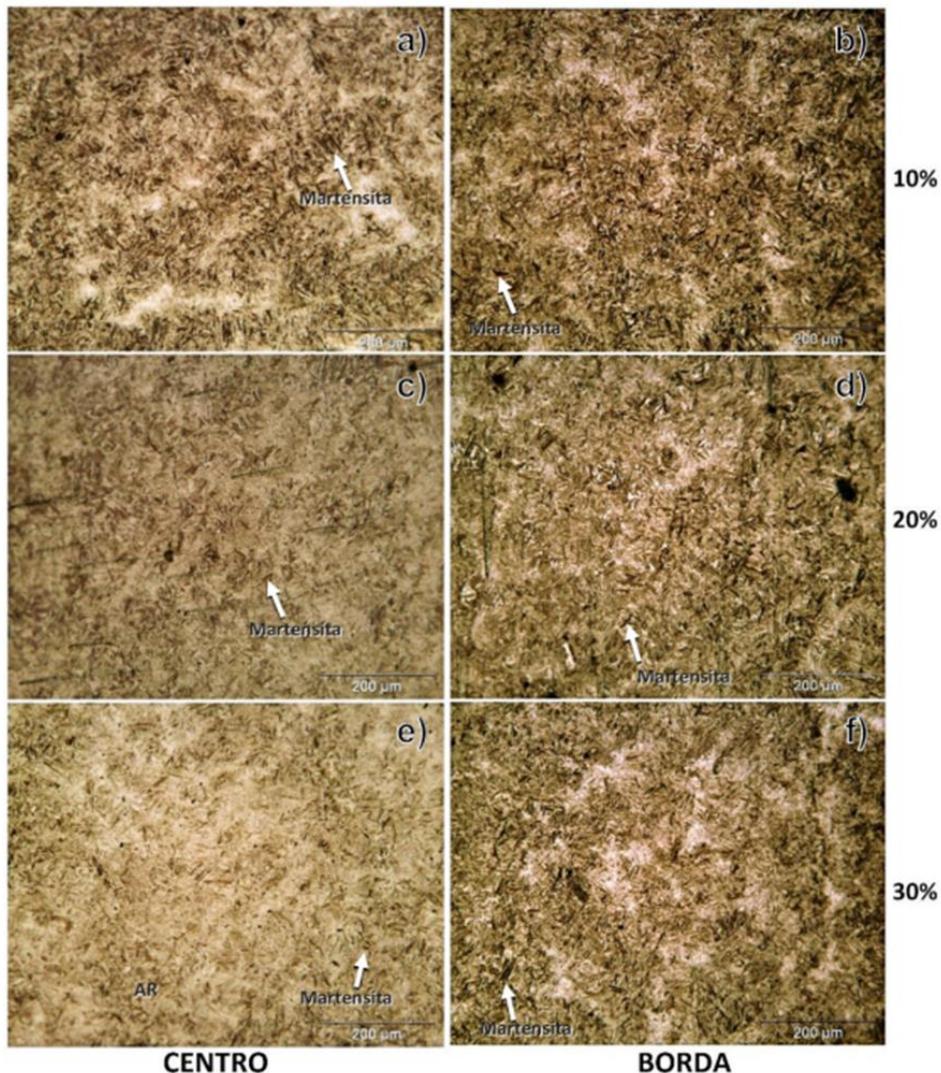
A característica de que cada grão tem uma direção preferencial de crescimento revela que essa é a direção na qual aquele fragmento sólido apresenta maior resistência e ao se somar todos os pontos de grãos, temos uma infinidade de direções, o que caracteriza um material isotrópico. Um exemplo desse tipo de material é o aço (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

Encruamento é o fenômeno que ocorre durante a deformação plástica do material e está associado ao aumento da resistência mecânica, tal mecanismo é dado pelo aumento da distorção e da densidade de discordâncias da rede cristalina, sendo essas discordâncias podendo ser de três tipos: cunha, helicoidal ou mista (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

Outro fenômeno que ocorre durante a deformação plástica e impacta

diretamente na microestrutura é o encruamento está associado ao aumento da resistência mecânica, tal mecanismo é dado pelo aumento da distorção e da densidade de discordâncias da rede cristalina. A Figura 1 apresenta a microestrutura vista em microscópio durante um ensaio de micrografia de um aço SAE 4140 após a realização de um tratamento térmico de têmpera sob refrigeração de solução de polímero (ANSBACH, 2020).

Figura 1 - Micrografia do ensaio de aço SAE 4140 posterior ao tratamento térmico de têmpera: solução de polímero (a) e (b) 10%; (c) e (d) 20% e (e) e (f) 30%.



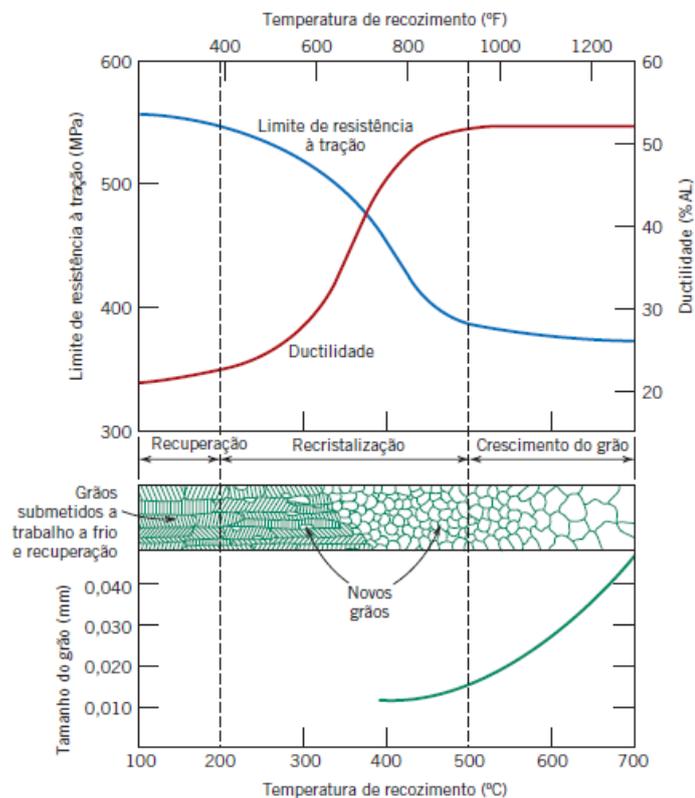
Fonte: Ansbach (2020).

A recuperação ocorre em temperaturas relativamente baixas e age de forma a acomodar e aniquilar defeitos pontuais e discordâncias ao longo da rede cristalina, tal fenômeno pode ocorrer de forma estática ou dinâmica. Manter um *blank* em temperatura suficientemente elevadas faz com que a vibração térmica dos átomos

permite maior mobilidade das discordâncias, como as discordâncias são bastante móveis para formar arranjos regulares, as mesmas se aniquilam mesmo em temperaturas inferiores a faixa de recristalização, o que restaura parcialmente a maciez do material, aumenta a ductilidade e reduz a resistência mecânica, sem alterar a microestrutura (SHACKELFORD, 2015).

Outro mecanismo de nucleação e crescimento de grão que pode ocorrer durante o processo é a recristalização que gera mudanças de propriedades acompanhadas de alterações significativas da microestrutura. A recristalização dinâmica ocorre durante a deformação, já a estática ocorre após o processo. Nesse mecanismo, a maciez original é inteiramente restaurada pelo aquecimento acima da temperatura de recristalização, o que gera novos grãos com baixa densidade de discordâncias (SHACKELFORD, 2015). A Figura 2 apresenta a mudança de propriedade e de forma dos grãos ao longo da recuperação e recristalização.

Figura 2 - Alteração de propriedades e da estrutura do grão durante a recuperação e a recristalização.



Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2016).

### 2.2.2 Tensão e Deformação Efetiva

É comum a substituição de um estado complexo de tensões ou deformações com base em funções invariantes da tensão e da deformação. Com base nas curvas de tensão-deformação provenientes de ensaios de tração simples ou de torção, em termos de alguns destes invariantes, pode-se obter uma curva com forma análoga, que possibilite, por exemplo, a identificação do escoamento independentemente do ensaio mecânico realizado (SOUZA, 2015).

As tensões e deformações efetivas devem ser consideradas como sendo os valores que englobam o efeito das componentes de tensão ou deformação geradoras de distorção ou cisalhamento em um elemento de volume do material. Esta definição é conveniente, devido ao fato de possibilitar que dois estados diferentes de tensão ou deformação sejam comparados por meio desses valores efetivos. A Equação 1 define a tensão efetiva e a Equação 2 calcula a deformação efetiva (VALBERG, 2010):

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \left\{ \frac{2}{3} \left[ \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + 2(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

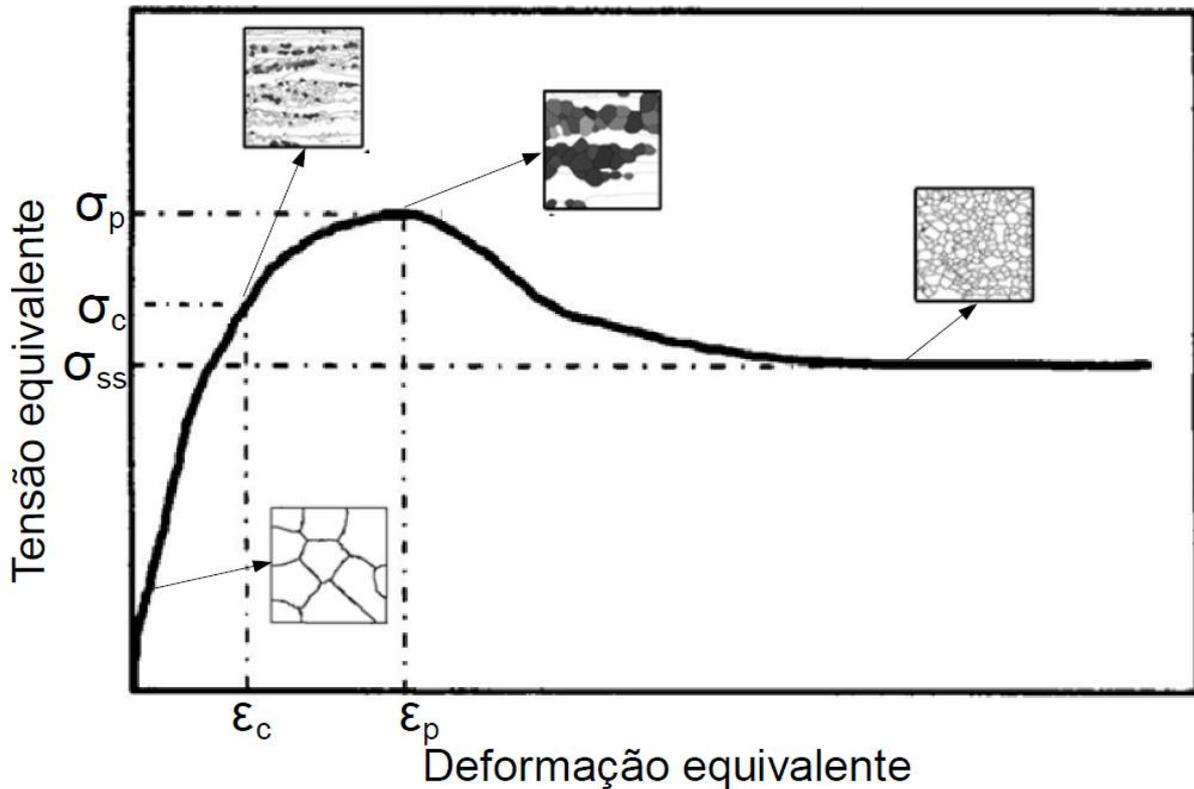
### 2.2.3 Cinética de Recristalização Dinâmica

O fenômeno da recristalização dinâmica (DRX) geralmente ocorre em metais com baixa e média energia de falha de empilhamento (EFE), quando submetido a altas taxas de deformação. Além disso a DRX está associada à criação de grande quantidade de defeitos durante o processo a quente, pois a taxa de geração será maior que a de aniquilação desses defeitos, uma vez que, a recuperação dinâmica é lenta. Com o aumento da deformação, ocorre acúmulo de discordâncias, isto é, o material vai acumulando energia interna suficiente para o início da recristalização dinâmica (SOUZA, 2019).

Há uma deformação crítica  $\varepsilon_c$ , ou seja, o valor mínimo de deformação para que

ocorra o início da DRX. Inicialmente, a tensão aumenta, provocada pelo encruamento até alcançar um valor crítico de início da recristalização dinâmica no ponto  $\sigma_c$  e  $\varepsilon_c$ , na sequência, os valores da curva continua crescendo até alcançar o valor de pico  $\sigma_p$  e  $\varepsilon_p$ , que estabelece o balanço entre as taxas de geração e aniquilação de discordâncias. Conforme ocorre o aumento da deformação, o amaciamento torna-se mais eficiente, reduzindo assim a tensão até o estado estacionário ( $\sigma_{ss}$ ), cujo tamanho médio de grão recristalizado dinamicamente não sofre alteração com a deformação. A Figura 3 apresenta uma curva de escoamento plástico característica de um material sujeito ao fenômeno de DRX (SOUZA, 2019).

Figura 3 - Ilustração da curva de escoamento plástico de materiais com DRX.



Fonte: Souza (2019).

É comum no estudo da DRX relacionar a deformação crítica,  $\varepsilon_c$ , como uma função da deformação de pico,  $\varepsilon_p$ , determinada na curva tensão-deformação efetiva, por conta da facilidade de medida desse parâmetro e pela vasta quantidade de equações para estimar o valor de  $\varepsilon_p$  em função do tamanho inicial de grão ( $d_0$ ), da temperatura e da taxa de deformação (SOUZA, 2019).

Os valores resultantes da razão  $\varepsilon_c/\varepsilon_p$ , normalmente ficam entre 0,67 e 0,86 e costumam ser adotados por autores como sendo 0,8 para aços liga de C-Mn e variam para aproximadamente de 0,5 a 0,6 quando há presença de outros elementos de liga como o nióbio (SICILIANO; JONAS, 2000).

A DRX depende de fatores externos e intrínsecos ao material (tamanho inicial de grão, temperatura e taxa de deformação), cujos fatores influenciam diretamente o nível de tensão da curva tensão-deformação e a deformação crítica (SOUZA, 2019).

Para analisar os efeitos da temperatura e da taxa de deformação, os parâmetros de Zener-Hollomon ( $Z$ ) são utilizados com frequência nos estudos da literatura. A deformação de pico ( $\varepsilon_p$ ) é relacionada em função de  $Z$ , de acordo com a Equação 3 (KIRIHATA et al., 1998):

$$\varepsilon_p = C \cdot d_0^p \cdot Z^q \quad (3)$$

sendo que  $C$ ,  $p$  e  $q$  são constantes que dependem do material.

A DRX pode ser descrita de acordo com o modelo de Avrami, chamada também de equação Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami (KJMA), representada na Equação 4 (SENUMA; YADA, 1986):

$$X_{DRX} = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,5}} \right)^n \right] \quad (4)$$

onde  $X_{DRX}$  é a fração recristalizada dinamicamente,  $n$  é o expoente de Avrami e  $\varepsilon_{0,5}$  é a deformação no ponto de 50% de recristalização, dada por:

$$\varepsilon_{0,5} = c \cdot \dot{\varepsilon}^s \exp \left( \frac{Q_{DRX}}{RT} \right) \quad (5)$$

sendo que  $c$  e  $s$  são constantes que variam de acordo com o material,  $Q_{DRX}$  é a energia de ativação para a recristalização dinâmica,  $T$  é a temperatura [Kelvin] e  $R$  é a constante universal dos gases [ $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ].

Por fim, o tamanho de grão obtido na recristalização dinâmica ( $d_{DRX}$ ) depende da temperatura e taxa de deformação, calculada através da Equação 6:

$$d_{DRX} = C' \cdot \dot{\varepsilon}^b \exp \left( \frac{Q_{dDRX}}{RT} \right) \quad (6)$$

### 2.2.4 Cinética de Recristalização Estática

Para que iniciada o fenômeno de recristalização estática (SRX) pela nucleação e crescimento de novos grãos, há necessidade de um tempo de incubação e uma determinada quantidade de energia armazenada, a qual deve ser maior que um certo valor crítico, dado de acordo com o material. A direção preferencial de nucleação dos grãos gerados se dá pela direção da maior deformação local. Já a força motriz é a energia armazenada no material na forma de discordâncias, que depende da taxa de deformação e da deformação aplicada ao longo dos passes (SICILIANO, 1999).

O modelo matemático da cinética de SRX é baseada na equação de Avrami modificada, também extraída do estudo de Sellars e Davies (1980). Para a SRX, o tempo  $t_{0,5}$  do material é calculado em função do tamanho inicial do grão ( $d_0$ ), da temperatura ( $T$ ), da deformação efetiva  $\varepsilon$  e de constantes que dependem do material, dada por:

$$t_{0,5} = a \cdot d_0^h \cdot \varepsilon^{m'} \exp\left(\frac{Q_{SRX}}{RT}\right) \quad (7)$$

Para calcular o tamanho de grão gerado após a finalização da SRX ( $d_{SRX}$ ) [ $\mu\text{m}$ ] dada pela Equação 8 que relaciona a deformação aplicada no passe e o tamanho inicial do grão no mesmo passe (SELLARS; DAVIES, 1980).

$$d_{SRX} = B \cdot d_0^u \cdot \varepsilon^v \quad (8)$$

onde  $B$ ,  $u$  e  $v$  constantes que dependem do material e  $d_0$  é o tamanho inicial do grão [ $\mu\text{m}$ ]. O tamanho final do grão aumenta com o aumento do tamanho inicial do mesmo e diminui com o aumento da deformação imposta, pois, grãos inicialmente pequenos geram uma maior densidade de discordâncias, mesmo fenômeno ocorre com o aumento da deformação. Consequentemente, a taxa de nucleação se eleva, resultando em grãos recristalizados com dimensões menores (grãos mais finos), com isso,  $u$  apresenta valores positivos e  $v$ , valores negativos (SOUZA, 2019).

### 2.2.5 Cinética de Recristalização Metadinâmica

Quando ocorre uma interrupção da deformação em elevadas temperaturas durante a recristalização dinâmica, ou seja, após a deformação crítica, muitos núcleos

ainda continuam presentes no interior do material e crescem via migração dos contornos de grãos. Tal fenômeno pode prosseguir com a migração e os núcleos apresentar crescimento sem a necessidade de um período de incubação e para isso, há o processo de amaciamento conhecido como recristalização metadinâmica ou pós-dinâmica (MDRX). Este processo pode ser observado em conformação a quente quando o material é submetido a uma redução não atingida do regime do estado estacionário, todavia, atinge ou supera a deformação crítica (SOUZA, 2019).

A MDRX apresenta uma cinética diferente de outros mecanismos de recristalização, pois não apresentar período de incubação, já que os núcleos foram formados durante a aplicação da deformação, além de não depender de elementos de liga e da temperatura (HODGSON; GIBBS, 1992):

De acordo com Sellars e Davies (1980) a equação que descreve a cinética da MDRX pode ser obtida através da equação de Avrami modificada, a qual considera uma constante empírica de tempo para 50% de recristalização ( $t_{0,5}$ ) [s], representada pela Equação 9:

$$X_{MDRX} = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{t}{t_{0,5}} \right)^n \right] \quad (9)$$

sendo  $X_{MDRX}$  a fração recristalizada dado o tempo  $t$ , e  $n$  é o expoente de Avrami que varia de acordo com a liga e o tipo de mecanismo atuante. Além disso,  $t_{0,5}$  é uma função relacionada com a taxa de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) representada na Equação 10:

$$t_{0,5} = a' \cdot \dot{\epsilon}^{m'} \exp \left( \frac{Q_{MDRX}}{RT} \right) \quad (10)$$

onde  $a'$  e  $m'$  são constantes que dependem do material e  $Q_{MDRX}$  é a energia de ativação para a recristalização metadinâmica.

### 2.2.6 Crescimento de Grão

Para se obter um modelo de análise microestrutural que se aproxime da realidade, é necessário descrever corretamente o efeito de crescimento de grão austenítico ao longo do tempo após a finalização da recristalização. Ao fim da recristalização ocorre o crescimento de grão se o material for mantido em altas

temperaturas, com isso, ocorre rápida difusão, a qual é favorecida ao longo dos contornos de grão. A energia dessas regiões passa a atuar como potencial termodinâmico favorecendo o crescimento de grãos, conseqüentemente, há diminuição da área total desses contornos de grão. Uma equação que descreve esse fenômeno de crescimento de grão é dada pela Equação 11 (SELLARS; DAVIES, 1980):

$$d^m = d_0^m + k \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-Q_{cg}}{RT}\right) \quad (11)$$

onde,  $k$  é uma constante,  $m$  é o expoente de crescimento,  $t$  é o tempo posterior a recristalização [s] e  $Q_{cg}$  é a energia de ativação para o crescimento do grão.

### 2.2.7 Tamanho do Grão com Recristalização Incompleta

Caso ocorra recristalização incompleta, o tamanho de grão ( $d_f$ ) deve ser calculado utilizando uma regra das misturas, considerando o tamanho final de grão no passe anterior ou tamanho inicial do grão no passe ( $d_0$ ) [ $\mu\text{m}$ ] e a fração recristalizada ( $X$ ), dada por (SOUZA, 2019):

$$d_f = d_{inc} \cdot X + (1 - X) \cdot d_0 \quad (12)$$

sendo que  $d_{inc}$  é o tamanho de grão após recristalização incompleta [ $\mu\text{m}$ ].

