

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO BAIXO
CARBONO EM MATRIZ FECHADA ACOPLADO COM A EVOLUÇÃO
MICROESTRUTURAL**

Araldo Luiz Isaias de Moraes

São Carlos

2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO BAIXO
CARBONO EM MATRIZ FECHADA ACOPLADO COM A EVOLUÇÃO
MICROESTRUTURAL**

Araldo Luiz Isaias de Moraes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais como requisito parcial à obtenção do
título de MESTRE EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Oscar Balancin

São Carlos
2013

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M827sn

Moraes, Araldo Luiz Isaias de.

Simulação numérica do forjamento a quente de um aço baixo carbono em matriz fechada acoplado com a evolução microestrutural / Araldo Luiz Isaias de Moraes. -- São Carlos : UFSCar, 2014.

90 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Metalurgia. 2. Simulação numérica. 3. Parâmetros de processamento. 4. Forjamento a quente. 5. Evolução microestrutural. I. Título.

CDD: 669 (20^a)

VITAE DO CANDIDATO

Graduado em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de Piracicaba
(2007)

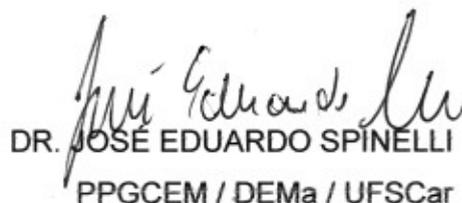
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE ARALDO LUIZ ISAIAS DE MORAES

APRESENTADO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, EM 22 NOVEMBRO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:



DR. OSCAR BALANCIN
ORIENTADOR
PPGCEM / DEMa / UFSCar



DR. JOSÉ EDUARDO SPINELLI
PPGCEM / DEMa / UFSCar



DR. IRIS BENTO DA SILVA
SEM / EESC / USP

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre presente em minha vida.

À minha esposa, pela paciência, amor e companheirismo.

Aos meus pais e irmãos pelo carinho e incentivo.

Ao professor e orientador Oscar Balancin pela ajuda, paciência e apoio que foram de fundamental importância para a conclusão deste mestrado.

À coordenação e secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFSCar.

Aos amigos que fiz durante minha caminhada até aqui e compartilho minha experiência.

À todos os professores do DEMa, em especial ao Professor Tomaz Ishikawa por ajuda e atenção dada durante o programa de mestrado.

À empresa, pelo apoio, disponibilidade de dados e recursos e estrutura necessária aos trabalhos.

RESUMO

O forjamento a quente em matriz fechada é um dos principais processos de fabricação de peças metálicas utilizadas na sustentação e fixação de cabos condutores em linhas de transmissão de energia elétrica. Neste processo de conformação, a qualidade microestrutural dos produtos, na maioria dos casos, é dependente do controle de vários parâmetros durante o processamento tais como geometria das matrizes e material de partida, número de estágios de deformação, sequência operacional, temperatura, deformação aplicada, taxa de deformação, entre outros. Dessa forma, este trabalho teve como proposta analisar os parâmetros de processo como temperatura, deformação e taxa de deformação bem como a evolução microestrutural durante o forjamento em matriz fechada de um aço baixo carbono comercial através do uso de um software comercial de análises de processos de conformação baseado no método dos elementos finitos. Para isso, foi realizada a simulação numérica do processo completo de forjamento a quente do produto gancho bola, de forma a reproduzir o processamento industrial. Os resultados mostraram que a simulação numérica foi capaz de fornecer dados para avaliar os parâmetros observados, pois os resultados obtidos foram coerentes com os resultados encontrados no processo real e houve boa concordância quando comparado o tamanho de grão simulado e medido por microscopia ótica.

ABSTRACT

NUMERICAL SIMULATION OF HOT CLOSED DIE FORGING OF A LOW CARBON STEEL COUPLED WITH MICROSTRUCTURE EVOLUTION

Hot closed die forging is the most used process to produce metal parts used in supporting and fixing cable conductors in transmission lines of electric power. In this forming process, the microstructural quality of the products, in most cases, is dependent on the control of several parameters during processing such as the geometry of dies and the starting material, the number of stages of deformation, operational sequence, temperature, strain, strain rate, and others. Thus, this work aimed to analyze the process parameters such as temperature, strain and strain rate as well as the microstructural evolution during the hot closed die forging of a low carbon steel through the use of commercial software for analysis of forming processes based on finite element method. The numerical simulation of the complete process of hot forging of product ball hook was conducted, in order to reproduce the real industrial process. The results showed that the simulation was efficient to describe parameters evaluations, since the results obtained were consistent with those found in the real process and there was good agreement when comparing simulated average grain size and measured by optical microscopy.

PUBLICAÇÕES

- A. L. I. Moraes, O. Balancin. Numerical simulation of hot closed die forging of a low carbon steel coupled with microstructure evolution. (Artigo submetido à revista Materials Research. ID: 2731-14).

ÍNDICE DE ASSUNTOS

BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 Fundamentos da conformação a quente	3
2.2 Processo de forjamento.....	5
2.3 Mecanismos de aumento de resistência e amaciamento durante a deformação a quente	6
2.3.1 Encruamento	7
2.3.2 Mecanismos de amaciamento	8
2.3.2.1 Recuperação Estática.....	8
2.3.2.2 Recristalização Estática.....	9
2.3.2.3 Recuperação Dinâmica	10
2.3.2.4 Recristalização Dinâmica	11
2.3.2.5 Recristalização Metadinâmica	14
2.4 Equações que descrevem a evolução microestrutural durante e após a conformação a quente.....	15
2.5 Processamento Termomecânico	18
2.6 Utilização de Softwares de Simulação por elementos finitos em Processos de Conformação.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Material.....	21
3.2 Método.....	21
3.2.1 Caracterização do processo industrial.....	22
3.2.2 Etapas do processo de forjamento industrial.....	23
3.2.2.1 Recalque e achatamento.....	23