## 2.3 DIAGRAMA DE FASES PARA LIGAS Fe-C

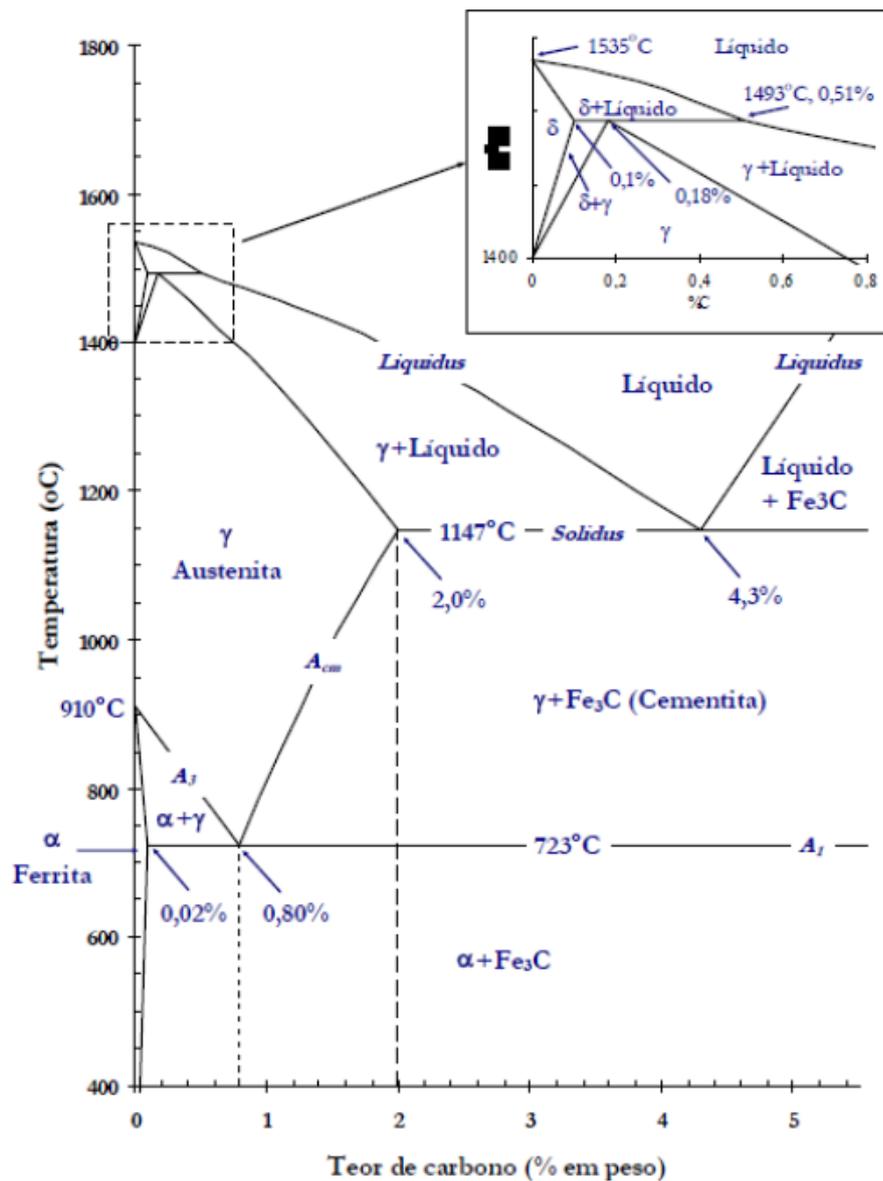
De acordo com Rebechi (2011), o Diagrama de Fases Fe-C é a base para estudos das transformações de fases esperadas em aços (teor de carbono até 2,11%) e ferros fundidos (acima de 2,11% de carbono) considerando diferentes combinações de temperatura e teor de carbono. A Figura 4 ilustra o diagrama de fases Fe-C com teor de carbono até 5,5%.

O diagrama presente na Figura 4 corresponde a uma liga binária de Fe-C, porém, os aços apresentam outros elementos de liga em sua composição, seja por resíduos provenientes de processos de fabricação ou mesmo por adição visando melhores propriedades mecânicas. Elementos como S, P, Si e Mn em baixos teores

não alteram o diagrama de fases Fe-C convencional (REBECHI, 2011).

Segundo Rebechi (2011), na região da austenita (fase  $\gamma$ ) do diagrama, foram destacados três limites de mudança de fase, sendo estes nomeados de  $A_1$  (linha de temperatura eutetóide),  $A_3$  (limite entre os campos ferrita-cementita e austenita) e  $A_{cm}$  (limite entre os campos cementita-austenita e austenita).

Figura 4 - Diagrama de Fases do Fe-C.



Fonte: Zambon (2011).

Com as diferentes fases, há diferentes microestruturas presentes no material. Características da fase controlam as propriedades mecânicas finais, destacando-se

dureza, tenacidade, resistência e ductilidade de qualquer aço. Os aços apresentam uma vasta diversidade de microestruturas, gerando diversas combinações de resistência e dureza (TOTTEN, 2006 apud REBECHI, 2011).

Estas considerações serão adotadas de forma genérica para uma interpretação qualitativa e aproximada ao aço SAE 4140.

## 2.4 DIAGRAMA TEMPO-TEMPERATURA-TRANSFORMAÇÃO (TTT)

O diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT) é utilizado para analisar a transformação de fases conforme a taxa de resfriamento. Para um material austenitizado e de acordo com o resfriamento imposto, podem surgir fases como bainita e martensita, além de ferrita, perlita e cementita. Com base nesse diagrama, é possível analisar o comportamento quando submetido aos mecanismos de recristalização e como a temperatura e o resfriamento podem impactar no crescimento de grão do material (ZAMBON, 2011). A Figura 5 ilustra o diagrama TTT para o aço SAE 4140.

No caso do aço, o mecanismo de crescimento de grão durante o processo de laminação a quente consiste em quatro estágios, iniciando com a recristalização dinâmica durante a deformação a quente aplicada pelos cilindros laminadores. Posteriormente, ocorrem as recristalizações estática e a metadinâmica após o fim das deformações e no final das etapas ocorre o crescimento dos grãos (SOUZA, 2015).

Figura 5 - Diagrama TTT para o aço SAE 4140.



Fonte: Rasma (2015).

## 2.5 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)

A evolução da tecnologia e aumento da capacidade dos computadores, aliados à uma maior complexidade de estruturas e componentes de máquinas, ocorreu o surgimento de programas computacionais. Estes programas otimizaram o tempo gasto em análises de métodos numéricos, nomeado de análise por elementos finitos (FEA). O objetivo deste método é a obtenção de uma formulação de sistemas complexos que possa ser realizada de forma automática, por intermédio de programas computacionais. Para tal, o FEA considera o sistema global de maneira equivalente a um conjunto de elementos finitos (EF), no qual cada elemento é caracterizado por uma estrutura contínua simplificado. Os nós são dados pela união de pontos comuns a vários elementos, onde são impostos que deslocamentos sejam compatíveis e forças internas estejam em equilíbrio com o sistema global, resultando em um agrupamento reagindo como uma única entidade (TAVARES, 1998).

Embora o FEA considere os EF individuais como sendo contínuos é, em resumo, um procedimento de discretização, já que considera os deslocamentos em qualquer ponto do elemento em termos de um valor finito de deslocamentos aplicados nos pontos nodais considerando funções de forma apropriadas (TAVARES, 1998).

Dentre as vantagens do FEA, pode-se destacar: a equação de movimento do sistema global em termos do agrupamento dos cálculos individuais para cada EF, movimento em qualquer ponto do elemento é obtido através de interpolação polinomial de grau reduzido e iguais para o mesmo tipo de elementos, além da facilidade com a maneira de se conseguir generalizar problemas complexos para a resoluções bidimensionais e tridimensionais constituídos por diversas variáveis e com fronteiras irregulares (TAVARES, 1998).

De acordo com Tavares (1998), no estudo por FEA de casos de problemas estáticos, como em análise estrutural, é comum derivar a matriz de rigidez, através da abordagem direta, a qual relaciona o vetor de deslocamentos com o das forças, ambos nodais. Porém, essa abordagem apresenta dificuldades em problemas dinâmicos, nestes casos é preferível se obter, para cada elemento individual, a derivação das matrizes de rigidez e massa e do vetor das forças nodais, a partir das energias cinética e potencial, além dos trabalhos virtuais.

No estudo de Ma (2016), foi realizado a simulação de um processo de

laminação a quente assimétrica, os cálculos do FEA mostraram que a deformação total imposta sobre a peça foi mais concentrada nas superfícies do material e quase duas vezes maior quando comparados com o centro. Além disso, a distribuição homogênea da deformação de cisalhamento foi responsável pelo controle da cinética de recristalização estática de várias camadas de deformação, resultando no gradiente de microestrutura através da espessura da placa.

A Figura 6 exemplifica uma resposta de temperatura dada pelo FEA em uma simulação do processo de laminação a quente, extraído do estudo de Sousa (2015).

Figura 6 - Exemplo de resposta em °C dada pelo programa computacional de elementos finitos após uma análise de deformação de uma chapa laminada.



Fonte: Souza (2015).

### 2.5.1 Programas para Análise por Elementos Finitos

Da vasta gama de programas computacionais do mercado, o DEFORM™ 3D é um código baseado em FEA voltado para estudos de vários processos de conformação mecânica e tratamento térmico. Dentre suas características, esse programa computacional é capaz de modelar interações complexas entre deformação, transferência de calor e transformação de fases (SOUZA, 2019).

O ponto negativo para a utilização do DEFORM™ 3D se dá pela necessidade do método remalha durante a simulação por conta da inabilidade em modelagem de elevadas distorções da malha (GIORJÃO, 2019).

De acordo com Souza (2019), o DEFORM™ é composto por três componentes de execução, sendo eles: pré-processador, processador e pós-processador.

- Pré-processador: etapa de inserção de dados de entrada para os cálculos no processador. Esses dados são: descrição e modelagem dos

objetos, as propriedades do material, condições de contorno e controles de simulação. Ao final, é gerado um arquivo de base de dados que será usado no processador.

- Processador: extrai as informações do processo a ser simulado com base no arquivo de base de dados, em seguida calcula a solução do problema e adiciona os resultados no mesmo arquivo. Ainda durante o cálculo, o processador relata informações sobre o andamento da simulação em um arquivo de mensagem exibido na tela do programa computacional. Essas informações abrangem a verificação dos critérios de convergência e apresentam mensagens de erro, quando ocorrem divergências no cálculo.
- Pós-processador: lê e apresenta os resultados dos cálculos do arquivo de base de dados em uma interface gráfica. Ademais, o pós-processador permite que os resultados sejam exportados em formato de dados numéricos.

Durante o pré-processamento, há os controles de simulação, os quais consistem nos dados e informações gerais que o programa utiliza para identificar o problema. Inclui nessa etapa, instruções sobre os métodos de cálculo que o sistema deve usar para resolver o problema, as condições do ambiente de processamento, quais processos físicos devem ser modelados, a quantidade de passes a serem usados ao longo do processo, entre outros (SOUZA, 2019).

Com base no estudo apresentado por Souza (2019), o controle de simulações se dá por janelas do programa computacional, as quais são selecionadas opções de cálculo e em alguns momentos se imputa valores de referências. Inicialmente, é dada escolha do sistema de unidades para o problema, sendo esses: sistema internacional (SI) ou sistema inglês; há a definição do tipo de simulação a ser feita e escolhe-se quais módulos devem estar ativados, deformação e transferência de calor. Posteriormente, é possível definir: a quantidade de passes da simulação, o incremento para salvar os passes, qual a matriz primária e como vai ser o passo da simulação.

O DEFORM<sup>TM</sup> apresenta dois tipos de solucionadores, o Esparso que é uma solução direta, o qual faz uso da dispersão da formulação do FEA para otimizar a velocidade da solução. Já o solucionador de Gradiente Conjugado tenta resolver o problema numérico aproximando-se iterativamente da solução.

O programa computacional apresenta dois métodos de iteração, sendo o método Newton-Raphson recomendado para a maioria dos problemas, já que geralmente converge utilizando um número menor de iterações. No entanto, as soluções têm maior probabilidade de falhar ao convergir com esse método. Outro método disponível no DEFORM™ é a Iteração Direta, a qual tem mais probabilidade de convergir do que Newton-Raphson, mas geralmente requer mais iterações para tal.

Cada passo da simulação pode ser definido por incremento de tempo ou deslocamento, que quando levado em conta o número total de passes da simulação, é determinado a duração total do processo simulado.

Além disso, há o critério de remalha automática que pode ser adotado. Tal processo faz sentido em vista da possibilidade de surgir malhas com distorções elevadas, causadas pelo grau de deformação ao longo da simulação e que permite o cálculo dos componentes do tensor de deformações. Também no controle de simulação, há a definição das condições do processo e os parâmetros de iteração.

O pós-processamento apresenta os resultados de análises mecânicas do ponto de vista macroestrutural, tais como: deformação, tensões, deslocamentos, temperatura, entre outros. A resposta microestrutural é avaliada após o pós-processamento, há uma opção no DEFORM™ para avaliação microestrutural, as quais são solicitados valores de constantes para determinadas expressões de recristalização, recuperação e crescimento de grão.

### **2.5.2 Aspectos da Modelagem do Material**

De acordo com Deform3d (2017) para analisar o comportamento da deformação plástica de um determinado metal, é plausível considerar condições de deformação uniformes ou homogêneas. A tensão de fluxo de um material pode ser considerada como sendo a tensão de escoamento de um metal sob condições uniaxiais em função da deformação ( $\epsilon$ ), taxa de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) [ $s^{-1}$ ] e temperatura ( $T$ ) [Kelvin].

O programa computacional DEFORM™3D apresenta um banco de dados de materiais implementados com 145 conjuntos de dados, caracterizando gráficos de tensão-deformação dos materiais. As propriedades térmicas e elásticas não estão incluídas, sendo necessária a implementação desses dados antes das simulações.

### 2.5.2.1 Equação Constitutiva de Material

De posse dos dados da curva tensão-deformação do material em forma de tabela de dados, o usuário do DEFORM™ pode converter essas informações em uma equação de modelo. É possível também selecionar o modelo de material da lista disponível e ajustar os parâmetros para corresponder aos pontos da tabela, usando as técnicas de ajuste de curva. Para materiais anisotrópicos o DEFORM™ apresenta funções de escoamento quadráticas de Hill, já para os materiais isotrópicos é utilizado a teoria de von Mises.

A equação constitutiva do material para implementação no programa computacional é dada pela lei de potência, descrita na Equação 13:

$$\bar{\sigma} = c \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m + y \quad (13)$$

onde  $\bar{\sigma}$  é a tensão efetiva [MPa],  $\bar{\epsilon}$  é a deformação plástica efetiva,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  é a taxa de deformação efetiva [ $s^{-1}$ ],  $c$  é uma constante que depende do material,  $m$  e  $n$  são expoentes que depende das propriedades do material e  $y$  é o valor de tensão escoamento inicial [MPa].

Este método é altamente recomendado devido à sua capacidade de seguir o verdadeiro comportamento de um material. O usuário deve inserir os valores de deformação efetiva, taxa de deformação efetiva e temperatura.

### 2.5.2.2 Funções de Encruamento

De acordo com o programa computacional, dois modelos de encruamento estão disponíveis: cinemático e isotrópico. Para um material isotrópico, conforme ocorre a deformação plástica, a superfícies de escoamento se expande uniformemente ou isotropicamente. Portanto, a tensão de escoamento em todas as direções é a mesma. No entanto, no modelo cinemático, a superfície de escoamento muda conforme o material escoar, ou seja, é necessário analisar a cinemática de encruamento caso o efeito Bauschinger for modelado. Essa análise é válida apenas para materiais elasto-plásticos sob pequena deformação.

A Equação 8 calcula a tensão efetiva levando em consideração os efeitos do encruamento. A expressão relaciona a lei de potência (Equação 13) com a tensão de escoamento e a deformação de encruamento, sendo escrita como:

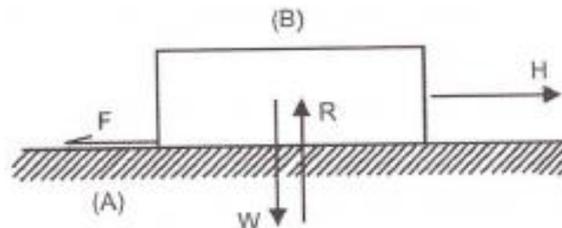
$$\bar{\sigma} = Y(T, A) + H(T, A) \cdot \bar{\epsilon} \quad (14)$$

onde  $Y$  é o valor da tensão inicial de escoamento [MPa], a qual depende da temperatura ( $T$ ) [Kelvin] e do conteúdo atômico do material ( $A$ ),  $H$  é a deformação de encruamento que também varia de acordo com a temperatura ( $T$ ) [Kelvin] e do conteúdo atômico do material ( $A$ ).

### 2.5.3 Aplicação e Modelos de Atrito no DEFORM™

A Figura 7 ilustra um experimento simples para caracterizar a força de atrito. Considerando uma superfície plana, as forças: peso  $W$  e reação  $R$  para o corpo B são iguais, mas com sentidos opostos. Caso o corpo B não entre em movimento com a aplicação de uma carga  $H$  paralela ao plano de contato, admite-se a existência de uma força  $F$ , de sentido contrário a  $H$ , atuando na superfície de contato entre os corpos, a qual é chamada de força de atrito. Caso o valor de  $H$  seja elevado o suficiente, o corpo B entra em movimento.

Figura 7 - Ilustração das forças atuantes no deslizamento de um corpo.



Fonte: Helman e Cetlin (2010).

Nesse experimento, é visto a relação entre a força de atrito  $F$  e a força de reação  $R'$ , normal ao plano de contato. Também, nota-se que esta relação depende da rugosidade superficial no contato e dos materiais dos corpos. A relação é descrita na Equação 15.

$$\mu = \frac{F}{R'} \quad (15)$$

onde,  $\mu$  é o coeficiente de atrito estático.

Após o início do deslizamento do corpo B, a força  $H$  necessária para manter o

movimento uniforme é menor, quando comparado a carga para iniciar este movimento. Com isso, tem-se uma nova força de atrito  $F'$ , chamada de força de atrito dinâmica, resultando em uma nova relação como descrita na Equação 16.

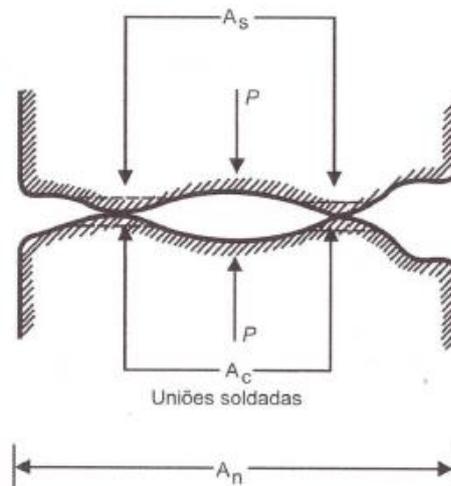
$$\mu' = \frac{F'}{R'} \quad (16)$$

sendo,  $\mu'$  o coeficiente de atrito dinâmico.

O processo da Figura 7 é denominado de “atrito seco”, o qual recebe essa nomenclatura para diferenciar-se do “atrito fluido”, que é caracterizado pela presença de uma camada fina de fluido entre os corpos. O atrito seco é comumente denominado por atrito de Coulomb ou coulombiano e é normalmente utilizado em processos de conformação mecânica, devido a simplificação conceitual.

De acordo com Helman e Cetlin (2010), em estudos e pesquisas mais recentes, partindo da interpretação elastoplástica do mecanismo de atrito seco, a teoria traz como resultado, em nível microscópico do contato, soldas decorrentes da rugosidade superficial expostas ao atrito. A Figura 8 apresenta uma representação do contato superficial de dois corpos em nível microscópico.

Figura 8 - Ilustração do contato microscópico entre duas superfícies sujeitas ao atrito.



Fonte: Helman e Cetlin (2010).

Para Helman e Cetlin (2010), a força de compressão  $P$ , pequena o suficiente, é capaz de produzir deformação plástica nestas irregularidades e conseqüentemente criar uma solda na fase sólida. Nesse caso, a força de atrito será caracterizada pela

resistência ao cisalhamento desta região soldada. Esse fenômeno é chamado de “atrito de cisalhamento”. O esforço de cisalhamento para romper a união é aplicado sobre um plano contendo a área de contato  $A_c$ . Todavia, a solda criada nessa região irá se romper em um plano um pouco mais afastado de  $A_c$ , sendo esse denominado  $A_s$ , já que ocorre um maior endurecimento nessa região soldada.

A força de atrito  $F''$  para a situação de cisalhamento é dada pela Equação 17:

$$F'' = k_s \cdot A_s \quad (17)$$

onde,  $k$  é a resistência ao cisalhamento.

Escrevendo a Equação 17 em função da carga  $P$  aplicada, tem-se a Lei de Coulomb, descrita na Equação 18:

$$F'' = \mu \cdot P \quad (18)$$

dividindo a Equação 18 pela área normal ao cisalhamento  $A_n$ , tem-se:

$$\tau = \mu \cdot P' \quad (19)$$

sendo  $p$  a pressão aplicada e  $\tau$  a tensão de atrito por cisalhamento. Em valores elevados de  $p$ , a tensão de atrito tende a tensão de escoamento por cisalhamento (HELMAN; CETLIN, 2010).

Durante a conformação mecânica, as superfícies dos metais não são compostas por materiais limpos, visto que podem haver impurezas, conseqüentemente, a união entre os metais nesse processo é dada por uma resistência ao cisalhamento  $k$  menor. Dessa maneira, reescrevendo a Equação 19, obtêm-se:

$$\tau = m \cdot k_s \quad (20)$$

onde,  $m$  é o coeficiente de atrito no cisalhamento.

De acordo com Deform3d (2017) o coeficiente de atrito especifica o movimento e o contato entre as interfaces de dois objetos. Este coeficiente pode ser descrito como uma constante ou uma função que pode ser dada pelo tempo ou pela pressão da interface de contato. Os tipos de atrito presentes no programa computacional são cisalhamento e Coulomb.

### 2.5.3.1 Atrito de Cisalhamento no DEFORM™

O modelo de atrito por cisalhamento constante é aplicado principalmente em simulações de conformação. A força de atrito de cisalhamento constante é definida por:

$$f_s = m \cdot k \quad (21)$$

onde  $f_s$  é a tensão de atrito por cisalhamento [MPa] de cisalhamento na interface,  $k$  é a resistência ao cisalhamento em [MPa] e  $m$  é o fator de atrito de cisalhamento. Nota-se que esse modelo de atrito é dado em função da tensão de escoamento do corpo deformador.

Ainda de acordo com o programa computacional, valores típicos usados para o fator de atrito de cisalhamento constante são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Valores típicos de fator de atrito de cisalhamento.

<b>m</b>	<b>Aplicação</b>
0,08 a 0,1	Processos de conformação a frio
0,2	Processos de conformação a quente
0,2 a 0,3	Processos de conformação a quente lubrificadas
0,7 a 0,9	Superfícies não lubrificadas

Fonte: Deform3d (2017).

A maioria dos processos não é extremamente sensível ao atrito e os valores típicos listados na Tabela 1 são perfeitamente adequados. Nos processos que apresentam maior sensibilidade às condições de lubrificação, os valores do fator de atrito podem ser determinados através de experimentação.

### 2.5.3.2 Atrito de Coulomb no DEFORM™

O atrito de Coulomb é utilizado quando há contato entre dois objetos deformados elasticamente ou um objeto elástico e outro rígido. Geralmente é aplicado para modelar processos de conformação de folhas. A tensão de atrito no modelo de Coulomb é dada por:

$$f_c = \mu_c \cdot p \quad (22)$$

onde  $f_c$  é a tensão de atrito para o modelo de Coulomb [MPa],  $p$  é a pressão de interface entre dois corpos [MPa] e  $\mu_c$  é o fator de atrito de Coulomb. Deve haver pressão interfacial entre dois corpos para que a força de atrito de Coulomb esteja presente. Se dois corpos entrarem em contato, entretanto, não haverá pressão entre os corpos, com isso não haverá atrito resultante.

#### 2.5.4 Cinética de Recristalização Dinâmica no DEFORM™

De acordo com o Deform3d (2017) a recristalização dinâmica é uma função que depende da deformação, taxa de deformação, temperatura e tamanho de grão inicial, cujas alterações variam com o tempo. A DRX é calculada na etapa imediatamente após a deformação parar. As temperaturas médias e a taxa de deformação do período de deformação são usadas como dados de entradas das equações.

O início da DRX geralmente ocorre após o material atingir a deformação crítica ( $\varepsilon_c$ ), descrita pela Equação 23:

$$\varepsilon_c = a_2 \cdot \varepsilon_p \quad (23)$$

onde  $a_2$  é uma constante que depende do material e  $\varepsilon_p$  é a deformação de pico correspondente a tensão de escoamento máxima, dada pela Equação 24:

$$\varepsilon_p = a_1 \cdot d_0^{n_1} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_1} \cdot \exp\left(\frac{Q_1}{RT}\right) + c_1 \quad (24)$$

onde  $a_1$ ,  $c_1$ ,  $m_1$  e  $n_1$  são constantes que depende do material,  $d_0$  é o tamanho inicial do grão,  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação e  $Q_1$  é a energia de ativação da deformação a quente,  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  é a temperatura absoluta [Kelvin].

A Equação 25 do modelo de Avrami é usada para descrever a relação entre a fração recristalizada dinamicamente ( $X_{drex}$ ) e a deformação efetiva ( $\varepsilon$ ), dada por:

$$X_{drex} = 1 - \exp\left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon - a_{10}\varepsilon_p}{\varepsilon_{0,5}}\right)^{k_d}\right] \quad (25)$$

onde  $a_{10}$ ,  $\beta_d$  e  $k_d$  são constantes que dependem do material e  $\varepsilon_{0,5}$  é a deformação

para 50% de recristalização, calculada de acordo com a Equação 26:

$$\varepsilon_{0,5} = a_5 \cdot d_0^{n_5} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_5} \cdot \exp\left(\frac{Q_5}{RT}\right) + c_5 \quad (26)$$

onde  $a_5$ ,  $c_5$ ,  $m_5$  e  $n_5$  são constantes que dependem do material,  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação efetiva e  $Q_5$  é a energia de ativação do material durante a recristalização.

O tamanho do grão recristalizado dinamicamente ( $d_{drex}$ ) [ $\mu\text{m}$ ] é calculado em função do tamanho inicial do grão ( $d_0$ ) [ $\mu\text{m}$ ], deformação efetiva ( $\varepsilon$ ), taxa de deformação efetiva ( $\dot{\varepsilon}$ ) e temperatura ( $T$ ) [Kelvin], conforme Equação 27:

$$d_{drex} = a_8 \cdot d_0^{h_8} \cdot \varepsilon^{n_8} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_8} \cdot \exp\left(\frac{Q_8}{RT}\right) + c_8 \quad (27)$$

onde  $a_8$ ,  $c_8$ ,  $h_8$ ,  $m_8$  e  $n_8$  são constantes que dependem do material e  $Q_8$  é a energia de ativação do material recristalizado dinamicamente. Para a condição de  $d_{drex} \geq d_0$ , tem-se  $d_{drex} = d_0$ .

### 2.5.5 Cinética de Recristalização Estática no DEFORM™

Conforme descrição do Deform3d (2017), no momento que se encerra a deformação sobre o material, a taxa de deformação e a deformação crítica são utilizadas para determinar se ocorre o mecanismo de recristalização estática ou metadinâmica.

O critério de ativação da recristalização estática se dá quando a deformação for menor que a deformação crítica de recristalização estática ( $\varepsilon_{cs}$ ), descrita pela Equação 28.

$$\varepsilon_{cs} = A \cdot \exp\left(b_1 - b_2 d_0 - \frac{Q_2}{T}\right) \quad (28)$$

onde  $A$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são constantes que dependem do material e  $Q_2$  é a energia de ativação do material.

A Equação 29 é uma expressão do modelo de Avrami modificada e é utilizada para descrever a relação entre a fração recristalizada estaticamente ( $X_{srex}$ ) e o tempo de recristalização ( $t$ ) [s], dada por:

$$X_{srex} = 1 - \exp \left[ -\beta_s \left( \frac{t}{t_{s0,5}} \right)^{k_s} \right] \quad (29)$$

onde  $\beta_s$  e  $k_s$  são constantes que dependem do material e  $t_{s0,5}$  é uma constante de tempo empírica para 50% de recristalização estática [s], calculada de acordo com a Equação 30:

$$t_{s0,5} = a_3 \cdot d^{h_3} \cdot \varepsilon^{n_3} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot \exp \left( \frac{Q_3}{RT} \right) \quad (30)$$

onde  $a_3$ ,  $h_3$ ,  $m_3$  e  $n_3$  são constantes que dependem do material e  $Q_3$  é a energia de ativação do material durante a recristalização.

O cálculo do tamanho do grão recristalizado estaticamente ( $d_{srex}$ ) [ $\mu\text{m}$ ] é realizado como uma função do tamanho inicial do grão, deformação efetiva, taxa de deformação efetiva e temperatura, dada pela Equação 31:

$$d_{srex} = a_6 \cdot d_0^{h_6} \cdot \varepsilon^{n_6} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_6} \cdot \exp \left( \frac{Q_6}{RT} \right) + c_6 \quad (31)$$

onde  $a_6$ ,  $c_6$ ,  $h_6$ ,  $m_6$  e  $n_6$  são constantes que dependem do material e  $Q_6$  é a energia de ativação do material recristalizado estaticamente. Para a condição de  $d_{srex} \geq d_0$ , tem-se  $d_{srex} = d_0$ .

### 2.5.6 Cinética de Recristalização Metadinâmica no DEFORM™

Segundo descrição do Deform3d (2017), o mecanismo de recristalização metadinâmica é semelhante ao processo de recristalização estática, porém com diferentes critérios de ativação e constantes de material.

Ao contrário da recristalização estática, o critério de ativação para a recristalização metadinâmica se dá quando a deformação for maior que a deformação crítica de recristalização estática ( $\varepsilon_{CS}$ ), conforme apresenta a Equação 28.

A fração de recristalização metadinâmica ( $X_{mrex}$ ) em função do tempo é expressa pelo modelo de Avrami modificado, de acordo com a Equação 32.

$$X_{mrex} = 1 - \exp \left[ -\beta_{md} \left( \frac{t}{t_{m0,5}} \right)^{k_{md}} \right] \quad (32)$$

onde  $\beta_{md}$  e  $k_{md}$  são constantes que dependem do material e  $t_{m0,5}$  é uma constante de tempo empírica para 50% de recristalização metadinâmica [s], expressa em termos Equação 33:

$$t_{m0,5} = a_4 \cdot d^{h_4} \cdot \varepsilon^{n_4} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_4} \cdot \exp \left( \frac{Q_4}{RT} \right) \quad (33)$$

onde  $a_4$ ,  $h_4$ ,  $m_4$  e  $n_4$  são constantes que dependem do material e  $Q_4$  é a energia de ativação do material durante a recristalização.

A função que calcula o tamanho do grão recristalizado metadinamicamente ( $d_{mrex}$ ) [ $\mu\text{m}$ ] é expressa como uma função do tamanho inicial do grão, deformação efetiva, taxa de deformação efetiva e temperatura, conforme Equação 34:

$$d_{mrex} = a_7 \cdot d_0^{h_7} \cdot \varepsilon^{n_7} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_7} \cdot \exp \left( \frac{Q_7}{RT} \right) + c_7 \quad (34)$$

onde  $a_7$ ,  $c_7$ ,  $h_7$ ,  $m_7$  e  $n_7$  são constantes que dependem do material e  $Q_7$  é a energia de ativação do material recristalizado metadinamicamente. Para a condição de  $d_{mrex} \geq d_0$ , tem-se  $d_{mrex} = d_0$ .

### 2.5.7 Crescimento de Grão no DEFORM™

O crescimento do tamanho de grão ( $d_r$ ) [ $\mu\text{m}$ ] ocorre antes do início da recristalização ou após seu término e pode ser calculada em função do tamanho de grão recristalizado ( $d_{rex}$ ) [ $\mu\text{m}$ ] ao qual varia de acordo com mecanismo de recristalização, ou seja:  $d_{rex} = d_{drex}$  para DRX;  $d_{rex} = d_{srex}$  para SRX e  $d_{rex} = d_{mrex}$  para MDRX. O valor de  $d_r$  é dado por:

$$d_r = \left[ d_{rex} + a_9 \cdot t \cdot \exp \left( -\frac{Q_9}{RT} \right) \right]^{1/m'} \quad (35)$$

onde  $a_9$  e  $m'$  são constantes que dependem do material e  $Q_9$  é uma energia de ativação para o crescimento de grão.

### 2.5.8 Recristalização Incompleta no DEFORM™

Quando qualquer tipo de mecanismo de recristalização ocorre de forma incompleta, a deformação retida ( $\varepsilon_i$ ) disponível no material para seguir outro tipo de recristalização pode ser expressa por um método de amolecimento uniforme, conforme Equação 36:

$$\varepsilon_i = (1 - \lambda \cdot X_{rex})\varepsilon_{i-1} \quad (36)$$

onde  $\lambda$  é uma constante que depende do material e  $X_{rex}$  é a fração de recristalização que varia de acordo com mecanismo de recristalização, ou seja:  $X_{rex} = X_{drex}$  para DRX;  $X_{rex} = X_{srex}$  para SRX e  $X_{rex} = X_{mrex}$  para MDRX.

Para calcular o tamanho do grão com recristalização incompleta ( $d$ ) [ $\mu\text{m}$ ], é necessário utilizar a lei da mistura, dada pela Equação 37:

$$d = X_{rex} \cdot d_{rex} + (1 - X_{rex}) \cdot d_0 \quad (37)$$

onde  $X_{rex}$  e  $d_{rex}$  dependem do mecanismo de recristalização e  $d_0$  é o tamanho inicial do grão [ $\mu\text{m}$ ].

## 2.6 ALGUMAS REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES PARA COMPARAÇÃO COM AS ANÁLISES NUMÉRICAS

De acordo com Garcia (2017), para o projeto de uma peça, é importante ter em mente as propriedades mecânicas para que a mesma apresente o desempenho pretendido. No caso das engrenagens, as quais são normalmente usadas em transmissões de movimento rotativos entre eixos, sendo a mais tradicional a engrenagem cilíndrica de dentes retos. Esta engrenagem apresenta baixo custo de produção quando comparada com os demais tipos. Ainda é necessário que o material da engrenagem mantenha um núcleo com características dúcteis e tenaz para melhor amortecimento de impactos.

De acordo com Shackelford (2015), conforme ocorre o crescimento do tamanho de grão proveniente da recristalização, há o aumento da ductilidade e redução da resistência mecânica.

Neste trabalho, foi adotado como referência de tamanho de grão recristalizado o estudo de Qian e Pan (2013). Desta forma, a base de valores adotados para os grãos da microestrutura da chapa nos quatro pontos analisados partiria, aproximadamente, de 14  $\mu\text{m}$  até 43  $\mu\text{m}$ . Para Qian e Pan (2013), que analisou a microestrutura em um anel de rolamento processado a quente, o menor valor de tamanho de grão correspondia a região da superfície do anel. Já os maiores valores de tamanho de grão foram localizados na região mais central do anel.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Nas análises numéricas foi adotado o DEFORM™ 3D, desenvolvido pela *Scientific Forming Technologies Corporation* (SFTC). Tal escolha se deu pela versatilidade do programa no tipo de verificação com base em EF de processos de fabricação, além do fato do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) deter a licença do mesmo.

A máquina adotada para execução das simulações FEA inclui um processador Intel i5® de quatro núcleos, conjuntamente com uma placa de vídeo com processador gráfico dedicado, 8 Gb de memória RAM e SSD de 256 Gb, o que melhora o desempenho do conjunto e tende a reduzir o tempo das simulações. O tempo consumido para execução de cada simulação 3D foi aproximadamente 3 horas, totalizando aproximadamente 200 horas ao longo do estudo.

#### 3.2 MÉTODOS

##### 3.2.1 Fluxogramas de Trabalho

O processo de cálculo é realizado conforme a Figura 9. A análise se inicia com a tomada de Decisões Preliminares, as quais envolvem toda discussão inicial do problema como tipo de estudo, avaliação estrutural, geometria e as condições de contorno. A etapa de Pré-Processamento trata-se da modelagem da geometria do problema e implementação da malha de EF, além de adição das propriedades de material e esforços envolvidos. O Processamento é a realização dos cálculos das equações envolvidas no modelo. Já o Pós-Processamento e a Interpretação dos Resultados são as etapas de análise dos resultados dos cálculos, caso a resposta seja coerente e satisfatória, é dado sequência no estudo, caso contrário é reavaliado o Pré-Processamento. As etapas de microestrutura, envolvendo o Modelo de Avrami, Solução e Interpretação seguem a mesma sequência do Pré-Processamento, Processamento e Interpretação dos resultados, porém voltado a microestrutura.



### 3.2.2 Propriedades da liga de aço SAE 4140

O material escolhido para o presente trabalho foi aço SAE 4140. Segundo Patan e Oliveira (2017), é um aço que apresenta boa resistência à torção e fadiga; também é chamado de aço-cromo-molibdênio, sendo classificado como aço para construção mecânica, ligado e especial. Este material é utilizado na indústria para fabricação de correntes industriais (PATAN; OLIVEIRA, 2017 e ZAMBON, 2011). A composição química (% de massa) está representada na Tabela 2.

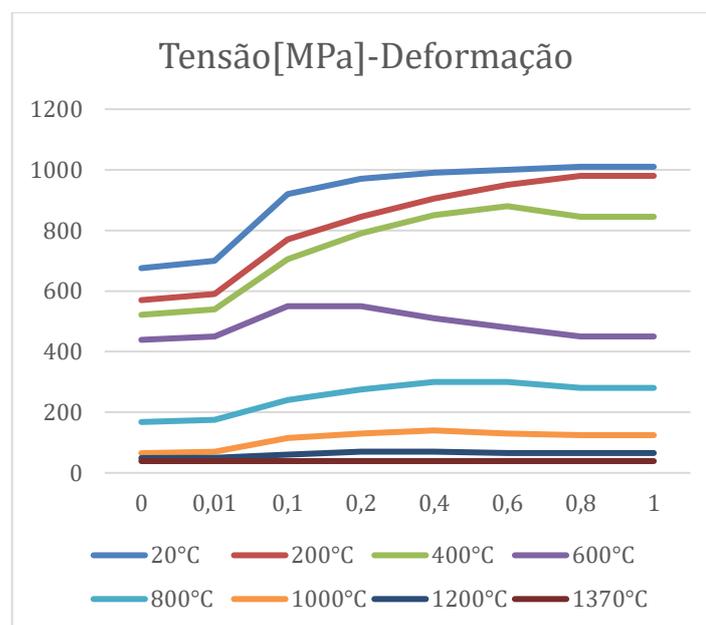
Tabela 2 - Composição química do aço SAE 4140 [% de massa].

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	Fe
0,45	0,75	0,35	1,19	0,21	0,017	0,019	97,01

Fonte: Senthilkumar et al. (2010).

O aço SAE 4140 está implementado no programa computacional seguindo as curvas de tensão-deformação, sendo que cada curva está relacionada a uma temperatura diferente. A Figura 10 apresenta as curvas tensão-deformação extraídas do DEFORM™ 3D, as quais desprezam o regime elástico do material.

Figura 10 - Curva Tensão-Deformação do aço SAE 4140 presente no DEFORM™ 3D.



Fonte: Deform3d (2017).

### 3.2.3 Implementação do Modelo FEA

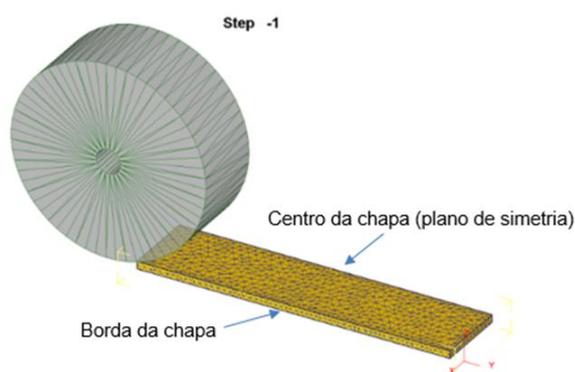
Os presentes estudos apoiaram-se em Souza (2015) e Qian e Pan (2013) para a obtenção de uma malha de tetraedros (interpolação linear com 4 nós) totalizando 14000 elementos e 1395 nós, conforme representado na Figura 11. Além disso, a malha foi pensada para que ser capaz de flagrar as distorções durante a aplicação da carga (MCWILLIAMS et al., 2013). Tipicamente foram obtidos de 6 a 10 tetraedros ao longo da espessura da chapa. Além disso, não foram utilizados elementos hexaédricos devido à limitação do programa computacional disponível.

Ainda no trabalho de Souza (2015), além da chapa, na modelagem fez-se com que o cilindro laminador, de material rígido, aplicasse uma interação com ela, sendo adotado atrito de cisalhamento com valor constante de 0,5.

O modelo construído para esse trabalho teve como base o trabalho de Souza (2015) com algumas simplificações, sendo: disponibilidade da curva tensão-deformação na biblioteca do programa computacional, além de não se adotar o *pusher* para movimentação da chapa.

Como condição de contorno estrutural, impõe-se aplicação de planos de simetria na chapa. No caso, foi aplicado esta condição em duas faces: lateral longitudinal direita (plano yz) e superfície inferior (plano xy). Esta condição restringe o movimento da chapa na direção perpendicular aos planos de simetria.

Figura 11 - Modelo criado no DEFORM™ para estudo.



Fonte: Próprio autor.

Todas as simulações foram realizadas seguindo o sistema internacional (SI) de unidades. As dimensões da chapa foram 295mm x 1264mm x 30,7mm, com cilindro

de diâmetro 787mm, largura de 300mm e velocidade angular de 3,06 RPM, valores baseados em Souza (2019). A deformação imposta pelo cilindro resultou em uma redução da espessura de 30,7mm para 20,7mm em um único passe para efeito de análise numérica.

Partiu-se da condição inicial de temperatura de 1200° C como referência para o processamento a quente da chapa de aço. As condições de contorno térmicas adotadas na modelagem 3D foram baseadas em Souza (2019), sendo assim, simetria nas faces lateral e inferior da chapa (conforme Figura 11), temperatura ambiente e do cilindro de 30° C, coeficientes de transferência de calor: por condução de  $40 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$  (por condução pura no material e também assumindo-se resistência térmica nula no contato cilindro-chapa) e por convecção de  $0,02 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ . Sabe-se que a imposição de uma resistência térmica nula não é realista, mas será adotado o valor máximo possível devido à falta de dados robustos na literatura pesquisadas até então.

O tensor taxa de deformação é calculado considerando cada nó, dessa forma os programas computacionais tem a opção de atribuir um valor médio de taxa de deformação para otimizar o tempo de cálculo. É um dado necessário de entrada para obtenção da relação constitutiva do material. Para realizar o recalque de metade da espessura da chapa, tem-se que a taxa de deformação seria de  $0,5 \text{ s}^{-1}$ . Analisando o tempo de processamento desse recalque na velocidade do cilindro de 3,06 RPM, tem-se que é necessário  $0,5 \text{ s}$  para completar a deformação de uma seção qualquer da chapa. Recalcando metade da espessura nesse tempo, resulta em uma taxa de deformação média de  $1,0 \text{ s}^{-1}$ . Para estudo do efeito dessa variação de taxa de deformação na laminação a quente, adotou-se também a taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  (aplicando a variação de  $\pm 0,5 \text{ s}^{-1}$ ).

Ainda na fase de pré-processamento, o algoritmo selecionado foi o Lagrangeano Incremental, pois segundo o programa computacional é usado em todas as aplicações convencionais de conformação, transferência de calor e tratamento térmico, além de processos mecânicos como laminação de chapa. Os modos selecionados para os cálculos da análise numérica foram adotados como deformação, transferência de calor e grão, já que possibilitam o estudo da recristalização.

O algoritmo de solução adotado para o estudo foi o Esparso já que visa a solução direta e otimiza a velocidade da solução e o método de iteração escolhido foi

a Iteração Direta devido a sua maior probabilidade de convergir, mesmo que seja necessária maior quantidade de iterações. A Tabela 3 apresenta os parâmetros adotados no DEFORM™ para as análises de tensão-deformação-temperatura.

Tabela 3 - Parâmetros de simulação adotados no DEFORM™ para estudo.

<b>Parâmetros</b>	<b>Adotado</b>
Sistema de Unidades	SI
Tipo de Simulação	Lagrangeano Incremental
Modos de Simulação	Deformação, Transf. de Calor e Grão
Número de passos da simulação	150
Incremento para salvar passos	1
Incremento de tempo	0,005
Solucionador Deformação	Esparso
Método de Iteração	Iteração Direta
Solucionador Temperatura	Esparso
Erro Limite Velocidade	0,001
Temperatura da Chapa e Ambiente	Chapa 1200°C e Ambiente 30 °C
Coefficiente de Convecção	0,02 kW/m <sup>2</sup> °C
Elementos de Malha	14000 de tipo Tetraédrico
Coef. de Transf. de Calor por Condução	40 kW/m <sup>2</sup> °C
Taxa de Deformação	1 s <sup>-1</sup>

Fonte: Próprio autor.

O trabalho de cálculo exige procedimentos que envolvem a parte conceitual do método de elementos finitos e seu pós-processamento básico para a obtenção do campo de tensões, deformações e temperaturas. O diferencial desta dissertação está na aplicação de um complemento de pós-processamento para cálculo de fenômenos associados à microestrutura e recristalização de grão. Ao se selecionar a peça, é possível atribuir um novo material ou selecionar da base de dados do programa computacional os parâmetros compatíveis a este pós-processamento complementar, que para estes estudos são referentes aos parâmetros das Equações 23 a 37 para realização dos cálculos de recristalização.