3.2.2.2 Forjamento em matriz fechada.....	24
3.2.3 Análise Microestrutural.....	25
3.3 DEFORM™3D	26
3.3.1 Parâmetros de Entrada para as Simulações.....	28
3.3.1.1 Definição dos objetos.....	29
3.3.1.2 Interação entre objetos.....	32
3.3.1.3 Propriedades do material	32
3.3.1.4 Controles de simulação.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 Parâmetros de processo para o primeiro estágio.....	35
4.1.1 Variação da deformação	35
4.1.2 Variação da taxa de deformação	37
4.1.3 Variação da temperatura.....	38
4.1.4 Recristalização Dinâmica	39
4.1.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica	40
4.1.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios.....	41
4.1.7 Recristalização Metadinâmica no intervalo entre estágios.....	42
4.1.8 Recristalização Estática no intervalo entre estágios	43
4.1.9 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios.....	44
4.2 Parâmetros de processo para o segundo estágio	45
4.2.1 Variação da deformação	45
4.2.2 Variação da taxa de deformação	46
4.2.3 Variação da temperatura.....	47
4.2.4 Recristalização Dinâmica	48
4.2.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica	49
4.2.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios.....	50
4.2.7 Recristalização Estática no intervalo entre estágios	51
4.2.8 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios.....	52
4.3 Parâmetros de processo para o terceiro estágio.....	53
4.3.1 Variação da deformação	53
4.3.2 Variação da taxa de deformação	54
4.3.3 Variação da temperatura.....	55

4.3.4 Recristalização Dinâmica	56
4.3.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica.....	57
4.3.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios	58
4.3.7 Recristalização Estática no intervalo entre estágios.....	59
4.3.8 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios	60
4.4 Parâmetros de processo para o quarto estágio.....	61
4.4.1 Variação da deformação.....	61
4.4.2 Variação da taxa de deformação	63
4.4.3 Variação da temperatura	64
4.4.4 Recristalização Dinâmica	65
4.4.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica.....	66
4.4.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios	68
4.4.7 Recristalização Estática no intervalo entre estágios.....	68
4.4.8 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios	70
4.5 Parâmetros de processo para o quinto estágio	71
4.5.1 Variação da deformação.....	71
4.5.2 Variação da taxa de deformação	73
4.5.3 Variação da temperatura	74
4.5.4 Recristalização Dinâmica	75
4.5.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica.....	76
4.5.6 Recristalização Metadinâmica durante o resfriamento	77
4.5.7 Recristalização Estática durante o resfriamento.....	78
4.6 Verificação Microscópica do Tamanho Médio de Grão	80
5 CONCLUSÕES	83
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	85
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Composição química do aço carbono AISI 1020 (porcentagem em massa).....	21
Tabela 3.2 Principais parâmetros de entrada para a simulação.....	28
Tabela 3.3 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 1	30
Tabela 3.4 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 2	30
Tabela 3.5 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 3	31
Tabela 3.6 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 4	31
Tabela 3.7 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 5	31
Tabela 3.8 Composição química do aço AISI H13 (porcentagem em massa) .	32
Tabela 4.1 Tamanho médio de grãos referentes à posição “a” da amostra	81
Tabela 4.2 Tamanho médio de grãos referentes à posição “b” da amostra	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Forma típica da curva de escoamento plástico de materiais que se recuperam dinamicamente, sem picos de tensão.....	10
Figura 2.2 Representação esquemática de uma curva de escoamento plástico típica de materiais que recristalizam dinamicamente.....	12
Figura 2.3 Evolução da recristalização dinâmica através do mecanismo de <i>necklacing</i> , esquematicamente, de acordo com Sellars. (a) Para deformação abaixo da ε_c a microestrutura inicial é formada por grãos vizinhos; (b) Primeiro colar formado nos contornos por grãos recristalizados; (c) Segundo colar formado expandindo a recristalização dinâmica para o interior do grão; (d) e (e) Expansão do volume da recristalização dinâmica consumindo o interior do grão; (f) Curva de escoamento plástico correspondente.....	13
Figura 2.4 Representação esquemática da evolução da recristalização metadinâmica durante a laminação a quente	14
Figura 3.1 Diagrama de caracterização do processo industrial.....	22
Figura 3.2 Modelo esquemático de dois estágios do processo de recalque e o achatamento entre matriz plana.....	23
Figura 3.3 Modelo esquemático do processo de forjamento: pré-forjamento (esquerda) e forjamento final (direita).....	24
Figura 3.4 Peça conformada após os estágios de forjamento 1-6 (da esquerda para a direita): 1-2 Recalque; 3 Achatamento; 4-5 Forjamento em matriz; 6 Produto final após remoção da rebarba.....	25
Figura 3.5 Peça após a conformação do estágio 5 indicando as posições das amostras para medição do tamanho médio de grão austenítico.....	26
Figura 3.6 Relacionamento entre os módulos do DEFORM.....	27

Figura 4.1 Representação gráfica da distribuição de deformação plástica imposta ao material ao final do 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	36
Figura 4.2 Representação gráfica mostrando a distribuição da taxa de deformação imposta ao material durante o 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	37
Como pode ser visto na Figura 4.2 a distribuição da taxa de deformação se assemelha a distribuição de deformação com valores máximos na região central e chegando a zero à medida que se aproxima do pé do blank.	37
Figura 4.3 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material ao final do 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	38
Figura 4.4 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final da deformação do 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	39
Figura 4.5 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do primeiro estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	40
Figura 4.6 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	41
Figura 4.7 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada metadinamicamente do material após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	42
Figura 4.8 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	43
Figura 4.9 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	44