De acordo com a análise do problema do presente estudo, foram inseridos os valores das constantes das equações pertinentes a DRX. A Tabela 4 traz os parâmetros do aço SAE 4140 utilizados no DEFORM™ para a análise de recristalização e crescimento dos grãos, conforme trabalho de Qian e Pan (2013). Tais valores foram incluídos nas Equações 23 a 27. É importante frisar a necessidade de

se fazer experimentos adequados para a obtenção destes parâmetros. Por exemplo, a Energia de Ativação,  $Q_8$ , é um parâmetro cujo desvio nos valores experimentais tende a alterar drasticamente a determinação dos fenômenos envolvidos. De toda maneira, a determinação experimental destes parâmetros não faz parte do escopo deste trabalho e serão considerados os valores estritamente apresentados por Qian e Pan (2013).

Tabela 4 - Valores das constantes do modelo de Avrami para DRX adotadas no DEFORM™ para o aço SAE 4140.

<b>Constantes</b>	<b>Valores</b>
$a_2$	0,8
$a_1$	0,027
$m_1$	0,1809
$n_1$	0
$c_1$	0
$Q_1$	17096,08
$\beta_d$	1,8884
$a_{10}$	1
$k_d$	1,4539
$a_5$	0,1182
$m_5$	0,2139
$n_5$	0
$c_5$	0
$Q_5$	15813,23
$a_8$	221,8113
$h_8$	0
$m_8$	-0,1103
$n_8$	0
$c_8$	0
$Q_8$	-17508,5

Fonte: Qian e Pan (2013).

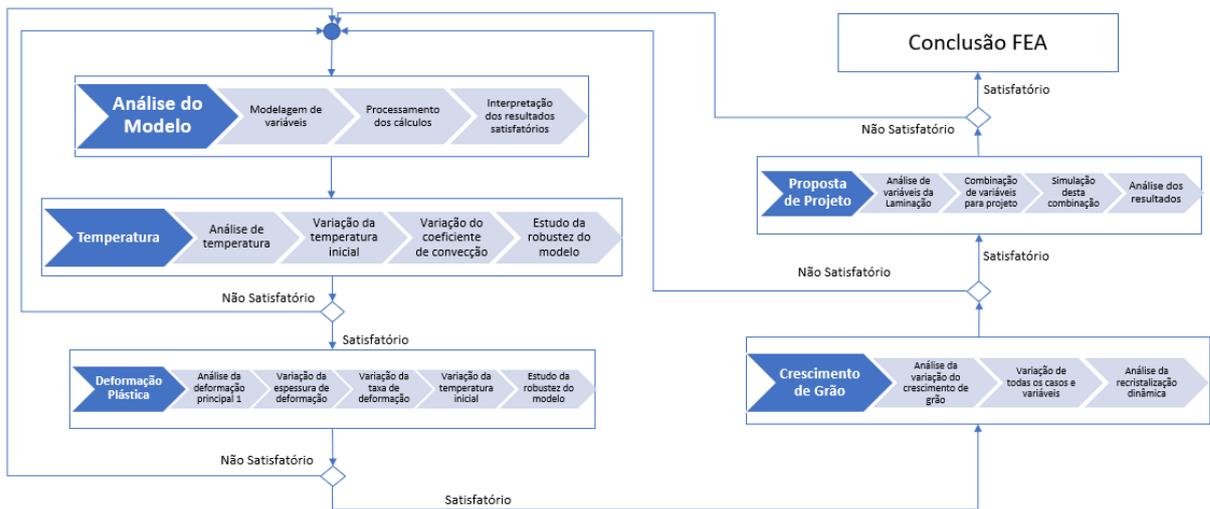
### 3.2.4 Previsão de Tamanho do Grão após a Recristalização Dinâmica – Casos a Serem Analisados

Para a previsão do tamanho de grão após a recristalização dinâmica, apoia-se em uma análise de sensibilidade da modelagem em que se opta pela variação dos parâmetros ligados diretamente ao processo de laminação a quente da chapa, tais como: temperatura inicial da chapa, taxa de deformação, fator de atrito de

cisalhamento, dimensão da redução da espessura e coeficiente convectivo. As demais variáveis foram adotadas com valores fixos.

O planejamento de cálculos e análise de resultados deste trabalho foi realizado conforme a Figura 12. Após a modelagem do problema, foi avaliada a robustez do mesmo quanto as distribuições térmicas e espaciais de temperatura da chapa em resposta às condições de contorno de temperatura inicial e transferência de calor por convecção. Posteriormente a essa validação, foi novamente avaliada a robustez com relação a resposta tensão-deformação do sistema através da deformação principal 1 a partir das condições de redução de espessura, taxa de deformação e temperatura inicial. Por fim, com ambos os casos validando o modelo computacional, foi feita a análise da variação do tamanho de grão para todas as propostas de simulação conforme os casos indicados na Tabela 5 visando o entendimento da resposta do sistema com relação a tais mudanças.

Figura 12 - Fluxograma do planejamento de cálculo e análise.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 - Parâmetros e suas variações para análise de sensibilidade de laminação a quente.

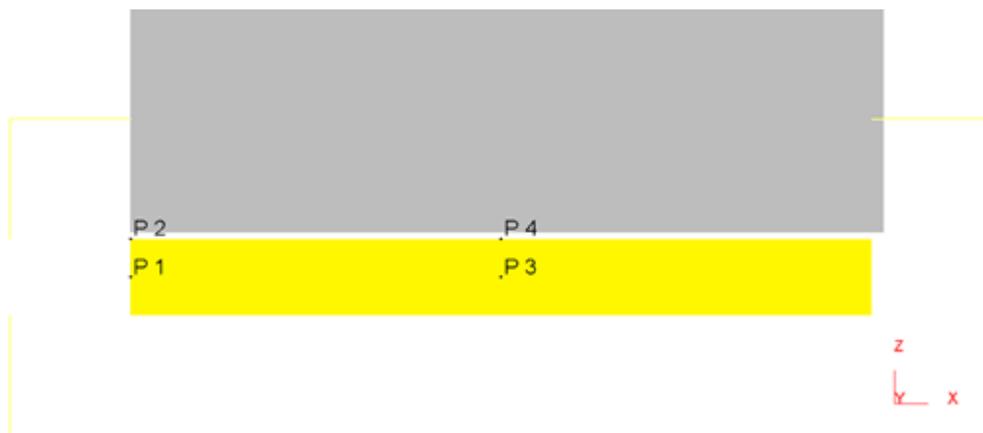
Caso	Temperatura da Chapa [°C]	Fator de Atrito de Cisalhamento	Redução de Espessura/Espessura Inicial [mm/mm]	Taxa de Deformação [s <sup>-1</sup> ]	Coefficiente Transferência Calor Convecção [kWm <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ]	Coefficiente Transferência Calor Condução [kWm <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ]	Geometrias	Temperatura Cilindro [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
1	1000	0,5	10/30,7	1	0,02	40	Fixa	30	30
2	1200	0,5	10/30,7	1	0,02	40	Fixa	30	30
3	1400	0,5	10/30,7	1	0,02	40	Fixa	30	30
4	1200	0,5	10/30,7	1	0,01	40	Fixa	30	30
5	1200	0,5	10/30,7	1	0,05	40	Fixa	30	30
6	1200	0,5	5/30,7	1	0,02	40	Fixa	30	30
7	1200	0,5	15/30,7	1	0,02	40	Fixa	30	30
8	1000	0,5	10/30,7	0,5	0,02	40	Fixa	30	30
9	1000	0,5	10/30,7	1,5	0,02	40	Fixa	30	30

Fonte: Próprio autor.

Este trabalho visa analisar as alterações de algumas das variáveis presentes no processo de laminação a quente, visando mapear o comportamento das mesmas ao longo do processo e assim propor um modelo de análise numérica que possa auxiliar as indústrias na otimização do processo com base em sua microestrutura final.

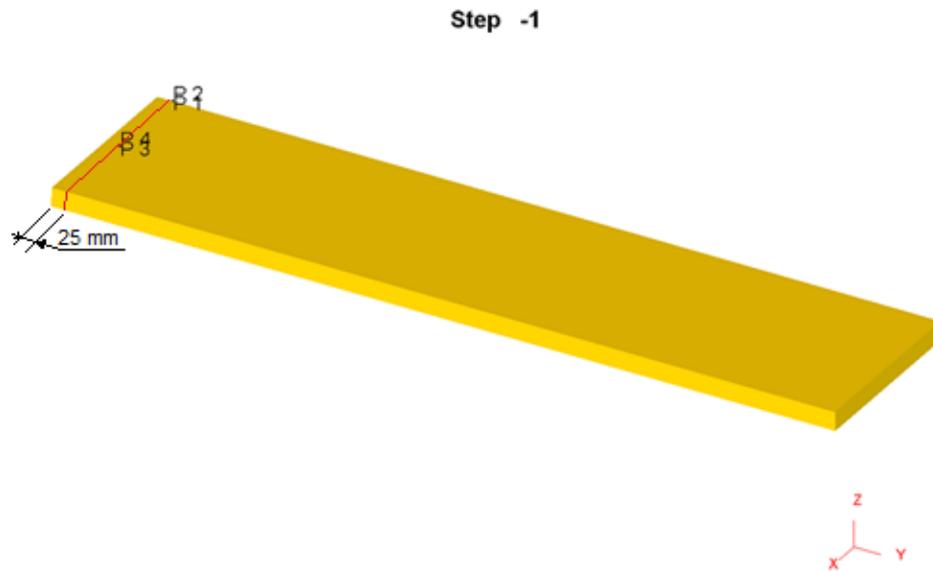
Para melhor entendimento do comportamento da chapa em relação a tensão-deformação, temperatura e do crescimento de grão, foram adotados 4 pontos de referência ao longo da espessura do *blank* e assim, pôde-se verificar o efeito das variáveis e as respostas do sistema ao longo processo. A Figura 13 ilustra a localização geométrica dos pontos analisados em relação a espessura da chapa e a Figura 14 apresenta a posição dos mesmos com relação a borda dianteira do *blank*, essa distância foi escolhida para evitar os efeitos de borda no estudo dos resultados.

Figura 13 - Posição geométrica na chapa dos quatro pontos escolhidos para análises.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Posição dos quatro pontos de análise com relação a face inicial.



Fonte: Próprio autor.

Os 4 pontos escolhidos para realizar a análise dos resultados estão localizados em um plano paralelo a borda da chapa, distante de 25 mm em na direção do eixo Y, conforme apresentados na Figura 14.

## 4 RESULTADOS

Enfatiza-se que para os resultados a seguir, os dados de entrada das análises foram extraídos de Qian e Pan (2013), sendo importante considerar embasamento experimental futuro para se averiguar o grau de sensibilidade destes fatores sobre os estudos numéricos. Ressalta-se que este trabalho deu continuidade nas análises apresentadas por Durello e Evangelista (2021).

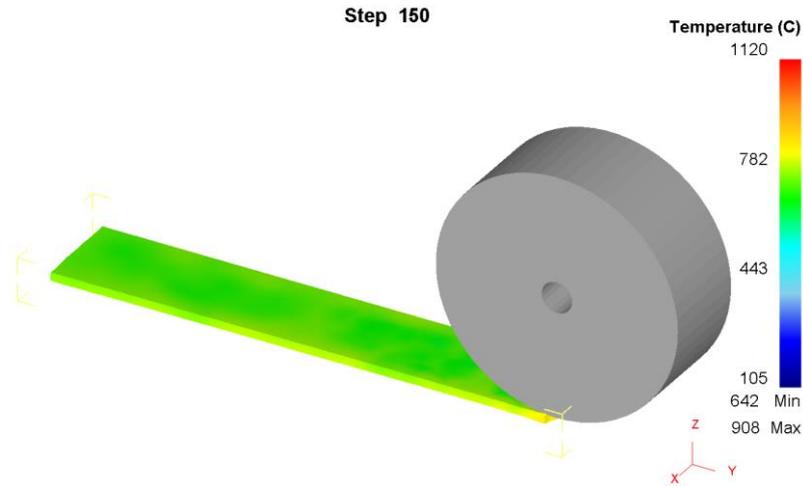
Inicialmente, foram avaliados os resultados das simulações com base na resposta do sistema à temperatura. Em seguida, foi estudado a resposta da chapa quanto a deformação, para enfim verificar os resultados para a simulação do modelo de Avrami e tamanho de grão recristalizado.

### 4.1 TESTE DE ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE - TEMPERATURA INICIAL

Para o estudo do comportamento geral e efeito da recristalização na chapa ao longo do processo de laminação a quente, é importante verificar previamente a consistência das distribuições de temperatura da mesma. Para isto, tomou-se alguns casos citados na Tabela 5, para os quais foram propostas combinações de temperatura inicial da chapa e coeficiente de convecção.

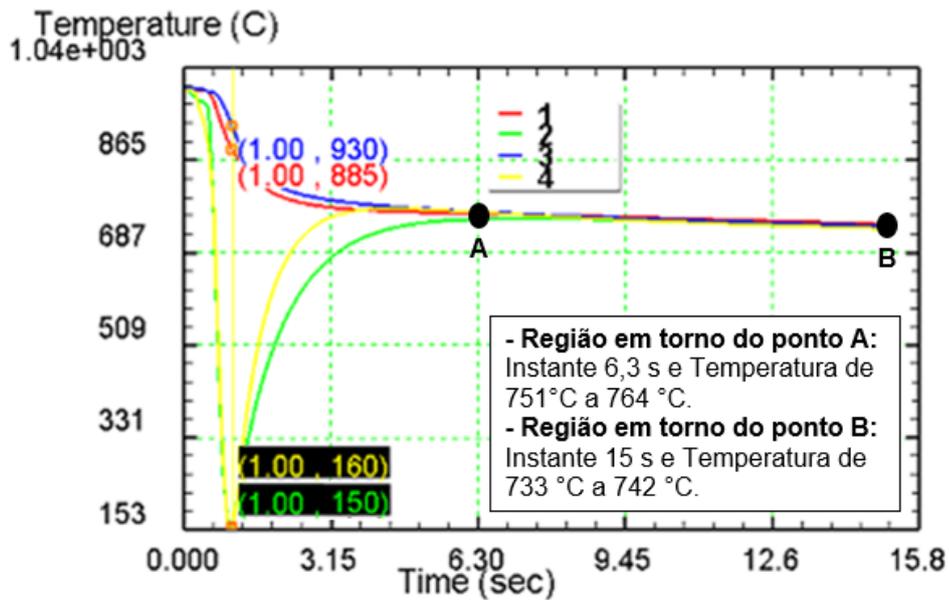
O resultado FEA para a temperatura ao longo da chapa no Caso 1 é ilustrado na Figura 15, após 15 segundos desde o início do processo. Escolhendo-se quatro pontos da chapa conforme a Figura 13, obtém-se o gráfico da simulação para temperatura inicial de 1000°C que estão apresentados na Figura 16.

Figura 15 - Resultado da análise de temperatura do Caso 1 após 15s. Temperatura inicial de 1000°C.



Fonte: Próprio autor.

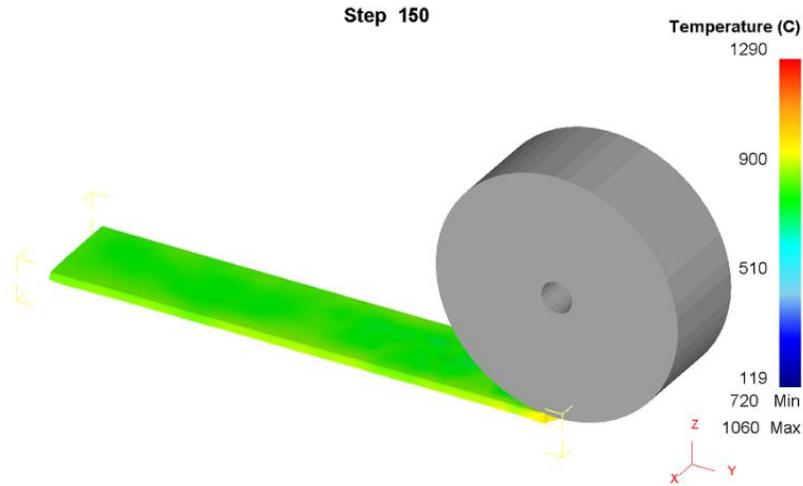
Figura 16 - Variação de temperatura do Caso 1 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1000°C.



Fonte: Próprio autor.

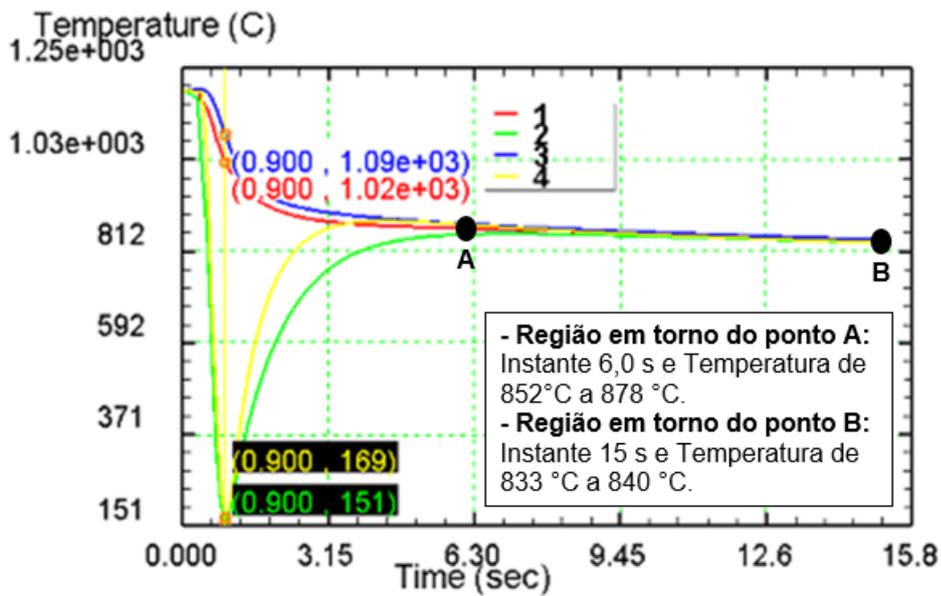
O resultado FEA para a temperatura ao longo da chapa no Caso 2 é ilustrado na Figura 17, após 15 segundos desde o início do processo. Escolhendo-se os quatro pontos na chapa conforme a Figura 13, obtém-se o gráfico da simulação para temperatura inicial de 1200°C que estão apresentados na Figura 18.

Figura 17 - Resultado da análise de temperatura do Caso 2 após 15s. Temperatura inicial de 1200°C.



Fonte: Próprio autor.

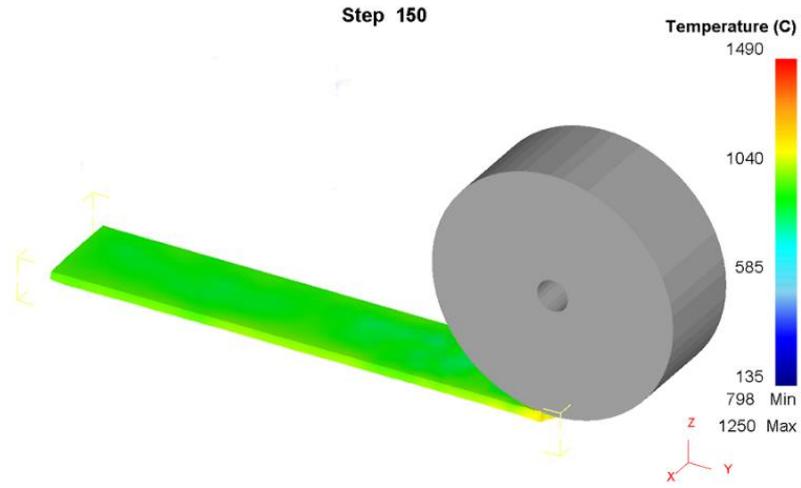
Figura 18 - Variação de temperatura do Caso 2 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1200°C.



Fonte: Próprio autor.

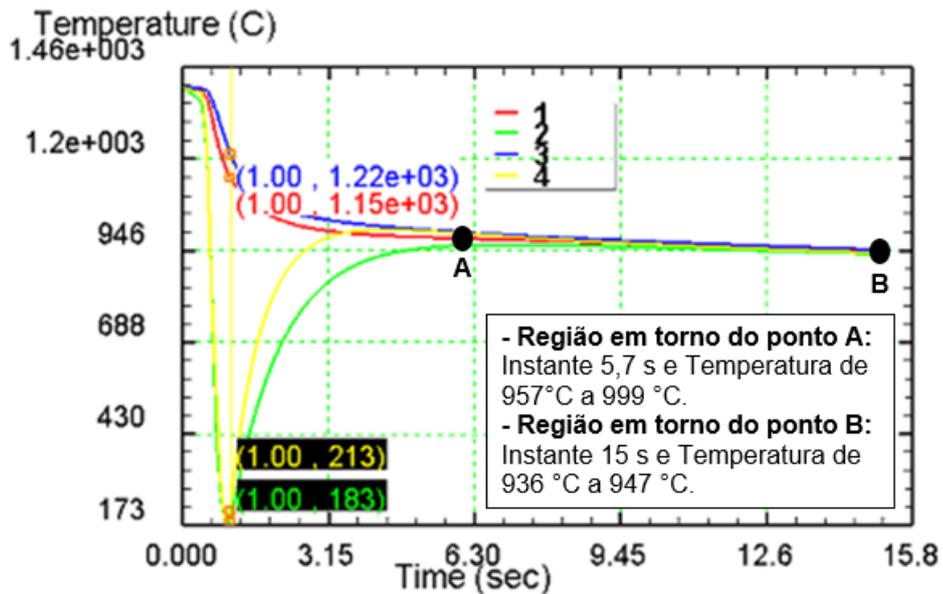
O resultado FEA para a temperatura ao longo da chapa no Caso 3 é ilustrado na Figura 19, após 15 segundos desde o início do processo. Escolhendo-se os quatro pontos na chapa conforme a Figura 13, obtém-se o gráfico da simulação para temperatura inicial de 1400°C que estão apresentados na Figura 20.

Figura 19 - Resultado da análise de temperatura do Caso 3 após 15s. Temperatura inicial de 1400°C.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Variação de temperatura do Caso 3 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1400°C.