Figura 4.10 Representação gráfica da distribuição de deformação plástica imposta ao material ao final do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	45
Figura 4.11 Representação gráfica mostrando a distribuição da taxa de deformação imposta ao material durante o 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	46
Figura 4.12 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material ao final do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	47
Figura 4.13 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final da deformação do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	48
Figura 4.14 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	49
Figura 4.15 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 5,5 s entre o 2º e 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	50
Figura 4.16 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 5,5 s entre o 2º e 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	51
Figura 4.17 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 5,5 s entre o 2º e 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	52
Figura 4.18 Representação gráfica da distribuição de deformação plástica imposta ao material ao final do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	53
Figura 4.19 Representação gráfica mostrando a distribuição da taxa de deformação imposta ao material durante o 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	54

Figura 4.20 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material ao final do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	55
Figura 4.21 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final da deformação do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	56
Figura 4.22 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	57
Figura 4.23 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 9,5 s entre o 3º e 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	58
Figura 4.24 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 9,5 s entre o 3º e 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	59
Figura 4.25 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 9,5 s entre o 3º e 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	60
Figura 4.26 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 4º estágio.....	61
Figura 4.27 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 4º estágio, aplicando corte transversal: (a) região da curvatura do gancho e (b) região da extremidade do gancho.....	62
Figura 4.28 Representação gráfica mostrando a variação da taxa de deformação imposta ao material ao final do 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	63
Figura 4.29 Representação gráfica mostrando a variação da temperatura do material ao final do 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	64

Figura 4.30 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final do 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	65
Figura 4.31 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 4º estágio, aplicando corte transversal: (a) na região da curvatura do gancho, (b) na extremidade do gancho.	67
Figura 4.32 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 5,2 s entre o 4º e 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	67
Figura 4.33 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 5,2 s entre o 4º e 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.....	69
Figura 4.34 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 5,2 s entre o 4º e 5º estágio, aplicando corte transversal: (a) na região da curvatura do gancho, (b) na extremidade do gancho.....	70
Figura 4.35 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 5º estágio.	71
Figura 4.36 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 5º estágio, aplicando corte transversal: (a) região da curvatura do gancho e (b) região da extremidade do gancho.	72
Figura 4.37 Representação gráfica mostrando a variação da taxa de deformação imposta ao material ao final do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	73
Figura 4.38 Representação gráfica mostrando a variação da temperatura do material ao final do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	74
Figura 4.39 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.	75

- Figura 4.40 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 5^o estágio, aplicando corte transversal: (a) na região da curvatura do gancho, (b) na extremidade do gancho..... 76
- Figura 4.41 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada metadinamicamente do material após o final da deformação do 5^o estágio. 77
- Figura 4.42 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material 2 s após o final da deformação do 5^o estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal..... 78
- Figura 4.43 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material 5 s após o final da deformação do 5^o estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal..... 79
- Figura 4.44 Microestrutura do material do núcleo da amostra após ataque químico, obtida da região “a” da peça conforme Figura 3.5..... 80
- Figura 4.45 Microestrutura do material do núcleo da amostra após ataque químico, obtida da região “b” da peça conforme Figura 3.5..... 80

1 INTRODUÇÃO

A atual expansão e melhoria do sistema energético nacional é suportada pela construção de novas usinas hidrelétricas e linhas de transmissão que transportam a energia gerada até os centros consumidores. Este mercado emprega inúmeros dispositivos fabricados em materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos que fazem a sustentação e fixação dos cabos condutores as torres metálicas. Em geral, grande parte das peças metálicas são fabricadas em aços de baixo e médio carbono e obtidas pelo processo de forjamento a quente, as quais estão submetidas a esforços estáticos e dinâmicos durante sua vida útil.

Durante o forjamento a quente, a não uniformidade na distribuição de temperatura e deformação devido a variação da geometria e carga aplicada resultam em microestruturas heterogêneas. Sendo estas, um dos principais defeitos que afetam as propriedades mecânicas de peças forjadas. Para reverter este problema pode-se realizar tratamentos térmicos posteriores ao processo mecânico, que agregam custos adicionais indesejáveis ao produto.

A análise e conhecimento dos mecanismos de endurecimento e de amaciamento que atuam no material em condições de deformação a quente permitem descrever a evolução microestrutural do produto durante e após o processamento. Dessa forma, melhores propriedades como resistência mecânica são alcançadas pela melhoria na qualidade microestrutural.

Nos dias atuais, em que a indústria para ser competitiva necessita reduzir custos e melhorar a qualidade de seus produtos, o uso de softwares de análise por elementos finitos que permitam simular seus processos de fabricação para otimização e controle se torna essencial para reduzir as paradas de produção para testes e correções.

Entre os vários softwares disponíveis no mercado, o DEFORM™3D é muito utilizado devido a sua qualidade em reprodução de processos de conformação plástica.

Este trabalho tem por objetivo a simulação numérica pelo DEFORM™3D de um processo de forjamento a quente de um aço de baixo carbono comercial em matriz fechada, visando demonstrar a variação da temperatura, deformação

e taxa de deformação bem como a evolução microestrutural durante a conformação. Ao final da simulação os resultados obtidos para tamanho médio de grão são comparados com os valores obtidos por microscopia ótica em amostras de peças retiradas do processo industrial.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma abordagem dos fundamentos teóricos que envolvem o tema deste trabalho. Inicialmente são descritos os fundamentos da conformação a quente e as características do processo de forjamento. São abordados também os mecanismos de aumento de resistência e amaciamento durante a deformação a quente, as equações que descrevem a evolução microestrutural durante e após a conformação. Em seguida é feita uma breve revisão sobre processamento termomecânico e a simulação numérica de processos de conformação dos metais.

2.1 Fundamentos da conformação a quente

A conformação mecânica de uma maneira geral tem o objetivo de dar a forma à peça/produto desejada alterando sua microestrutura e conseqüentemente suas propriedades mecânicas.