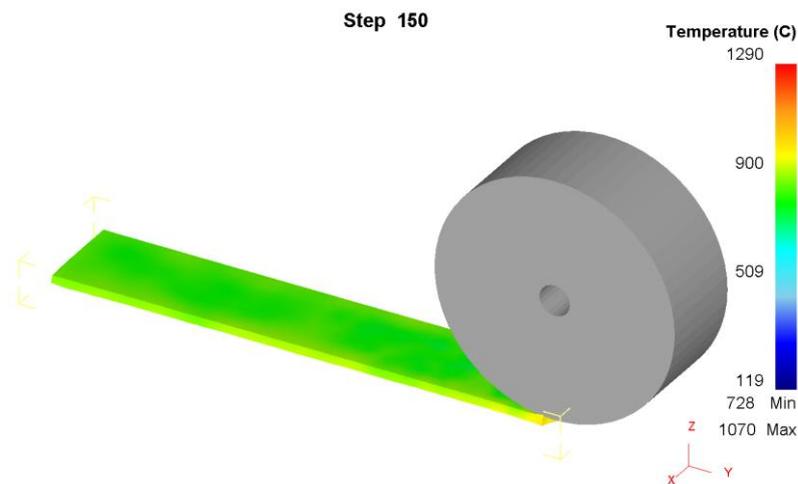
Fonte: Próprio autor.

Pode-se verificar nos Casos 1, 2 e 3 os gráficos de resposta da temperatura apresentaram a mesma forma de curva, sendo os pontos 2 e 4 destacados por um pico inferior de temperatura após o término de contato com cilindro (por estarem mais próximos da superfície de contato com o mesmo). Posteriormente, os mesmos pontos apresentam elevação da temperatura devido à capacidade térmica da chapa. Os pontos 1 e 3 (região central da espessura) apresentam as temperaturas mais elevadas, próximas a 1000°C. Após alguns segundos, as temperaturas nos quatro pontos se

estabilizam e ocorre o resfriamento lento e contínuo em toda a chapa.

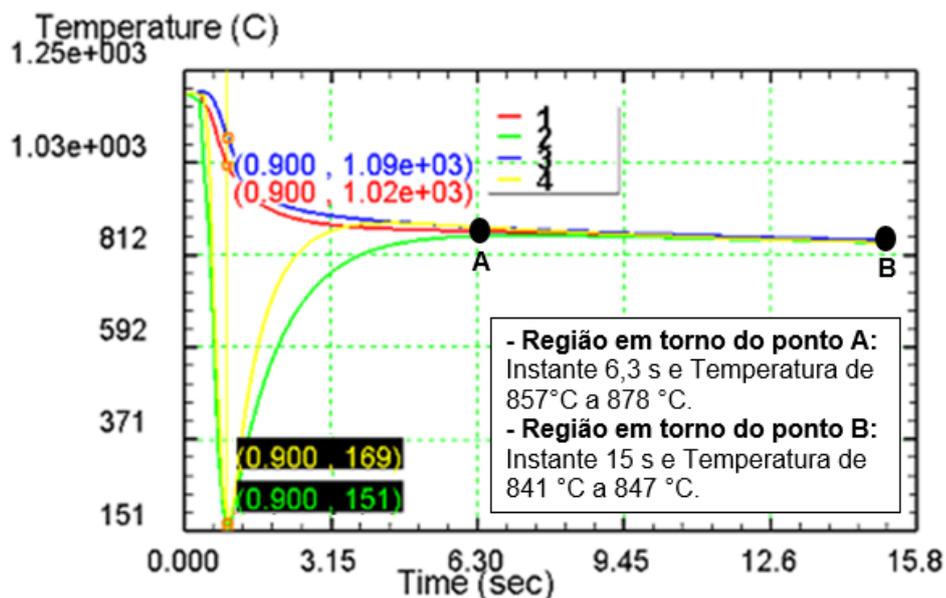
Avaliando o comportamento da temperatura com a alteração do coeficiente de transferência de calor por convecção para  $0,01 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ , pode-se destacar o resultado final desta análise presente na Figura 21 (Caso 4, Temperatura de  $1200\text{°C}$  conforme Tabela 5). Além disso, o gráfico do resultado dessa simulação nos quatro pontos estudados está apresentado na Figura 22.

Figura 21 - Resultado da análise de temperatura do Caso 4 após 15s. Coeficiente convectivo de  $0,01 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .



Fonte: Próprio autor.

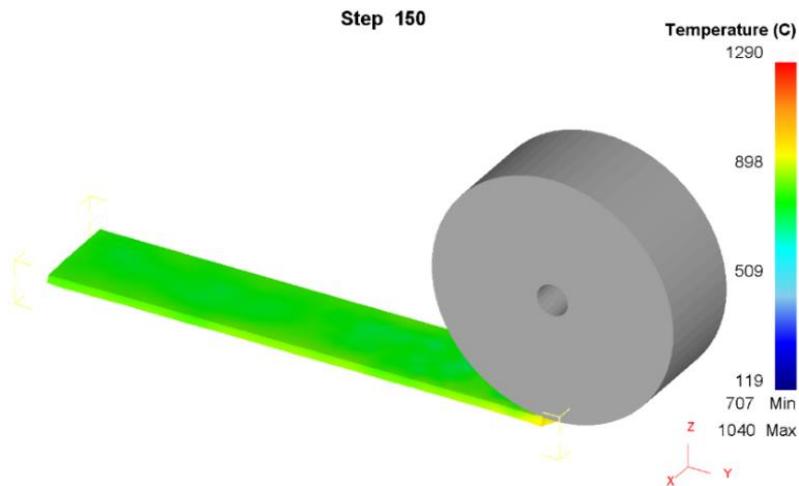
Figura 22 - Variação de temperatura do Caso 4 nos quatro pontos. Coeficiente convectivo:  $0,01 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .



Fonte: Próprio autor.

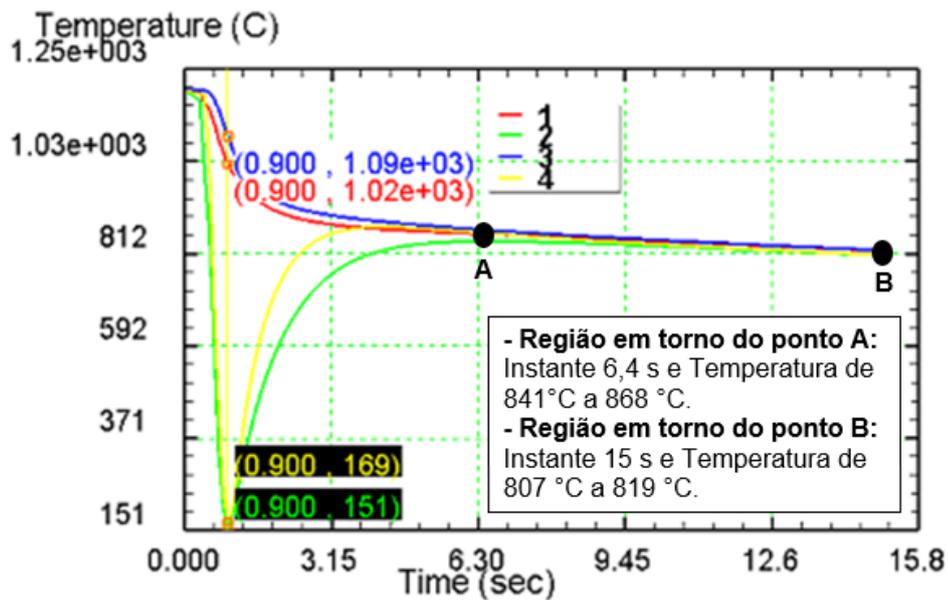
O resultado FEA para a temperatura ao longo da chapa considerando um coeficiente convectivo de  $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$  (Caso 5, Temperatura de  $1200\text{°C}$  conforme Tabela 5) é ilustrado na Figura 23. Escolhendo-se os quatro pontos no *blank*, obtém-se o gráfico da simulação para este coeficiente que está apresentado na Figura 24.

Figura 23 - Resultado da análise de temperatura do Caso 5 após 15s. Coeficiente convectivo de  $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Variação de temperatura do Caso 5 nos quatro pontos. Coeficiente convectivo:  $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .



Fonte: Próprio autor.

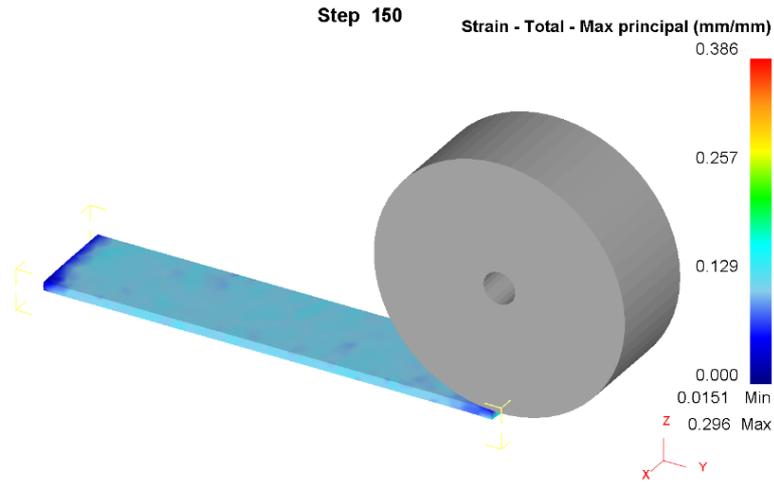
Comparando-se os resultados dos Casos 2, 4 e 5, cujos coeficientes convectivos usados foram  $0,02 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ ,  $0,01 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$  e  $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ , respectivamente. No escopo deste trabalho, considera-se que o modelo FEA está adequado para o prosseguimento das demais análises, a começar pela avaliação das deformações plásticas.

#### 4.2 TESTE DE ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE - DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

Além da análise da distribuição de temperatura, é importante avaliar a deformação da chapa após a passagem do cilindro. Para a proposta de simulações da Tabela 5, nota-se que foram combinadas diferentes condições para a redução de espessura, a partir de uma mesma espessura inicial do *blank*, o que impacta diretamente no estado de deformação da chapa. Além disso, foi avaliado a deformação da chapa com a mudança de temperatura inicial. Assim como no estudo da temperatura, nessas simulações e resultados, foi averiguado a coerência do modelo virtual.

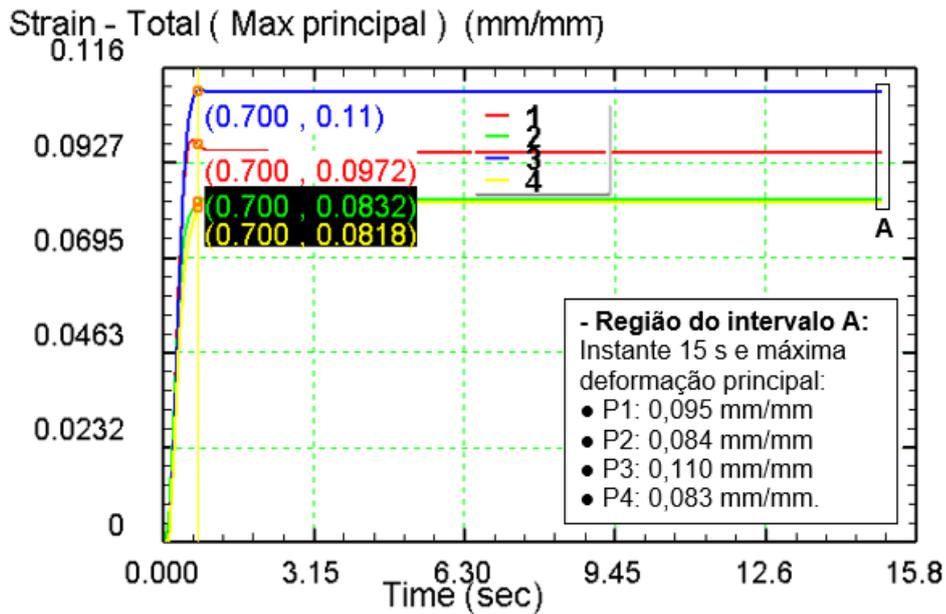
O resultado FEA da máxima deformação plástica principal ao longo da chapa para a redução de espessura de 5 mm com relação a espessura inicial de 30,7 mm é ilustrado na Figura 25 (Caso 6). Escolhendo-se os quatro pontos na chapa conforme Figura 13, obtém-se o gráfico da simulação que está apresentado na Figura 26.

Figura 25 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para redução de espessura de 5 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

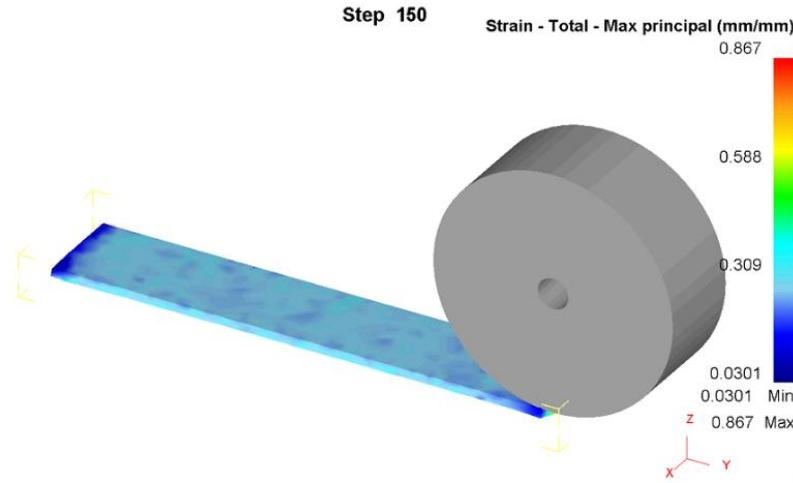
Figura 26 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Redução de espessura de 5 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

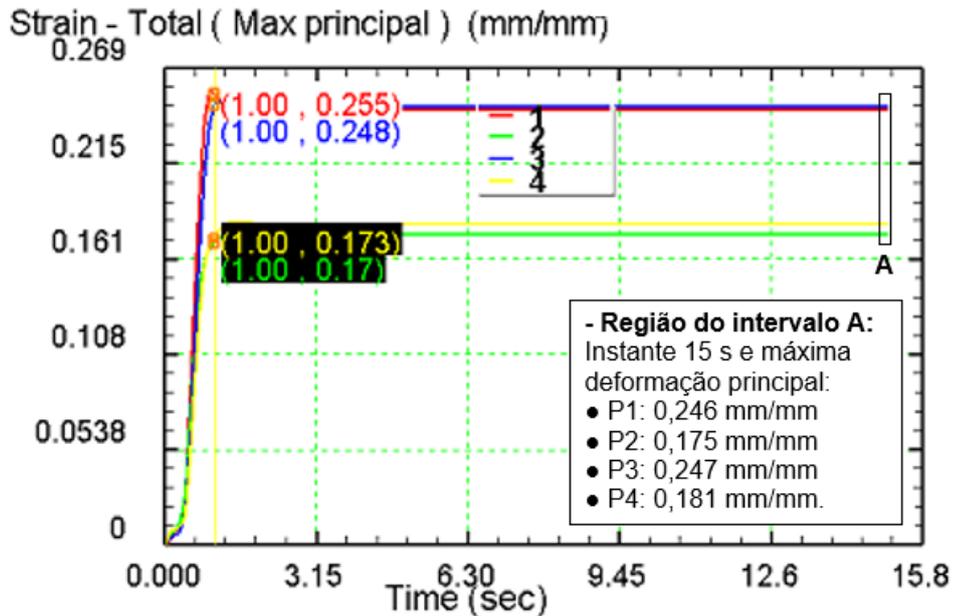
A máxima deformação principal ao longo da chapa para a redução de espessura de 10 mm com relação a espessura inicial de 30,7 mm é apresentada na Figura 27 (Caso 2). Escolhendo-se os quatro pontos na chapa conforme Figura 13, obtém-se o gráfico da simulação que está revelado na Figura 28.

Figura 27 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para redução de espessura de 10 mm (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

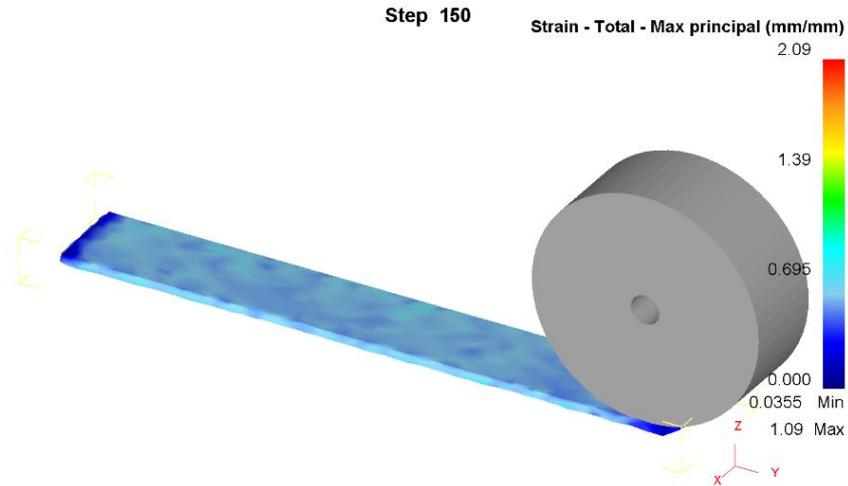
Figura 28 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Redução de espessura de 10 mm (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

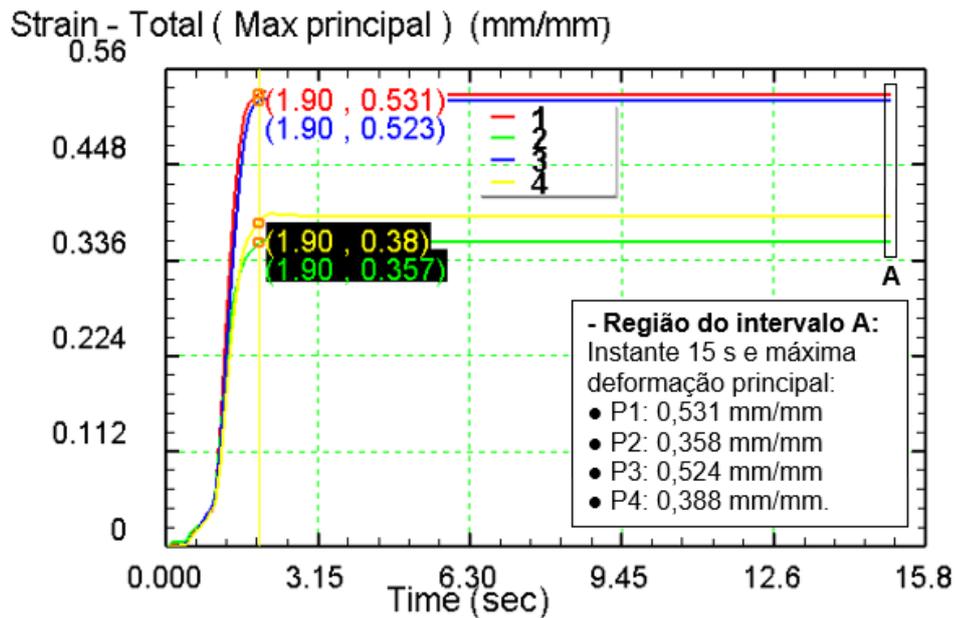
A máxima deformação principal ao longo da chapa para a redução de espessura de 15 mm com relação a espessura inicial de 30,7 mm é apresentada na Figura 29 (Caso 7). Escolhendo-se os quatro pontos na chapa conforme Figura 13, obtém-se o gráfico da simulação que está revelado na Figura 30.

Figura 29 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para redução de espessura de 15 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Redução de espessura de 15 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).



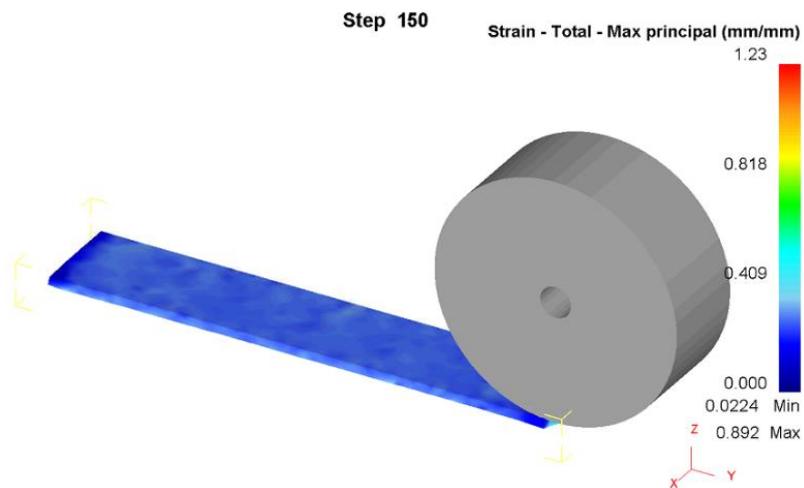
Fonte: Próprio autor.

Como esperado, com maior redução de espessura ocorre um aumento na deformação principal 1 em geral, sendo mais pronunciado na região intermediária da espessura da chapa. Vale observar que a deformação principal 1 relaciona-se com o estiramento maior dos grãos, o que devido à forma como ocorre o processo, associa-se à própria direção da laminação. Isto remete ao comportamento estrutural ilustrado

na Figura 2.

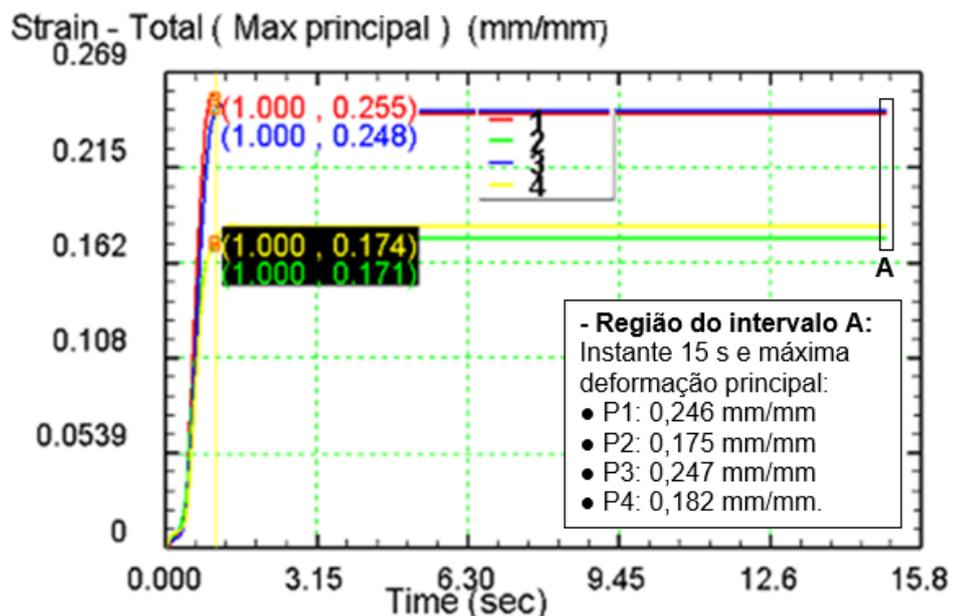
Por outro lado, averiguando-se o comportamento da máxima deformação principal com a alteração da taxa de deformação, inicialmente aplicada em  $1,0 \text{ s}^{-1}$  (Caso 2) e alterando para  $0,5 \text{ s}^{-1}$  (Caso 8), pode-se destacar o resultado final desta análise presente na Figura 31. Além disso, o gráfico do resultado dessa simulação nos quatro pontos estudados está ilustrado na Figura 32.