Vários processos de conformação mecânica dos aços são descritos na literatura, e, podemos classificá-los em dois grandes grupos quanto ao tipo de força aplicada. Processos de compressão direta, onde a força é aplicada na superfície da peça e o metal alonga-se em direção perpendicular ao sentido da força, como exemplo, a laminação e forjamento. Nos processos de compressão indireta, como, trefilação, extrusão e embutimento, a força direta é geralmente trativa, mas as tensões compressivas desenvolvidas pela reação matriz-peça deformam o metal sob um estado de tensões combinado [1].

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de conformação podem ser classificados em processos de conformação a quente e conformação a frio. O trabalho a quente caracteriza-se pela ocorrência de mecanismos de amaciamento do metal conformado durante a deformação e no intervalo entre etapas sob determinadas condições de temperatura e taxa de deformação. No entanto, durante o trabalho a quente os mecanismos de

aumento de resistência e amaciamento ocorrem simultaneamente, sendo a microestrutura final do produto o resultado desta disputa.

O aumento de resistência no trabalho ao morno e a quente é devido ao encruamento e a outras formas de bloqueio de discordâncias, como a ocorrência de precipitados, solução sólida e o ancoramento por contornos de grão. Os mecanismos de amaciamento como a recuperação e recristalização atuam no rearranjo e aniquilamento de discordâncias geradas durante o encruamento, tendo a recristalização, a função de alterar a subestrutura e conseqüentemente a microestrutura do material [2].

Durante a conformação mecânica, a deformação plástica ocorre principalmente por deslizamentos de determinados planos cristalinos. Nesse processo, o reticulado cristalino sofre rotação, por deslizamento de planos ou por maclação, para orientações mais favoráveis, estabelecendo a chamada textura de deformação. A textura final de deformação de uma peça varia de acordo com mudança de forma imposta na conformação e da temperatura de deformação, sendo que para baixas deformações depende da orientação inicial dos grãos antes da deformação [3].

Esta rotação em busca de orientações favoráveis provoca um grande número de heterogeneidades de deformação e são caracterizadas como componentes intergranulares, pois a densidade de discordâncias armazenadas varia de grão para grão, gerando um gradiente de energia armazenada dentro de cada grão e variando de um grão para outro grão, que possui forte influência na recuperação e na recristalização do material [4].

As heterogeneidades de deformação exercem influência significativa em diversos processos metalúrgicos. Do ponto de vista microestrutural, estas regiões possuem energia interna maior que a encontrada nas vizinhanças. Em conseqüência, propiciam condições satisfatórias para a ocorrência de corrosão localizada, atuam como sítios preferenciais para o início da recristalização e até mesmo a nucleação de trincas em condições particulares de carregamento [4].

2.2 Processo de forjamento

Forjamento é o processo de conformação através do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão através de prensas. Na fabricação de peças de grande porte é desejável realizar o forjamento a quente, pois a capacidade da máquina será menor devido à queda na tensão de escoamento do material em altas temperaturas. Por outro lado, o forjamento a frio permite a obtenção de peças com maior qualidade na reprodução de detalhes e tolerâncias dimensionais.

Existem duas classes principais de equipamentos de forjamento: os martelos e as prensas. Os martelos provocam deformação do metal por impacto e as prensas submetem o metal a uma força de compressão, à baixa velocidade.

O processo de forjamento subdivide-se em duas categorias: forjamento livre, ou em matriz aberta, e forjamento em matriz fechada. No processo de forjamento livre o material é deformado entre matrizes planas ou de forma muito simples. Esse processo é usado mais comumente para peças grandes ou quando o número de componentes é pequeno, inviabilizando a construção de uma matriz fechada. Frequentemente o forjamento livre é usado para preparar a forma da peça para o forjamento em matriz [5].

No forjamento em matriz fechada a peça é deformada entre duas metades de matriz que dão a forma final desejada ao metal. A peça a trabalhar é deformada sob alta pressão numa cavidade fechada, e, portanto podem ser produzidas peças forjadas de precisão com tolerâncias dimensionais mínimas [5].

Neste processo, devido à complexidade de preparar e distribuir o material para preencher as diversas secções da peça, geralmente utiliza-se um volume maior de material do que o da cavidade a ser preenchida, de tal forma, que o excesso de material será escoado para a chamada bacia de rebarba.

Um processo convencional de forjamento é composto por uma série de etapas típicas como: corte do material de partida, aquecimento e homogeneização da temperatura, forjamento livre e forjamento em matriz fechada (em uma única ou várias etapas), retirada da rebarba e tratamento térmico quando necessário.

2.3 Mecanismos de aumento de resistência e amaciamento durante a deformação a quente

Durante a deformação plástica de um aço em altas temperaturas, tem-se inicialmente o encruamento do material, aumentando a sua resistência, devido ao aumento na densidade de discordâncias. Com o aumento da energia armazenada durante a deformação, iniciam-se os processos de amaciamento dinâmicos. Discordâncias são eliminadas individualmente, formando células ou subgrãos durante a recuperação dinâmica e são eliminadas coletivamente com a nucleação e crescimento de grãos durante a recristalização dinâmica. Imediatamente após a interrupção da deformação, no intervalo entre deformações, sem a necessidade de um tempo de incubação, tem-se a recuperação estática, que só amacia o material até certa extensão. Após um período de incubação, em altas temperaturas, tem-se o início da recristalização estática com a nucleação e o crescimento de novos grãos. Paralelamente à recuperação estática, pode-se ter, também, a recristalização metadinâmica com o crescimento de núcleos formados dinamicamente durante a deformação [6,7].

Dentre os mecanismos de endurecimento podemos destacar o encruamento, a precipitação, solução sólida e refino de grãos. Contudo a efetividade desses mecanismos está condicionada aos parâmetros de processamento como temperatura, taxa de deformação e deformação aplicadas.

A seguir será descrito brevemente o processo de encruamento, e, em seguida os mecanismos de amaciamento.

2.3.1 Encruamento

O encruamento é um dos mecanismos atuantes para o aumento da resistência mecânica do material durante a deformação a quente, gerando um aumento significativo na densidade de discordâncias e pelo tipo de arranjo em que estas se agrupam.

Durante a deformação plástica, podem estar presentes na rede cristalina, basicamente, dois tipos de discordâncias. As discordâncias móveis, através das quais se têm mudanças de forma e/ou acomodações em regiões do cristal, nas quais ocorre deformação heterogênea (localizada), como as que ocorrem na proximidade de contornos de grão e interfaces entre partículas de segunda fase e a matriz. Este tipo de discordâncias aumenta com o acréscimo de partículas de segunda fase, assim como os campos de tensão interna por elas gerados. O segundo tipo, imóveis, acumulam-se interagindo entre elas de forma aleatória, aprisionando-se e formando subestruturas de emaranhados, células ou subgrãos [2,8].

O encruamento é tanto maior quanto maior for a dificuldade das discordâncias móveis caminharem e vencerem os campos de tensão gerados na rede cristalina pelos outros defeitos anteriormente armazenados. Quando os materiais são plasticamente deformados, discordâncias são geradas. Com a continuidade da deformação, as discordâncias movem-se em seus sistemas de escorregamento. As interações entre estes sistemas e contornos de grão ou qualquer obstáculo substancial, bloqueiam o escorregamento e criam empilhamentos. Este bloqueio e a geração de discordâncias continuam até o estágio onde algumas discordâncias bloqueadas são capazes de evitar os obstáculos através de deslizamento cruzado nos planos de deslizamento cruzado [8-11].

2.3.2 Mecanismos de amaciamento

Durante o processo de conformação a quente os mecanismos de amaciamento atuam simultaneamente com o encruamento durante a deformação. Pode-se identificar cinco mecanismos distintos de restauração que operam durante a deformação e no intervalo entre deformações: a recuperação estática, a recuperação dinâmica, a recristalização estática, a recristalização dinâmica e a recristalização metadinâmica.

A recristalização dinâmica ocorre durante a deformação, enquanto que a recristalização estática ocorre após um tempo de incubação adequado para nuclear e crescer novos grãos livres de deformação na estrutura deformada a quente durante o amaciamento pós-deformação. A recristalização metadinâmica ocorre quando núcleos formados dinamicamente durante a deformação crescem ainda mais após a interrupção da deformação. Cada um destes processos pode alterar as características de grãos austeníticos como por exemplo, tamanho e distribuição, bem como a textura cristalográfica, afetando assim as cargas de forjamento, as características de transformação do produto por resfriamento e as propriedades mecânicas finais [12].

2.3.2.1 Recuperação Estática

O processo de recuperação estática refere-se às mudanças microestruturais que ocorrem em um material deformado antes de iniciar a recristalização, imediatamente após a interrupção da deformação sem a necessidade de um tempo de incubação, uma vez que a aniquilação de defeitos dá-se individualmente. Em baixas temperaturas ($0,2T_f$, onde T_f é a temperatura de fusão), ocorrem reações entre os defeitos pontuais, como aniquilação de lacunas e migração de defeitos pontuais para contornos de grãos ou discordâncias. Nas temperaturas intermediárias ($0,2T_f$ - $0,3T_f$) ocorre aniquilação de discordâncias de sinais opostos e rearranjo de sub-contornos, delineando-os. Em temperaturas mais altas (acima de $0,5T_f$) as discordâncias

podem escorregar de forma transversal e escalar, o que propicia a ocorrência de poligonização e formação de subgrãos [13].

Durante a recuperação estática a energia armazenada no material, ou seja, a força motriz para a restauração é reduzida pelo movimento das discordâncias por dois processos: aniquilação e rearranjo de discordâncias de sinais opostos. Ambos os processos ocorrem por escorregamento, escalagem e deslizamento cruzado de discordâncias que por sua vez podem influenciar a natureza e a cinética de recristalização. A divisão entre recuperação e recristalização é por vezes difícil de definir, porque os mecanismos de recuperação desempenham um papel importante na nucleação da recristalização [13,14].

2.3.2.2 Recristalização Estática

A recuperação estática inicia-se após o término da deformação, restaurando um material até certa proporção, mas o amaciamento completo só poderá ocorrer por meio da recristalização estática. Dessa forma, discordâncias são eliminadas coletivamente com a nucleação e crescimento de novos grãos isentos de deformação. Para que esse processo de nucleação de novos grãos ocorra é necessário um tempo de incubação e uma quantidade de energia armazenada maior que um valor crítico característico de cada material [15,16].

Algumas características da recristalização estática podem ser descritas da seguinte maneira [17]:

- a) existe a necessidade de uma quantidade mínima de deformação (deformação crítica) antes que a recristalização estática possa ocorrer;
- b) em altas temperaturas é necessária uma menor quantidade de deformação para que a recristalização estática ocorra;
- c) o tamanho de grão final está intimamente relacionado à quantidade de deformação, à temperatura de recozimento e com o tamanho de grão original.

2.3.2.3 Recuperação Dinâmica

Durante os estágios iniciais de deformação de um material com alta energia de falha de empilhamento em alta temperatura, ocorre um aumento da tensão de escoamento plástico porque as discordâncias interagem e multiplicam-se com acréscimo na força motriz e na taxa de recuperação, facilitando o desenvolvimento de uma microestrutura com contornos de subgrãos iniciados por aniquilação de pares de discordâncias ou rearranjo de discordâncias que podem escalar ou escorregar transversalmente diminuindo a taxa de encruamento. Quando a taxa de aniquilação se iguala a taxa de geração de discordâncias, atinge-se um regime de estado estacionário, no qual a tensão torna-se constante, ou seja, não mais varia com a deformação. Neste estágio os grãos estão deformados, mas os subgrãos se tornam constantes em forma e tamanho com baixa energia caracterizando a recuperação dinâmica, como indicado na Figura 2.1.