Figura 31 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para uma taxa de deformação de  $0,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

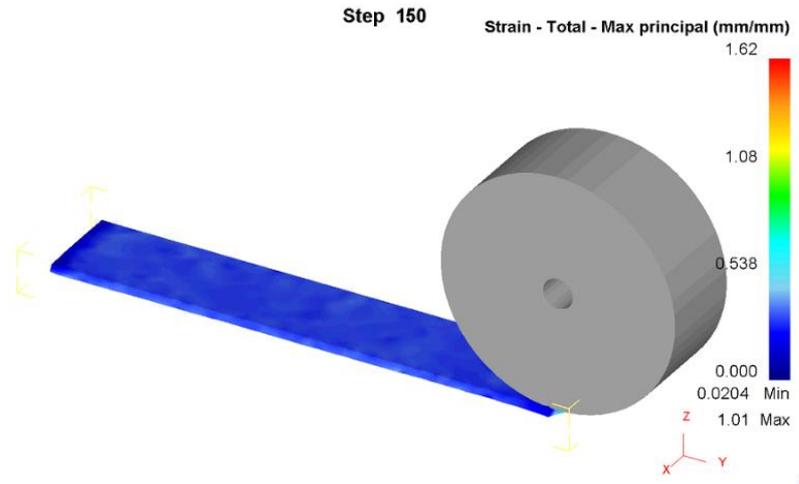
Figura 32 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Taxa de deformação de  $0,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

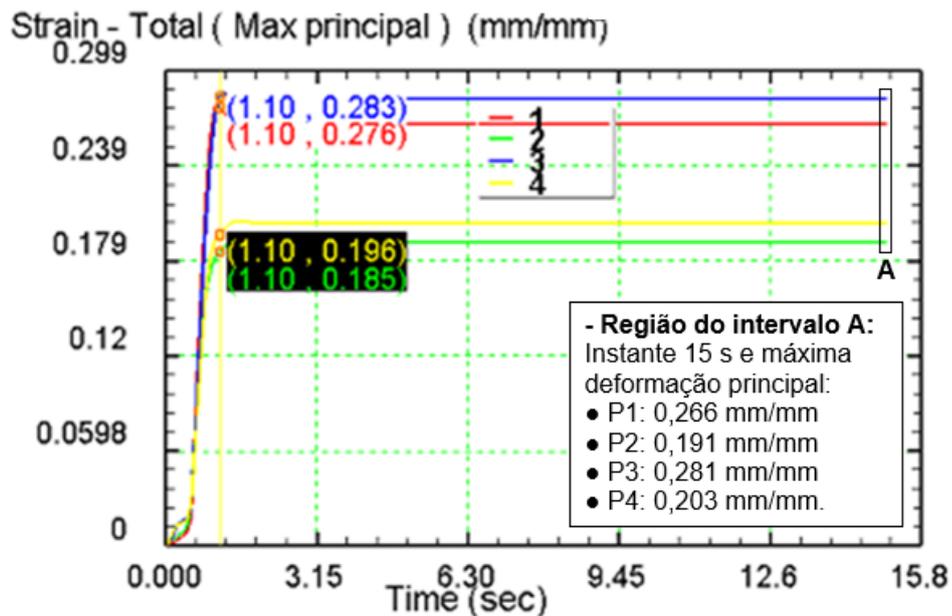
A máxima deformação principal ao longo da chapa para a taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  (conforme Caso 9) é apresentada na Figura 33. Averiguando o comportamento dos quatro pontos na chapa, obtém-se o gráfico da simulação que está revelado na Figura 34.

Figura 33 - Resultado da máxima deformação principal 1 após 15s para uma taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).

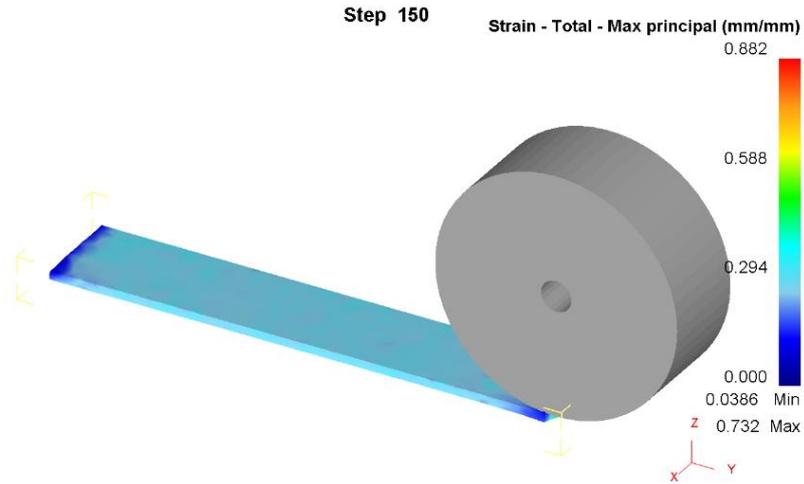


Fonte: Próprio autor.

Com a taxa de deformação entre  $0,5$  e  $1,0 \text{ s}^{-1}$  (Casos 8 e 2, respectivamente) não houve mudança em seus valores de deformação principal 1, porém, houve uma elevação no tempo para alcançar o pico de deformação de  $1,0$  (na taxa de  $0,5 \text{ s}^{-1}$ ) para  $1,4 \text{ s}$  (na taxa de  $1,0 \text{ s}^{-1}$ ). Isto está associado à menor velocidade relativa de translação do cilindro em relação à chapa, o que implica em uma demora para se atingir os picos de deformação. Já para a taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  ocorreu uma elevação nos valores de deformação principal em cerca de 9 a 13% dependendo do ponto analisado.

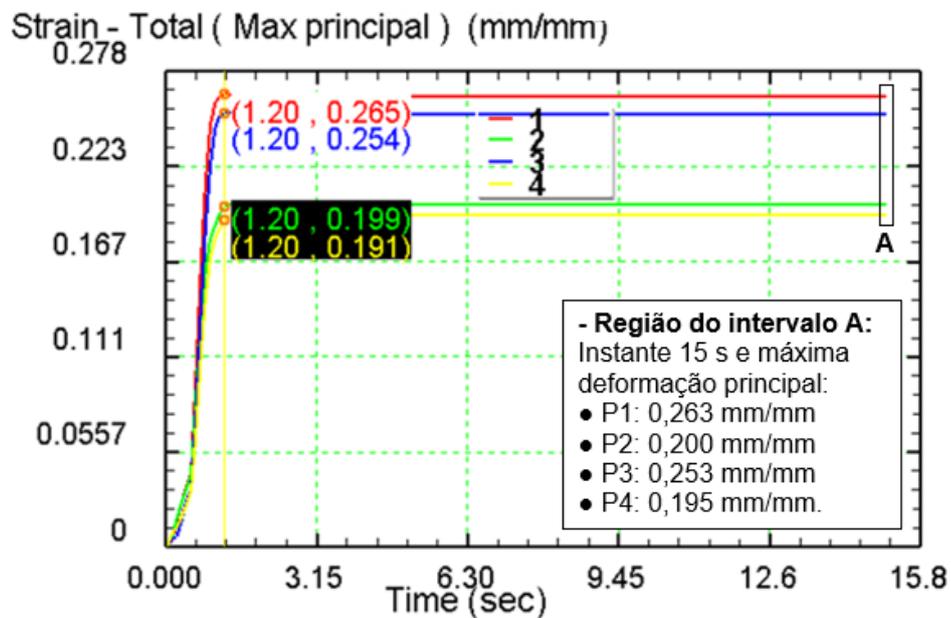
Para a última análise da resposta do sistema de laminação em termos da máxima deformação principal 1, foi verificado seu comportamento com a mudança de temperatura inicial da chapa. O resultado para temperatura inicial da chapa de  $1000^\circ\text{C}$  é apresentado na Figura 35 (Caso 1) e o gráfico da evolução dessa deformação principal nos quatro pontos de análise é ilustrado na Figura 36.

Figura 35 - Resultado da máxima deformação principal após 15s para temperatura inicial de 1000°C (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1000°C (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).

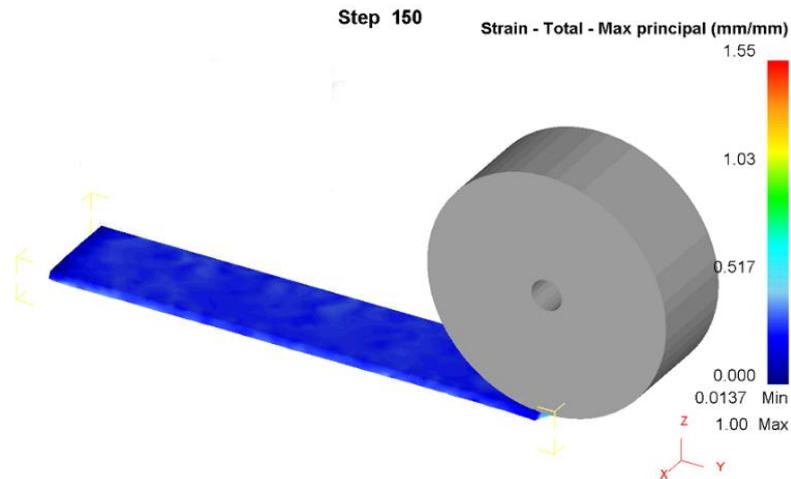


Fonte: Próprio autor.

A máxima deformação principal 1 ao longo da chapa para a temperatura inicial da chapa de 1200°C é a mesma ilustrada para redução de espessura de 10 mm, presente na Figura 27 (Caso 2). Já para o comportamento dos quatro pontos na chapa, obteve-se o gráfico da simulação que está apresentado na Figura 28. A máxima deformação principal da chapa para a temperatura inicial da chapa de 1400°C (Caso 3) estão presentes na Figura 37, o gráfico do comportamento nos quatro pontos na

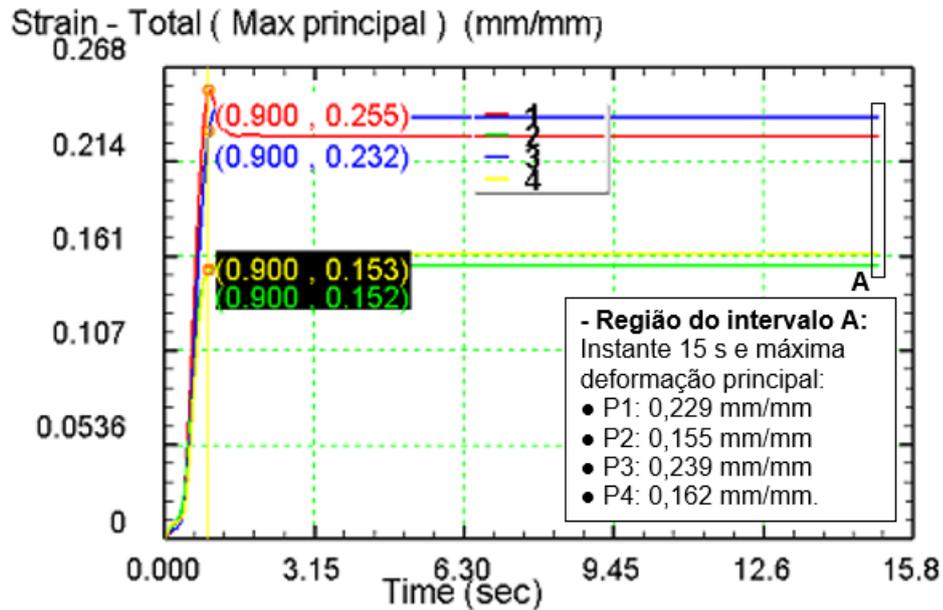
chapa está apresentado na Figura 38.

Figura 37 - Resultado da máxima deformação principal após 15s para temperatura inicial de 1400°C (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Variação da máxima deformação principal 1 nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1400°C (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados da máxima deformação principal 1 com a variação de temperatura inicial da chapa, nota-se que os valores para essa deformação nos três casos se mantiveram próximos, com uma variação total dentro de aproximadamente

10%. No geral, uma maior temperatura inicial aponta para deformações principais 1 menores na superfície da chapa.

Essas análises revelam que o modelo FEA se apresenta satisfatório em relação ao comportamento geral esperado pelos modelos de tensão-deformação, validando-o para as análises de crescimento de grão, recristalização e aplicação do modelo de Avrami.

#### 4.3 RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA E TAMANHO DE GRÃO RECRISTALIZADO

Após a validação do modelo construído no DEFORM™ 3D para o processo de laminação a quente, foi feita a análise do comportamento da chapa para o crescimento de grão da microestrutura considerando as simulações presentes na Tabela 5, a fim de entender o comportamento dessas variáveis no processo de recristalização dinâmica do aço SAE 4140. Como os efeitos do tamanho inicial do grão foram desprezados nas equações de Avrami (Equações 23 a 27) para DRX, considera-se que os valores calculados representarão o tamanho do grão recristalizado após o período transcorrido de processo. Nas análises que se seguem, está fora do escopo a avaliação do fenômeno do crescimento do grão após a recristalização dinâmica (Equação 35). Isto veio pelo fato de não ter sido possível encontrar-se valores embasados por outros autores para os parâmetros  $Q_9$ ,  $a_9$  e  $m'$  desta mesma equação. Então, os resultados a seguir devem ser contemplados com a devida cautela pois os gráficos mostrados não representam outros fenômenos que podem ocorrer nos intervalos de tempo considerados.

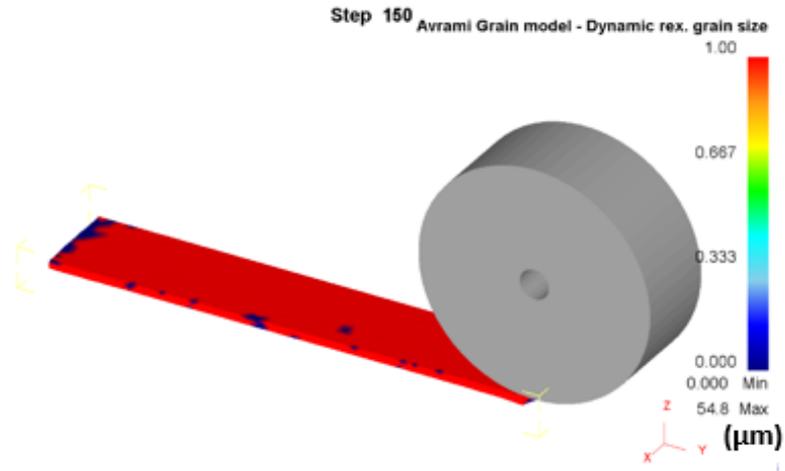
Foi avaliado o problema de recristalização dinâmica e do tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos selecionados (Figuras 13 e 14) e em relação à temperatura inicial da chapa e demais condições conforme os casos da Tabela 5. As Figuras 39 a 56 expressam os resultados calculados na análise dos fenômenos citados. Estas figuras são apresentadas aos pares para cada caso.

A primeira figura de cada caso apresenta o grau do tamanho de grão recristalizado considerando a recristalização dinâmica ao longo da chapa e após um certo período de tempo, relacionado ao período de passagem do cilindro sobre a chapa. Estas figuras que ilustram a recristalização dinâmica e tamanho de grão após 15s, apresentam uma escala de cores variando de 0,0 a 1,0, indicando um fator

multiplicativo que deve ser aplicado sobre o tamanho máximo de grão (valor representado abaixo da escala de cores) apresentado na figura para se estimar o tamanho de grão em um ponto específico.

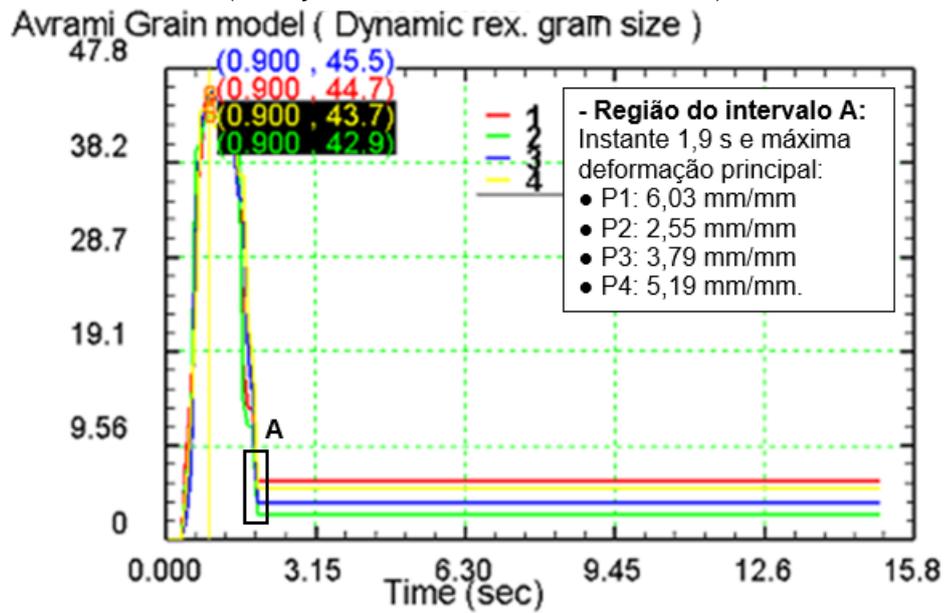
A segunda figura de cada caso demonstra o tamanho do grão recristalizado para os 4 pontos selecionados. No caso a presença de um pico relevante condiz com a passagem do cilindro laminado sobre a região dos pontos analisados e demarca o início da recristalização dinâmica, dada pelo aumento do tamanho de grão na direção de laminação naquele instante e que logo após tem seu tamanho reduzido devido ao mecanismo de recristalização dinâmica. A combinação das diversas condições relaciona-se com a diferença entre tamanhos de grãos nos 4 pontos analisados.

Figura 39 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para a temperatura inicial de 1000°C (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).



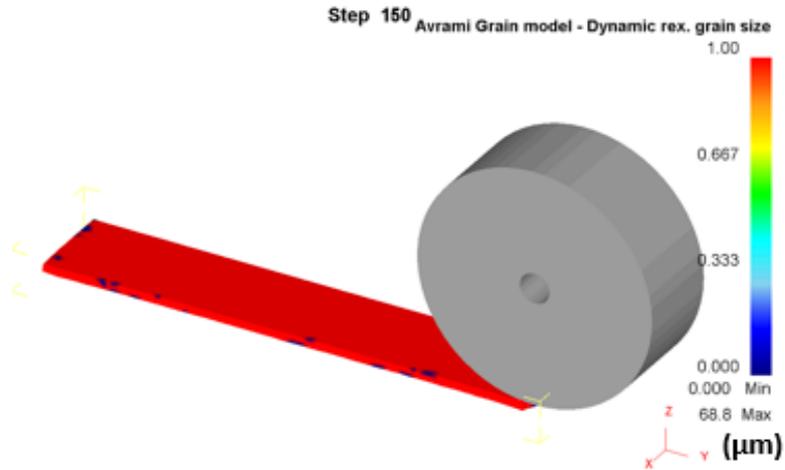
Fonte: Próprio autor.

Figura 40 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1000°C (condições do Caso 1 conforme Tabela 5).



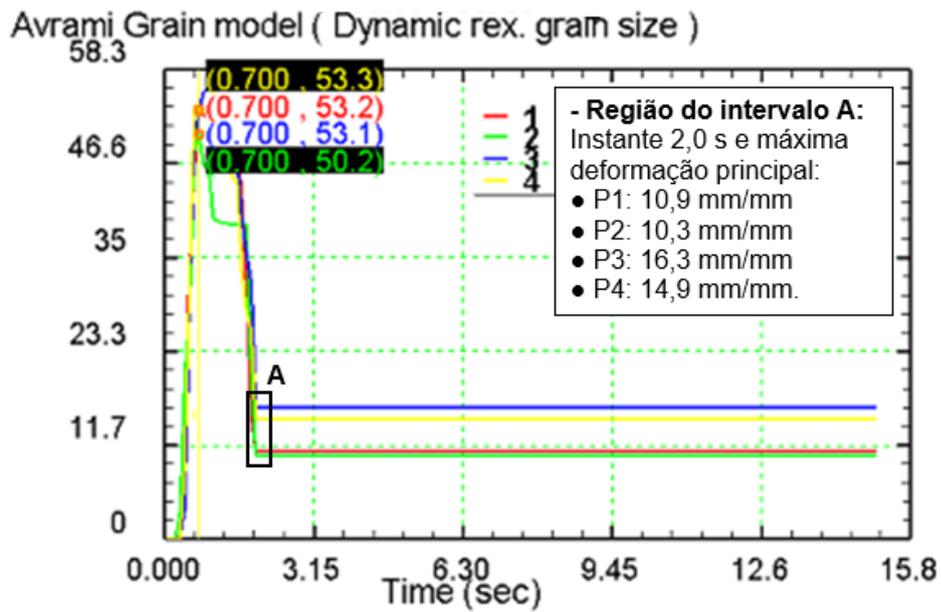
Fonte: Próprio autor.

Figura 41 - Tamanho de grão recrystalizado na recrystalização dinâmica após 15s para a temperatura inicial de 1200°C (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).



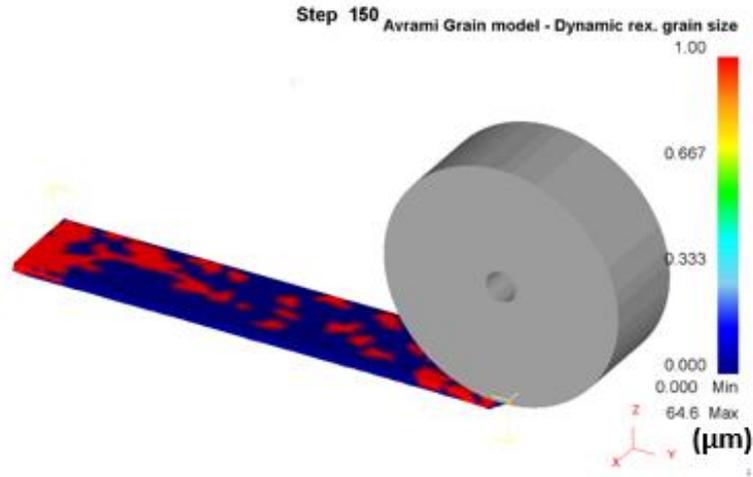
Fonte: Próprio autor.