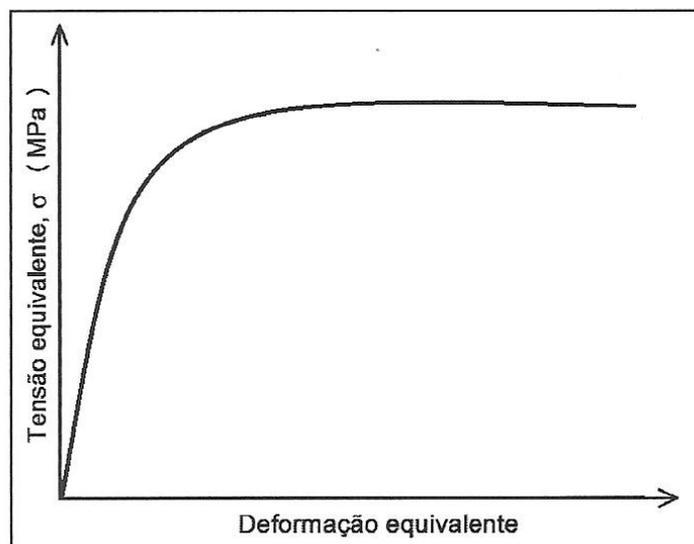


Figura 2.1 Forma típica da curva de escoamento plástico de materiais que se recuperam dinamicamente, sem picos de tensão [2].

Em materiais com baixa energia de falha de empilhamento as discordâncias parciais caminham longe uma das outras e não podem se juntar facilmente para se aniquilarem. Por isso, os subgrãos possuem contornos mal

delineados e são de pequeno tamanho. A taxa de aniquilação é menor que a taxa de geração de discordâncias, de forma que um acúmulo de deformação vai sendo incorporado ao material durante a conformação. A densidade de discordâncias aumenta rapidamente com a deformação. Quando um valor crítico é atingido, a recristalização dinâmica começa a operar [2].

2.3.2.4 Recristalização Dinâmica

A recristalização dinâmica é uma poderosa ferramenta para controlar a evolução microestrutural e propriedades mecânicas durante o processamento industrial. Quando este tipo de processo de amaciamento opera, a nucleação e o crescimento de novos grãos ocorrem durante a aplicação da deformação. Este é um mecanismo que atua principalmente em metais com baixa e média energia de falha de empilhamento que possuem uma recuperação lenta. Dessa forma, a taxa de geração torna-se maior que a taxa de aniquilação resultando num aumento da densidade de discordâncias. Com o acúmulo de discordâncias geradas pelo aumento da deformação ocorre também um acúmulo na quantidade de energia interna do material gerando o potencial termodinâmico para a recristalização dinâmica. Por se tratar de mecanismo termicamente ativado, existe uma deformação crítica a ser atingida para que ocorra a geração de novos grãos livres de deformação [18,19].

A Figura 2.2 representa uma curva típica de materiais que recristalizam dinamicamente. Nota-se que nesta curva que a tensão aumenta devido ao encruamento imposto pela deformação até alcançar um valor crítico (σ_c e ϵ_c) tendo início à recristalização dinâmica com a nucleação de novos grãos. No entanto, a tensão continua aumentando até atingir um pico de tensão (σ_p e ϵ_p) quando ocorre um equilíbrio entre as taxas de geração e aniquilação de discordâncias. Com o aumento da deformação, inicia-se um rápido amaciamento até alcançar o estado estacionário (σ_{ss} e ϵ_{ss}) quando a tensão não mais se altera com a deformação. A partir desse estágio, a subestrutura é

mantida constante com a atuação simultânea dos mecanismos de encruamento e restauração.

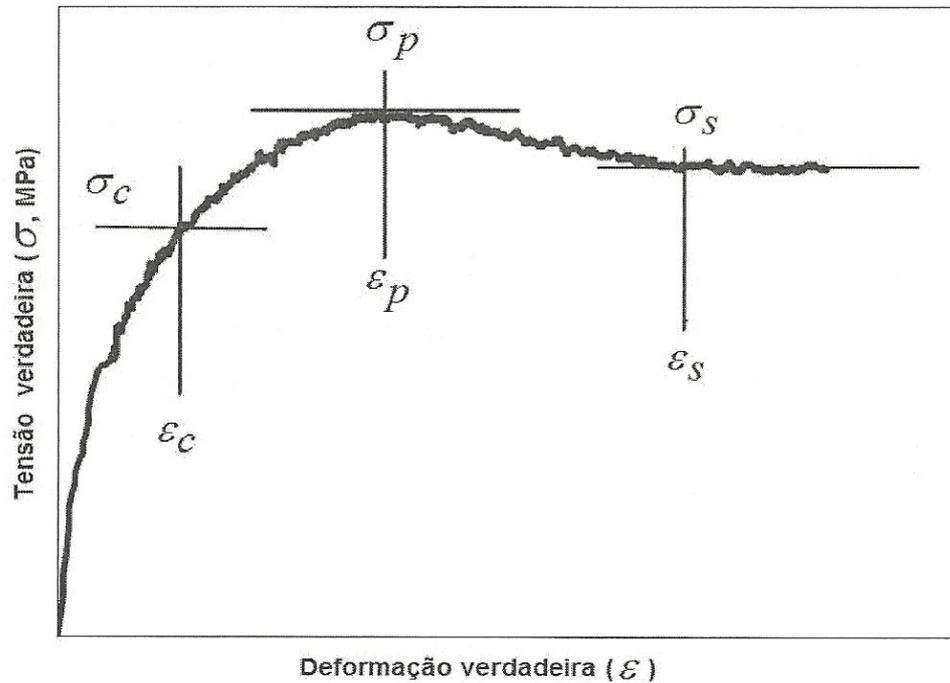


Figura 2.2 Representação esquemática de uma curva de escoamento plástico típica de materiais que recristalizam dinamicamente [20].

Os sítios preferenciais de nucleação de novos grãos são os contornos dos grãos com alta densidade de discordâncias e o mecanismo de nucleação atuante é conhecido como “necklace” (colar). Este mecanismo está representado na Figura 2.3 onde pode ser observado o efeito da recristalização dinâmica na evolução microestrutural no material caracterizando a substituição dos antigos grãos deformados por novos grãos livres de deformação.

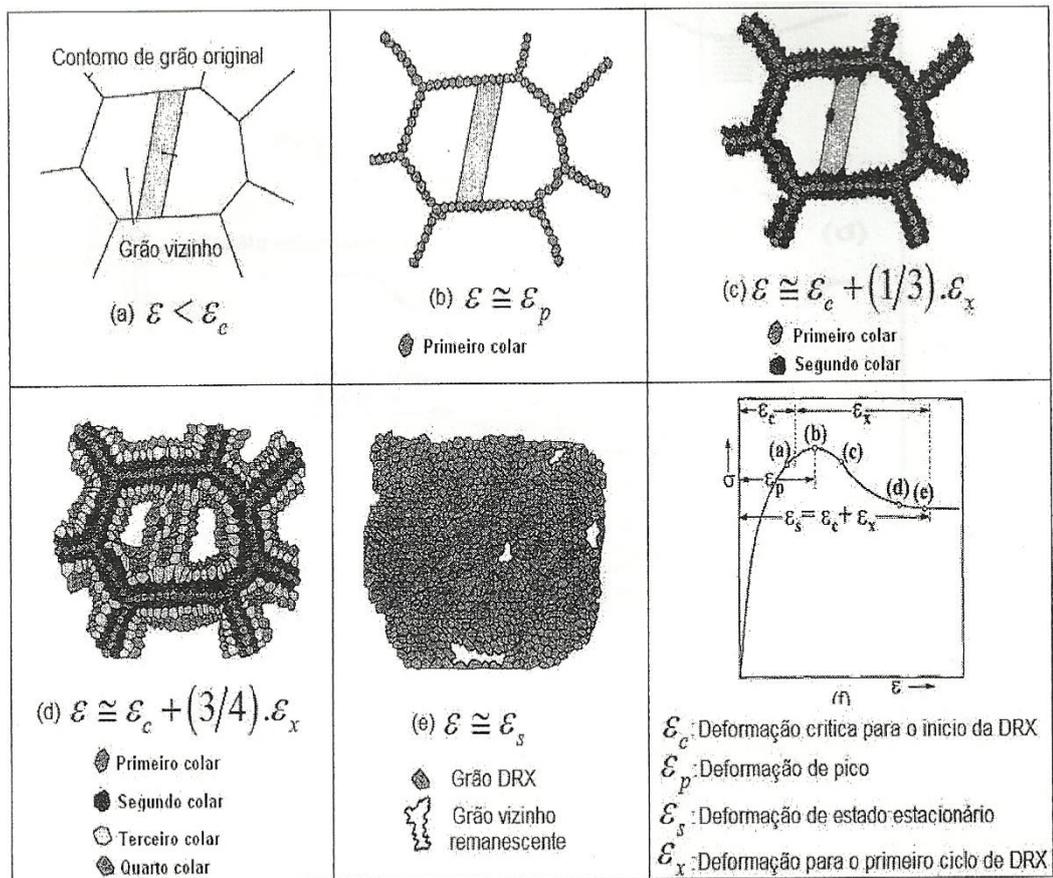


Figura 2.3 Evolução da recristalização dinâmica através do mecanismo de *necklacing*, esquematicamente, de acordo com Sellars [21]. (a) Para deformação abaixo da ε_c a microestrutura inicial é formada por grãos vizinhos; (b) Primeiro colar formado nos contornos por grãos recristalizados; (c) Segundo colar formado expandindo a recristalização dinâmica para o interior do grão; (d) e (e) Expansão do volume da recristalização dinâmica consumindo o interior do grão; (f) Curva de escoamento plástico correspondente.

2.3.2.5 Recristalização Metadinâmica

A recristalização metadinâmica é caracterizada pelo crescimento de núcleos recristalizados dinamicamente após a interrupção da deformação. Após a recristalização dinâmica ter sido iniciada, passam a agir três processos distintos, e são descritos como, recuperação estática, recristalização metadinâmica e recristalização estática. Enquanto os núcleos da recristalização dinâmica estão crescendo por recristalização metadinâmica, o restante do material sofre recristalização e recuperação estática. Ao contrário da recristalização estática, a recristalização metadinâmica não necessita de um tempo de incubação, pois os núcleos foram formados pela recristalização dinâmica. Conseqüentemente, a microestrutura de grãos recristalizados dinamicamente está sujeita a uma rápida mudança depois do descarregamento e isto pode resultar em um crescimento do tamanho de grão [17].

A Figura 2.4 apresenta esquematicamente o processo de recristalização metadinâmica.

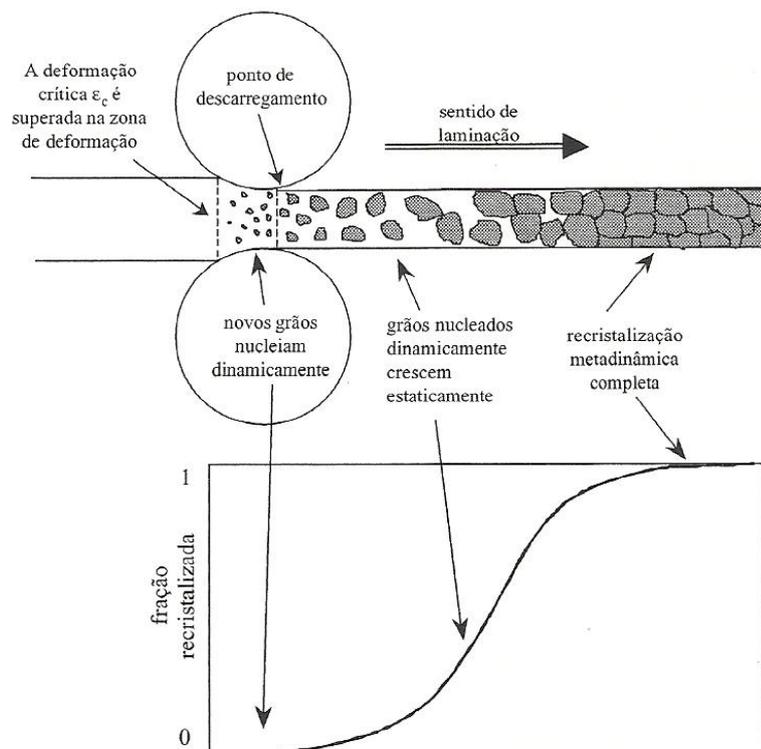


Figura 2.4 Representação esquemática da evolução da recristalização metadinâmica durante a laminação a quente [22].