Figura 42 - Tamanho de grão recrystalizado nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1200°C (condições do Caso 2 conforme Tabela 5).



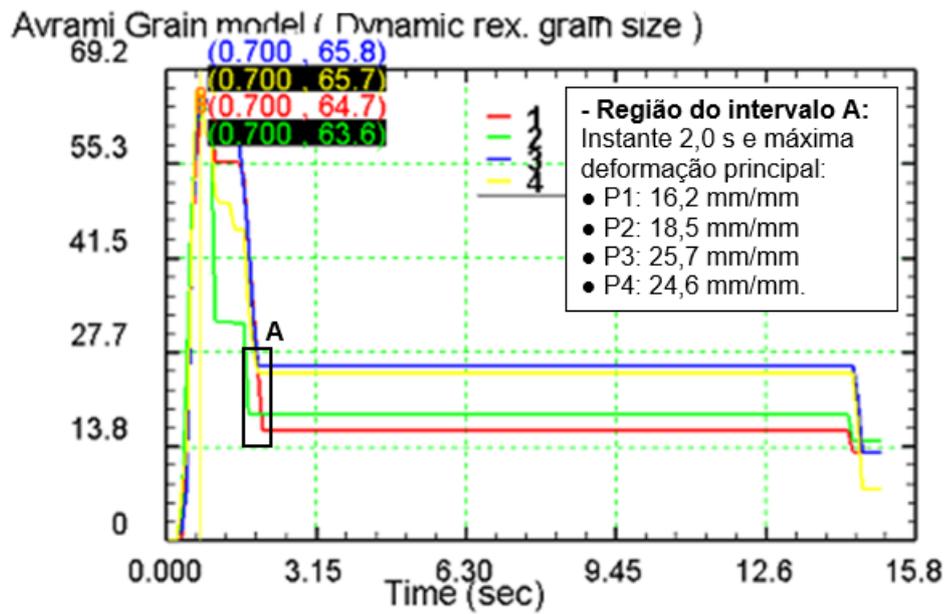
Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para a temperatura inicial de 1400°C (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).



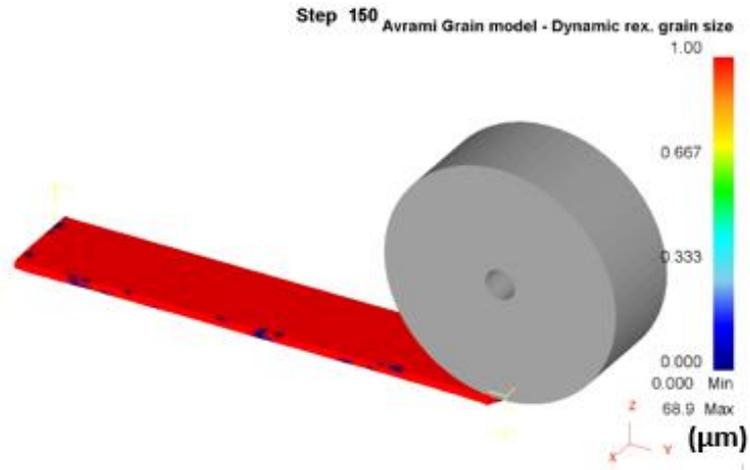
Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Temperatura inicial chapa: 1400°C (condições do Caso 3 conforme Tabela 5).



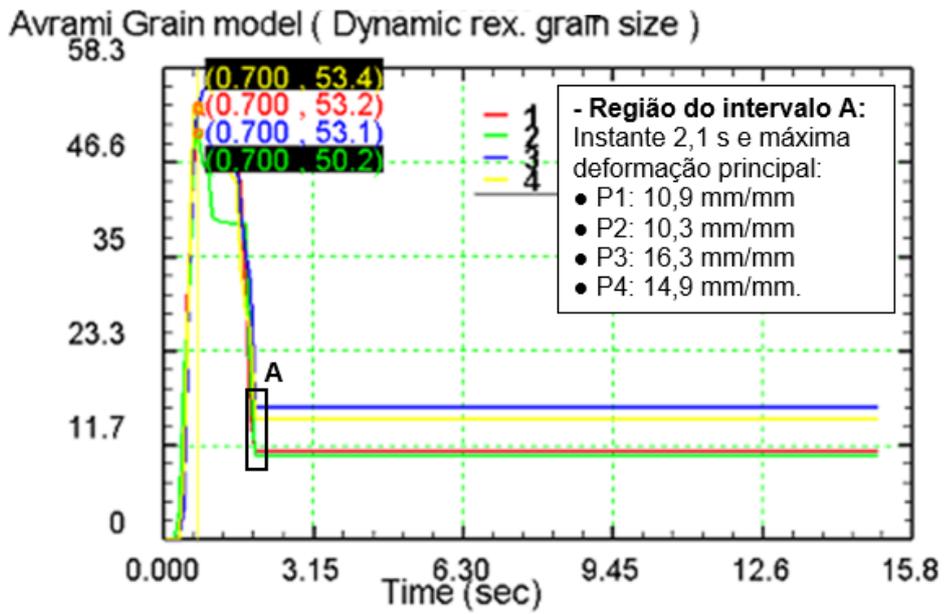
Fonte: Próprio autor.

Figura 45 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para um coeficiente convectivo de  $0,01 \text{ kWm}^{-2\text{°C}}^{-1}$  (condições do Caso 4 conforme Tabela 5).



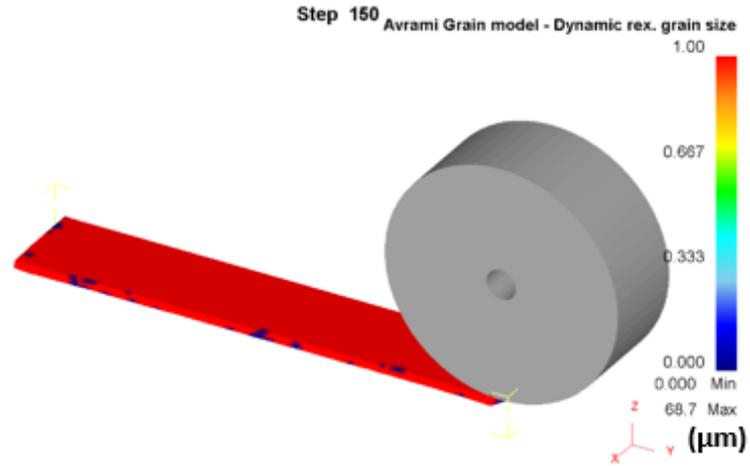
Fonte: Próprio autor.

Figura 46 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Coeficiente convectivo de  $0,01 \text{ kWm}^{-2\text{°C}}^{-1}$  (condições do Caso 4 conforme Tabela 5).



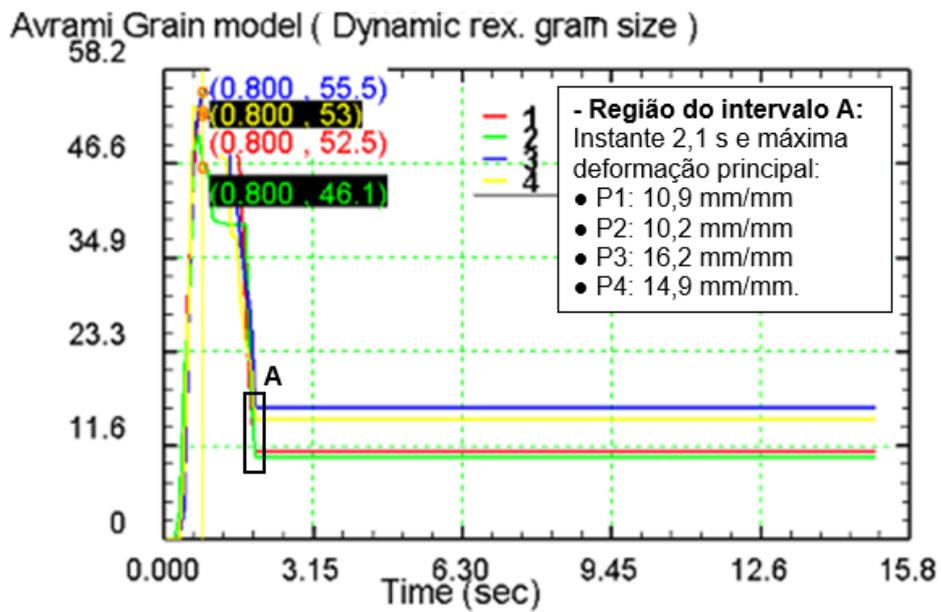
Fonte: Próprio autor.

Figura 47 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para um coeficiente convectivo de  $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$  (condições do Caso 5 conforme Tabela 5).



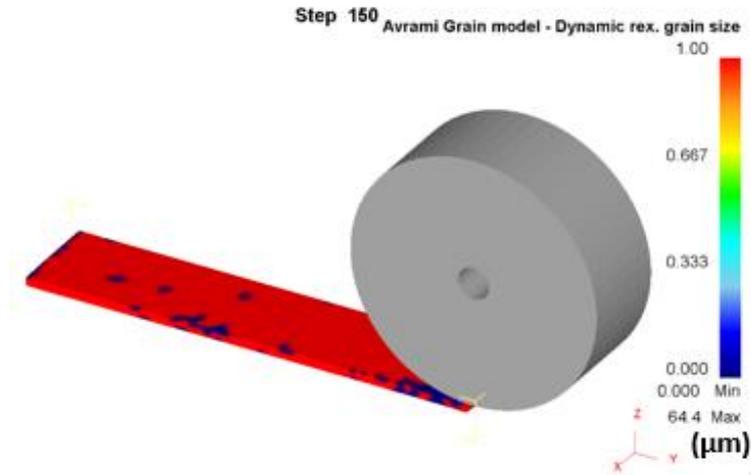
Fonte: Próprio autor.

Figura 48 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Coeficiente convectivo de  $0,05 \text{ kWm}^{-2}\text{°C}^{-1}$  (condições do Caso 5 conforme Tabela 5).



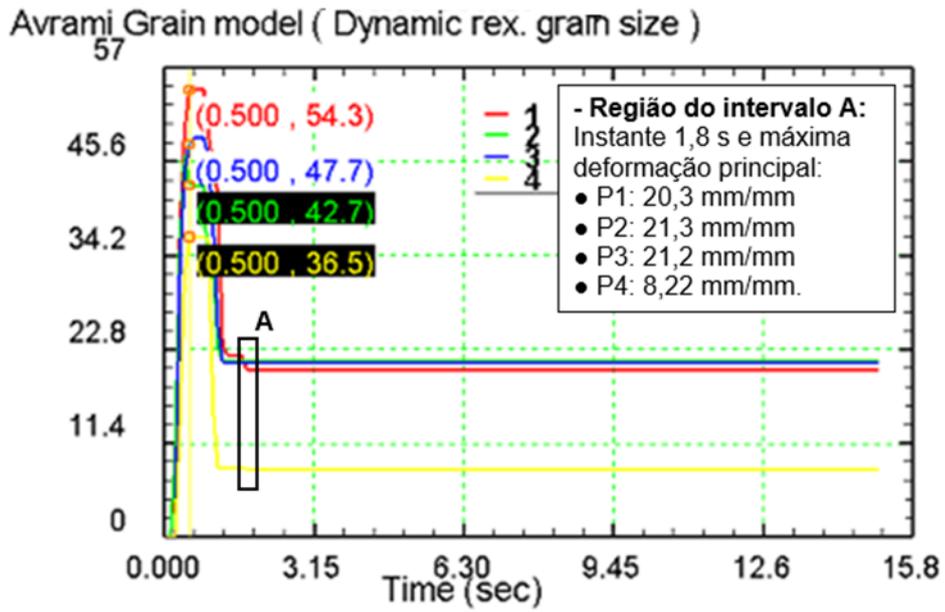
Fonte: Próprio autor.

Figura 49 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para uma redução de espessura de 5 mm sobre uma espessura inicial de 30,7 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).



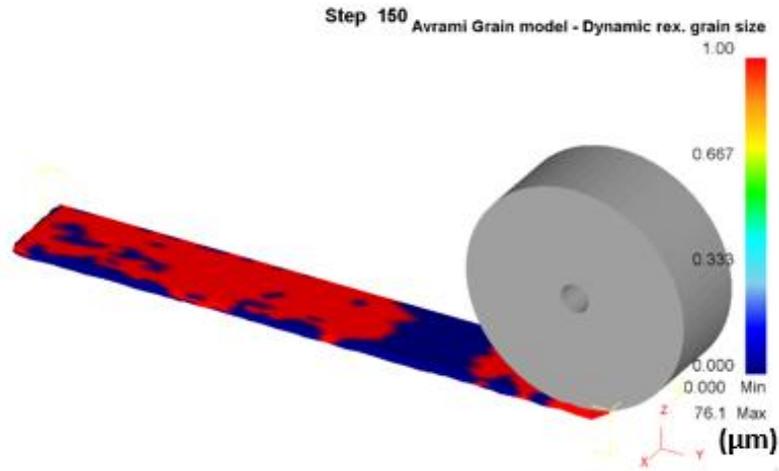
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Redução de espessura 5 mm (condições do Caso 6 conforme Tabela 5).



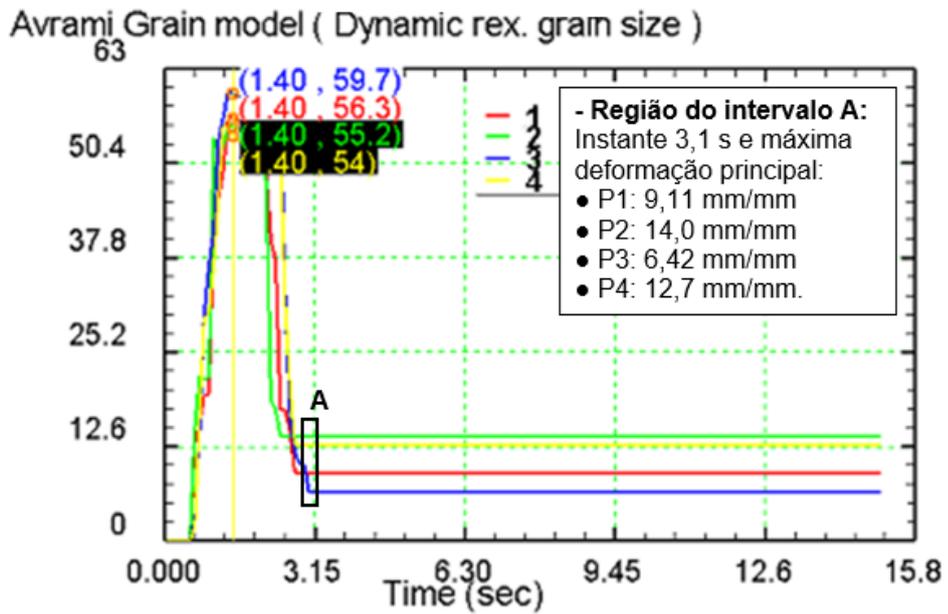
Fonte: Próprio autor.

Figura 51 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para uma redução de espessura de 15 mm sobre uma espessura inicial de 30,7 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).



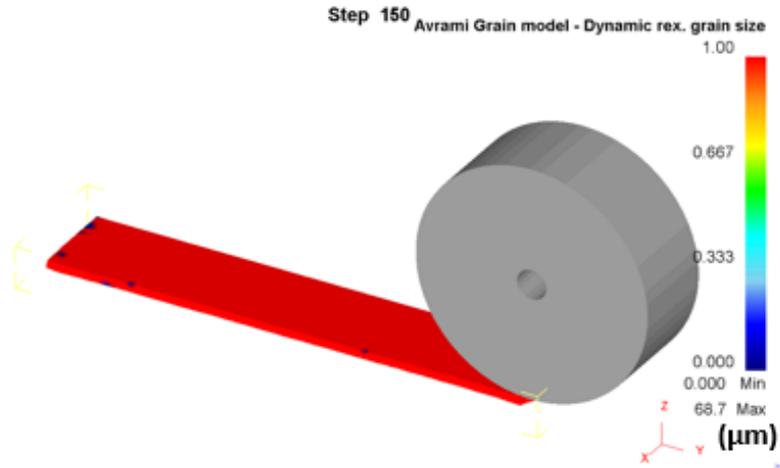
Fonte: Próprio autor.

Figura 52 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Redução de espessura 15 mm (condições do Caso 7 conforme Tabela 5).



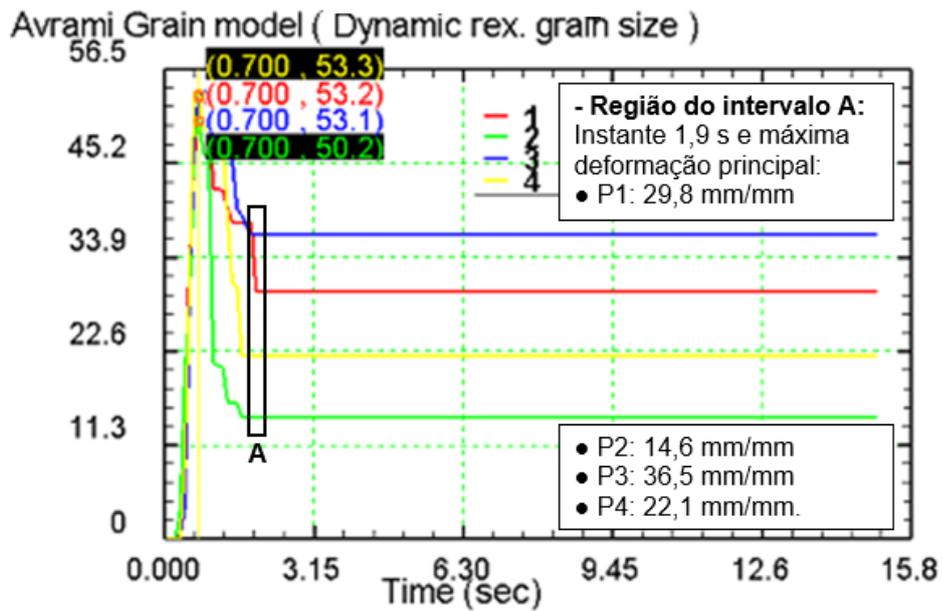
Fonte: Próprio autor.

Figura 53 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para uma taxa de deformação de  $0,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).



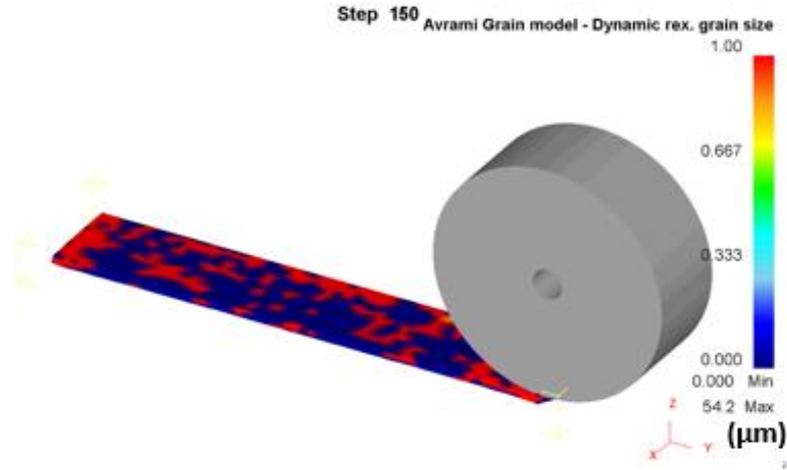
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Taxa de deformação de  $0,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 8 conforme Tabela 5).



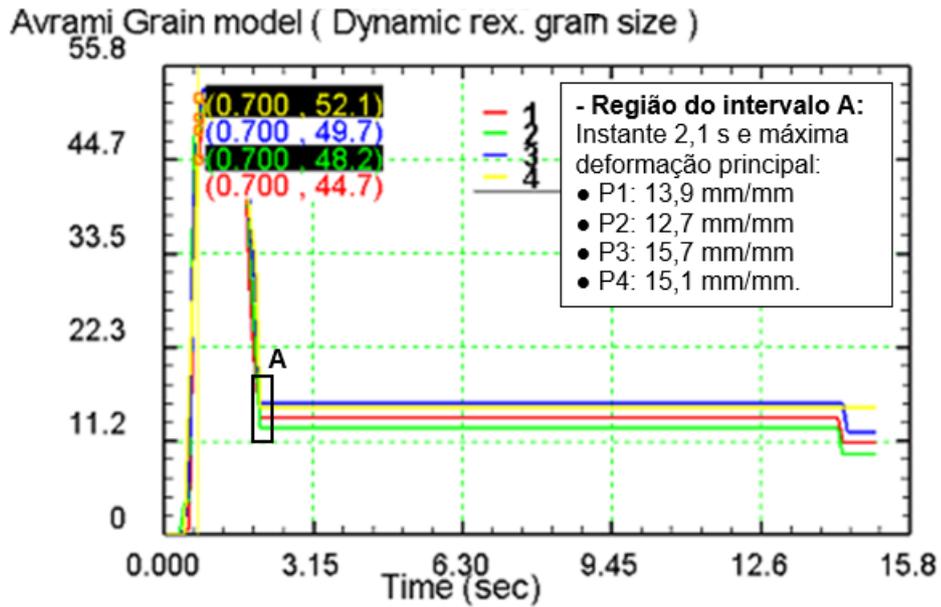
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 - Tamanho de grão recristalizado na recristalização dinâmica após 15s para uma taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - Tamanho de grão recristalizado nos quatro pontos. Taxa de deformação de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  (condições do Caso 9 conforme Tabela 5).



Fonte: Próprio autor.

## 5 SÍNTESE DA DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os diversos resultados apresentados demonstram como o padrão de modelagem apresentado oferece recursos para uma análise ampla do problema da recristalização dinâmica mediante o processo de laminação a quente.

### 5.1 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA (INTERVALO DE 15 SEGUNDOS)

Em todos os casos analisados, foi imposto um valor de temperatura inicial à chapa de modo que ela fosse mantida na região de austenitização, conforme diagrama Fe-C da Figura 4. Entre a Figura 15 e Figura 24 é possível observar nos gráficos a distribuição de temperaturas destacado para os pontos P2 e P4 (na superfície da chapa) devido ao contato mecânico com o cilindro, ao qual foi imposta uma temperatura de 30°C. Após a passagem do cilindro sobre a região dos pontos analisados, observa-se que suas temperaturas retornam aos patamares superiores devido à energia térmica armazenada na chapa como um todo.

A Tabela 6 apresenta uma síntese das faixas de temperaturas atingidas nos pontos analisados após 15 segundos:

Tabela 6 - Síntese dos resultados obtidos para análise da distribuição de temperatura da chapa.

Caso	Temperatura Inicial da chapa (°C)	Coef. de Transf. Calor – Convecção ( $\text{kW.m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	Faixa de Temperatura dos Pontos Analisados após 15 segundos (°C)
1	1000	0,02	733 a 742
2	1200	0,02	833 a 840
3	1400	0,02	936 a 947
4	1200	0,01	841 a 847
5	1200	0,05	807 a 819

Fonte: Próprio autor.

Por comparação, observa-se que a taxa de resfriamento da chapa é maior com o aumento do coeficiente convectivo. Isto revela que o modelo FEA condiz com as teorias de transferência de calor, embora sejam necessários experimentos físicos para se determinar de forma mais robusta estas taxas de resfriamento.

A aplicação de coeficientes de convecção conforme variação da tabela teve o

intuito de testar-se a sensibilidade do modelo frente ao problema da transformação dos grãos. Considera-se a seguir uma abordagem que pode ser considerada simplista, pois se quer avaliar o problema da temperatura, transformação e tempo no modelo em um regime térmico com distribuições espaciais e temporais frente ao diagrama TTT da liga que é padronizado para transformações isotérmicas. A isto cabe uma investigação futura para um melhor embasamento. Então, por comparação frente ao diagrama TTT da Figura 5, estima-se:

- a) O caso 1 é o que mais se aproxima do início da transformação de fases (e há imprecisão na análise se houver variações de segunda ordem nos diversos parâmetros de análise);
- b) Os casos 2, 3, 4 e 5 refletem circunstâncias em que os grãos estarão plenamente austeníticos;
- c) Os casos 4 e 5 acessam o problema da sensibilidade do modelo frente à alteração do coeficiente de convecção de calor. A partir da mesma temperatura inicial e tempo considerado, as variações propostas a este coeficiente não mudaram o fato de que os grãos se manterão austeníticos (sem transformação de fase). Este aspecto pode trazer implicações práticas sobre o controle da condição de resfriamento da chapa e seu relativo controle microestrutural na chapa.

Todos os demais casos estudados são correlacionados com estes cinco citados acima em termos das faixas de temperaturas atingidas. A partir disto, tem-se que nas discussões que se seguem serão analisados como que os grãos austeníticos em todos os casos serão afetados em função da passagem do cilindro (transformação dinâmica) e da faixa de temperatura em questão.

## 5.2 DISTRIBUIÇÃO DA MÁXIMA DEFORMAÇÃO PRINCIPAL

As análises que se seguem são relativas às figuras enumeradas entre a Figura 25 e a Figura 38. Aos valores calculados são das deformações principais máximas, o que oferece a interpretação física de que são deformações associadas à direção longitudinal da chapa (conforme movimentação do cilindro) e que permite abstrair sobre a elongação dos grãos causado pela ação do cilindro sobre a chapa.

Tabela 7 - Síntese dos resultados obtidos para análise da distribuição de máxima deformação principal da chapa.

Caso	Redução na Espessura (mm/mm)	Taxa de Deformação ( $s^{-1}$ )	Faixa de Deformação Principal Máxima	Deformação Crítica para a DRX conforme Equação 23
6	5/30,7	1,0	0,083 a 0,110	0,0872
2	10/30,7	1,0	0,175 a 0,247	0,0872
7	15/30,7	1,0	0,358 a 0,531	0,0872
8	10/30,7	0,5	0,175 a 0,247	0,0958
9	10/30,7	1,5	0,191 a 0,281	0,1168
1	10/30,7	1,0	0,195 a 0,263	0,1086
3	10/30,7	1,0	0,155 a 0,239	0,0738

Fonte: Próprio autor.

Para organizar as análises, os casos foram organizados em grupos, segundo suas similaridades para considerações sobre as deformações principais máximas:

- Grupo A - Casos 2, 6 e 7 com alteração exclusiva da redução de espessura (as demais condições foram mantidas iguais): conforme a Tabela 7, fica claro que as deformações principais na direção de laminação são acentuadas quanto mais agressiva for a redução da espessura da chapa, tal como esperado.
- Grupo B - Casos 2, 8 e 9 com alteração exclusiva da taxa de deformação (as demais condições foram mantidas iguais): no geral, uma taxa de deformação maior para mesma geometria de chapa implica em um aumento marginal das deformações principais nos pontos próximos à superfície. No caso, a taxa de deformação está associada à velocidade relativa de translação entre cilindro e chapa.
- Grupo C - Casos 1 e 3 com alteração exclusiva da temperatura inicial da chapa (as demais condições foram mantidas iguais): o aumento de temperatura relacionou-se com uma redução das deformações principais máximas. A possível redução de rigidez do material (amolecimento) devida ao aumento de temperatura é expressa por alteração na equação constitutiva de material. Com o amolecimento generalizado na região dos pontos de análise, é facilitada a acomodação do material nas três direções quando há a ação compressiva do cilindro. Isto é plausível também quando se contempla o resfriamento da chapa, tal como abordado previamente.

A máxima deformação principal pode ser analisada como uma das 3 componentes da função “deformação efetiva”. Esta, por sua vez, é parte do critério a partir do que se calcula a recristalização dinâmica do material. Para tal, é preciso que a deformação efetiva seja maior que a deformação crítica, expressa na Tabela 7. O Caso 6 possui um valor de deformação principal máxima abaixo do valor crítico. Entretanto, observa-se que o critério trata das deformações efetiva: com as 3 componentes de deformações principais é ultrapassado o valor equivalente em relação ao crítico de 0,0872. Com isto, em todos os Casos da Tabela 7 haverá recristalização dinâmica do material. Suas condições específicas são analisadas no próximo tópico.

### 5.3 RECRISTALIZAÇÃO E TAMANHO DE GRÃO RECRISTALIZADO (INTERVALO DE 15 SEGUNDOS)

As análises a seguir contemplam as figuras enumeradas entre a Figura 39 e Figura 56 e serão associadas com as análises dos tópicos prévios desta presente discussão.

Vale considerar que nestas figuras citadas foi possível caracterizar a presença de um pico, definido por uma região de subida e por uma região de descida. No escopo das presentes discussões, considera-se que cada pico resultou da superposição de fenômenos diferentes que ocorreram de maneira diferencial. A região de subida expressa o aumento do tamanho de grão, mas interpreta-se que a causa primordial seja a deformação dos grãos causada pela passagem do cilindro. Neste intervalo de tempo alguma transformação dinâmica já ocorre. Na região de descida do pico, vale considerar a expressão conjunta da influência do afastamento do cilindro da seção de análise, da redução de temperatura e do aumento do teor de transformação dinâmica no local. Com as condições impostas nas análises numéricas para este estudo, verifica-se que pelo diagrama TTT da liga de aço SAE 4140 há uma tendência de formação da fase martensítica nos vários casos. Entretanto, considera-se que as condições de contorno da análise térmica foram exacerbadas, do que se espera que a redução de temperatura calculada não seja tão crítica.

Para isto, utiliza-se a síntese de dados na Tabela 8, a qual contempla os resultados das Figuras 39 a 56 para os Casos numerados de 1 a 9 (em termos da

previsão de tamanho do grão recristalizado).

Tabela 8 - Síntese dos resultados obtidos para DRX e tamanho de grão da chapa.

Caso	Houve DRX Completa na Chapa após 15s pelo Aspecto Geral?	Tamanho Máximo de Grão na Chapa no Início da Recristalização [ $\mu\text{m}$ ]	Tamanho de Grão no Instante da Passagem do Cilindro e nos Pontos de Análise (Faixa de Valores em $\mu\text{m}$ )	Tamanho do Novo Grão Recristalizado após Aprox. 15s da Passagem do Cilindro e nos Pontos de Análise – (Faixa de Valores em $\mu\text{m}$ )
1	Sim	54,8	42,9 a 45,5	2,55 a 6,03
2	Sim	68,8	50,2 a 53,3	10,3 a 16,3
3	Sim	64,6	63,6 a 65,8	7,65 a 14,7
4	Sim	68,9	50,2 a 53,4	10,3 a 16,3
5	Sim	68,7	46,1 a 55,5	10,2 a 16,3
6	Sim	64,4	36,5 a 54,3	8,22 a 21,3
7	Sim	76,1	54,0 a 59,7	6,42 a 14,0
8	Sim	68,7	50,2 a 53,3	14,6 a 36,5
9	Sim	54,2	44,7 a 52,1	9,52 a 15,1

Fonte: Próprio autor.

Conforme é observado na Tabela 8, todos os casos referem-se às situações em que foi prevista uma recristalização dinâmica completa na chapa, destacando-se que nos Casos 1, 2, 4, 5, 6 e 8 na região de bordas extremas os valores de tamanho de grão recristalizados foram inferiores aos localizados no restante da placa. Salienta-se os Casos 3, 7 e 9, para os quais a previsão de modelo indicou de forma mais generalizada uma previsão de tamanho de grão menor nas diversas regiões da chapa.

Os dados da Tabela 8 para o tamanho final do grão recristalizado dinamicamente decorridos 15 s são comparáveis aos valores apresentados por Qian e Pan (2013) entre 14 e 43  $\mu\text{m}$ .

Para se contemplar a influência da temperatura inicial sobre o tamanho final do grão recristalizado nos pontos considerados, tomam-se os casos 1, 2 e 3, dado que os demais parâmetros foram considerados constantes. Tem-se que o aumento de temperatura inicial contribui para um maior tamanho de grão recristalizado após 15 s decorridos (do caso 1 para o caso 2). O caso 3 desviou-se em relação ao esperado nos casos anteriores. Observa-se que no caso 3 os grãos em geral estão com tamanho abaixo do tamanho máximo previsto. Isto indica haver um máximo da taxa de crescimento do tamanho de grão com a temperatura próxima de 1200°C, mantidos fixos os parâmetros gerais dos casos 1, 2, e 3.

Para se contemplar a influência da taxa de resfriamento da chapa sobre o tamanho final do grão recristalizado nos pontos considerados, tomam-se os casos 2, 4 e 5, dado que os demais parâmetros foram considerados constantes. Tem-se que

ao se acentuar a taxa de resfriamento (do caso 4 para o 2 e depois para o caso 5) não se atinge uma variação relevante sobre o tamanho do grão. Vale ressaltar que foram utilizados valores típicos do coeficiente de convecção térmica típicos para resfriamento da chapa ao ar livre.

Para se contemplar a influência da deformação total imposta à chapa sobre o tamanho final do grão recristalizado nos pontos considerados, tomam-se os casos 2, 6 e 7 (por meio da redução de espessura frente à espessura inicial), dado que os demais parâmetros foram considerados constantes. Tem-se que ao se acentuar a deformação total imposta (do caso 6 para o 2 e depois para o caso 7), há uma tendência em se observar grãos maiores no volume geral da chapa. Porém, nos pontos analisados, esta tendência é obedecida do caso 6 para o caso 2, sobretudo na porção interior da chapa. O caso 7, com o maior recalque de todos, indica que os grãos terão os menores tamanhos nos pontos analisados e ao final do período.

Para se contemplar a influência da taxa de deformação imposta à chapa sobre o tamanho final do grão recristalizado nos pontos considerados, tomam-se os casos 2, 8 e 9 (por meio da velocidade relativa de translação do cilindro em relação à chapa), dado que os demais parâmetros foram considerados constantes. Tem-se que ao se acentuar a taxa de deformação total imposta (do caso 8 para o 2 e depois para o caso 9), observa-se o comportamento próximo ao de minimização do tamanho do grão para o Caso 2. Além disto, o tamanho de grão no caso 8 é bem maior que para o caso 9, estes sendo os extremos da comparação. Isto sugere que a menor taxa de deformação seja mais favorável para a promoção do tamanho do grão (comparando-se casos 8 e 2).

## 6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi criado um modelo virtual FEA para compreensão do comportamento de uma chapa feita na liga de aço SAE 4140 durante o processo de laminação a quente e os efeitos de algumas variáveis ao longo desse processo, principalmente durante a recristalização dinâmica e sobre o tamanho de grão recristalizado.

Para auxiliar nessa análise das variáveis do processo de laminação a quente foi adotado 4 pontos em uma mesma seção da chapa distantes 25 mm da borda (essa distância foi adotada para evitar os efeitos de distorções que podem ocorrer na borda da chapa).

Foram levantadas e analisadas as curvas de temperatura da chapa nos 4 pontos escolhidos e foi visto que nos gráficos a distribuição de temperaturas nos pontos P2 e P4 (na superfície da chapa) tiveram uma redução acentuada devido ao contato mecânico com o cilindro. Posterior a essa passagem as temperaturas retornam aos patamares superiores provenientes da energia térmica armazenada na chapa como um todo. Observa-se que a taxa de resfriamento da chapa é maior com o aumento do coeficiente convectivo e com a redução da temperatura inicial da chapa. Isto revela que o modelo FEA esteve em acordo com as teorias de transferência de calor. De acordo com o diagrama TTT e o diagrama de fases aplicados nos Casos 1 a 5 observou-se a formação de grãos austeníticos em todos os casos e os mesmos foram afetados em função da passagem do cilindro.

Para a máxima deformação principal nos 4 pontos da chapa, tem-se com alteração da redução de espessura que as deformações na direção de laminação são acentuadas quanto maior for a redução de espessura da chapa, tal como esperado. Para a alteração na taxa de deformação, analisou-se que quanto maior for essa taxa há um aumento marginal das deformações principais nos pontos próximos à superfície.

Para as condições análises e comparadas entre os diversos casos, o em cada grupo de casos discutido houve o indicativo de não haver uma evolução linear do comportamento analisado e sim aquele de uma função com um máximo ou mínimo local nos valores intermediários. Destas condições gerais de modelagem, em geral os maiores tamanhos de grãos foram obtidos para uma temperatura inicial da chapa próxima a 1200°C, com o recalque intermediário de 10 mm em 30,7 mm e com a

menor taxa de deformação empregada. Estes valores são aproximados devido à pouca discretização empregada para a proposição de mais casos para um estudo mais refinado, o que é sugerido para um trabalho futuro. De outra forma, ao saber-se das condições que propiciam os maiores tamanho de grão ao final da recristalização dinâmica, tem-se em mãos uma orientação mínima para buscar-se as situações em que se queira tamanhos de grãos mais refinados.

Analisou-se pelas figuras de resultados obtidos que outras regiões da chapa apresentam comportamento diferente com relação a seção adotada (25 mm da borda). Sugere-se trabalhar com outras seções e regiões da chapa em trabalhos futuros.

Os estudos realizados no presente trabalho demarcam uma coleção de dados ainda que teóricos e que necessitam de embasamento experimental de um trabalho futuro. Entretanto, fica delineado o caminho para a proposição de outros casos que combinem os diversos parâmetros influentes do problema. Isto contribuirá com a formação de uma coletânea de dados ampla sobre a qual poderão operar os algoritmos automáticos por inteligências artificiais e que ofereçam em tempo real no chão-de-fábrica as inferências robustas para controle de qualidade e/ou de alteração do processo e de seus diagnósticos práticos.

## 7 REFERÊNCIAS

ASM International. Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams, Metals Park, OH, 1977.

ANSBACH, L. G. **Avaliação da Relação Dureza e Tenacidade dos Aços SAE 1045, SAE 4140 E SAE 4340 Submetidos à Resfriamento Contínuo em Solução Polimérica Aquosa**. 2020. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 910 p.

CIPRIANI, L. S. **Propriedades mecânicas e características microestruturais de um aço de alta resistência submetido a diferentes processos de têmpera**. 2017. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

DEFORM-3D™ Integrated 2D-3D Version 6.0. **User's Manual**. Columbus, Ohio, 2010, 339 p. Disponível em: <https://www.deform.com/wp-content/uploads/2017/09/DEFORM-3D.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2021.

DURELLO, H. A. C.; EVANGELISTA, S. H. Influência da Sensibilidade de Parâmetros dos Modelos de Avrami nas Cinéticas de Recristalização sobre o Tamanho de Grão em um Processo de Laminação a Quente de Liga de Aço SAE 4140. *In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CHAPAS*, 23., 2021, Porto Alegre. **Anais SENAFOR**. Porto Alegre: UFRGS, 2021. p. 8-17.

GARCIA, N. G. **Estudo da Cementação Sólida em Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos de Aço SAE 4320**. 2017. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo) – Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2017.

GIORJÃO, R. A. R. **Análise Experimental e Numérica dos Fenômenos Térmicos Mecânicos e Metalúrgicos do Processo de Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível em Liga de Magnésio AZ31**. 2019. 221f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010. 261 p.

HODGSON, P. D.; GIBBS, R. K. A mathematical model to predict the mechanical properties of hot rolled C-Mn and microalloyed steels. **ISIJ International**, Iron and Steel Institute of Japan, v. 32, n. 12, p. 1329–1338, 1992. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/32/12/32\\_12\\_1329/article/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/32/12/32_12_1329/article/)

[char/ja/](#). Acesso em: 03 abr. 2020.

INOUE, T.; YANAGIDA, A.; YANAGIMOTO, J. Finite element simulation of accumulative roll-bonding process. **Materials Science & Engineering A**, Japão, v. 106, mar./mai. 2013, p. 37-40. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0167577X13005843?via%3Dihub>. Acesso em: 6 set. 2020.

KIRIHATA, A.; SICILIANO, F.; MACCAGNO, T. M.; JONAS, J. J. Mathematical modelling of mean flow stress during the hot strip rolling of multiply-alloyed medium carbon steels. **ISIJ International**, Iron and Steel Institute of Japan, v. 38, n. 2, p. 187–195, 1998. Disponível em: [https://www.istage.ist.go.jp/article/isijinternational1989/38/2/38\\_2\\_187/article/-char/ja/](https://www.istage.ist.go.jp/article/isijinternational1989/38/2/38_2_187/article/-char/ja/). Acesso em 05 jun. 2020.

MCWILLIAMS, B.; SANO, T.; YU, J.; GORDON, A.; YEN, C. Influence of hot rolling on the deformation behavior of particle reinforced aluminum metal matrix composite. **Materials Science & Engineering A**, USA, v. 577, mar./abr. 2013, p. 54-63. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0921509313003092?via%3Dihub>. Acesso em: 13 set. 2020.

MILANEZ, A. **Estudo da Calibração de Barras Chata Laminadas a Quente em um Laminador Trio**. 2006. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PATAN, G. K.; OLIVEIRA, A. C. C. Análise Microestrutural e Ensaio Mecânico de Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Térmico de Têmpera. *In*: SIEPE SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 9., 2017, Santana do Livramento. **Anais SIEPE**. Santana do Livramento: Unipampa, 2017.

QIAN, D.; PAN, Y. 3D Coupled Macro–Microscopic Finite Element Modelling and Simulation for Combined Blank-Forging and Rolling Process of Alloy Steel Large Ring. **Computational Materials Science**, v. 70, p. 24-36, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025612007732>. Acesso em: 16 jul. 2020.

RASMA, E. T. **Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratado sob Diferentes Tratamentos Térmicos**. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2015.

REBECHI, J. G. **Correlações Numéricas entre Taxas de Resfriamento, Microestruturas e Propriedades Mecânicas para o Tratamento Térmico do Aço AISI/SAE 4140**. 2011. 92f. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

REGONE, W.; JORGE, A. M.; BALANCIN, O. Metodologia para determinar os tipos de amaciamentos que atuam em processos termomecânicos. In: 14° CBECIMAT. São Pedro, p. 42101-42109, 2000.

REIS, E. G. **Modelo Matemático para Previsão das Propriedades Mecânicas na Laminação a Quente de Perfis Estruturais**. 2007. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SELLARS, C. M.; DAVIES, G. J. **Hot working and forming processes: proceedings of an International Conference on Hot Working and Forming Processes**. [S.l.]: Maney Pub, 1980. v. 264.

SENTHILKUMAR, D.; RAJENDRAN, I.; PELLIZZARI, M.; SIIRIAINEN, J. Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Italy, v. 211, n. 3, p. 396–401, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013610003274?via%3Dihub>. Acesso em: 26 abr. 2020.

SENUMA, T.; YADA, H. **Microstructural evolution of plain carbon steels in multiple hot working**. In: RISØ NATIONAL LABORATORY. Annealing Processes—Recovery, Recrystallization, and Grain Growth, Proc. 7th RisØ Int. Symp. on Metallurgy and Materials Sei. Roshilde, Denmark, 1986. p. 547–552.

SHACKELFORD, J. F. Introduction to Materials Science for Engineers. 8th ed. New Jersey: Pearson, 2015. 687 p.

SICILIANO, F. **Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Nb Microalloyed Steels**. 1999. Tese (PhD Thesis and Metallurgical Engineering) - Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, Montreal, Canadá, 1999.

SICILIANO, F.; JONAS, J. J. Mathematical modeling of the hot strip rolling of microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31, n. 2, p. 511–530, fev. 2000. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-000-0287-8>. Acesso em 13 fev. 2020.

SOUZA, A. L. B. **Análise do comportamento termomecânico e da evolução microestrutural durante a laminação de tiras a quente de aço C-Mn via Deform™ 3D**. 2015. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

SOUZA, A. L. B. **Simulação Computacional do Início da Precipitação Induzida por Deformação Durante o Processamento Termomecânico de um Aço Microligado ao Nióbio em Resfriamento Contínuo**. 2019. 155f. Tese (Doutorado em Ciência e

Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

TAVARES, J. M. R. S. **Comunicação Interna: Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Porto: [S.n.], 1998, 105 p.

TOTTEN, G. E. *Steels Heat Treatment Handbook*. 2nd ed. Portland: CRC Press, 2006. 1576 p.

VALBERG, H. S. *Applied metal forming: including FEM analysis*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.

ZAMBON, M. F. **Modificação por Nitretação a Plasma das Superfícies dos Aços AISI-4140, AISI-420C e DIN16MnCr5**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

ZHOU, L.; HUANG, Z. Y.; WANG, C. Z.; ZHANG X. X.; XIAO, B. L.; MA. Z. Y. Constitutive flow behavior and finite element simulation of hot rolling of SiCp/2009 Al composite. **Materials Science & Engineering A**, China, v. 93, jun./out. 2015, p. 32-42. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0167663615002197?via%3Dihub>. Acesso em: 8 set. 2020.