2.4 Equações que descrevem a evolução microestrutural durante e após a conformação a quente

Um número de modelos de relações matemáticas descrevendo vários fenômenos de recristalização são propostos na literatura. Estes modelos são suscetíveis à deformação aplicada, taxa de deformação e temperatura de deformação além do tamanho de grão antes da deformação. No entanto, é conhecido que a composição de aços C-Mn não afetam a cinética de recristalização significativamente [23]. Dentre os modelos está a equação constitutiva do aço representada pela equação 2.1 que descreve o processo de ativação térmica da deformação a quente proposta por Sellars e Tegart [24]. Esta equação é utilizada para se obter o valor da energia de ativação (Q) associada à tensão de pico, relacionando os parâmetros de processo como taxa de deformação, temperatura e o esforço aplicado com o parâmetro Z.

$$Z = \dot{\epsilon} \times \exp (Q / RT) = A [\sinh (\alpha \sigma_p)]^n \quad (2.1)$$

Onde Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação (s^{-1}), Q é a energia de ativação aparente para a deformação a quente (kJ/mol), R é a constante universal dos gases (8,31 J/mol.K), T é a temperatura absoluta (K), σ_p é a tensão de pico correspondente (MPa) e A, α e n são constantes dependentes do material.

A energia de ativação (Q) e as constantes A, α e n foram determinadas para aços médio carbono [25], e, portanto, a equação pode ser expressa por:

$$\dot{\epsilon} = 5,5 \times 10^{15} \sinh (0,013 \sigma_p)^5 \exp (358000 / RT)^{-1} \quad (2.2)$$

A seguir é demonstrado um conjunto de equações propostas por Hodgson e outros autores [26,27], que descrevem a cinética de recristalização e a cinética de crescimento de grãos durante a deformação e no intervalo entre etapas de deformações, capazes de determinarem a evolução microestrutural durante todo o processo de conformação mecânica a quente de aços C-Mn.

Durante um processo de conformação a quente, para que se tenha início a recristalização dinâmica é necessário que seja atingida a deformação crítica (ϵ_c), que pode ser dada pela equação 2.3:

$$\epsilon_c = 4,76 \times 10^{-4} \exp(8000/T) \quad (2.3)$$

A evolução da fração recristalizada dinamicamente em função do tempo pode ser descrita pela equação 2.4:

$$X = 1 - \exp[-0,693 (\epsilon - \epsilon_c / \epsilon_{0,5})^2] \quad (2.4)$$

Onde $\epsilon_{0,5}$ representa a deformação acima da deformação crítica necessária para se obter 50% de fração recristalizada dinamicamente, e é expressa por:

$$\epsilon_{0,5} = 1,144 \times 10^{-5} d_0^{0,28} \dot{\epsilon}^{0,05} \exp(6420/T) \quad (2.5)$$

Após a recristalização dinâmica o tamanho de grão (μm) pode ser obtido através da equação 2.6:

$$d_{\text{DRX}} = 1,60 \times 10^4 Z^{-0,23} \quad (2.6)$$

Onde Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, que pode ser definido como a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$), juntamente com a influência da temperatura de deformação (T). O parâmetro Z pode ser dado pela equação 2.7:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(300000/RT) \quad (2.7)$$

A fração recristalizada estática ou metadinamicamente no intervalo de deformações após uma dada redução é expressa pela equação de Avrami que para o aço C-Mn tem a forma:

$$X = 1 - \exp [- 0,693 (t / t_{0,5})^q], \quad (2.8)$$

Onde q é uma constante (sendo $q = 1$ para recristalização estática e $q = 1,5$ para metadinâmica) e $t_{0,5}$ representa o tempo necessário para se ter 50% de fração recristalizada, e ambos processos de recristalização dependem das condições durante e após a deformação.

Se o amaciamento ocorrer por recristalização estática ($\epsilon < \epsilon_c$):

$$t_{0,5} = 2,3 \times 10^{-15} d_0^2 \epsilon^{-2,5} \exp (230000/RT) \quad (2.9)$$

Se o amaciamento ocorrer por recristalização metadinâmica ($\epsilon > \epsilon_c$):

$$t_{0,5} = 0,4 Z^{-0,8} \exp (240000/RT) \quad (2.10)$$

Se o amaciamento ocorre pela recristalização estática, o tamanho de grão (μm) é expresso por:

$$d_{\text{SRX}} = 343 d_0^{0,4} \epsilon^{-0,5} \exp (-45000/RT) \quad (2.11)$$

De maneira similar, o tamanho de grão (μm), para a recristalização metadinâmica é dado por:

$$d_{\text{MDRX}} = 2,6 \times 10^4 Z^{-0,23} \quad (2.12)$$

Quando a recristalização se completa, a microestrutura ainda não é estável. A quantidade de área dos contornos passa a atuar como potencial termodinâmico para o crescimento dos grãos, que é dependente do tempo e da temperatura, podendo ser descrito por equações da forma:

$$d^7 = d_0^7 + 1,65 \times 10^{24} t \exp(-347000/RT) \quad (2.13)$$

Onde d_0 é o tamanho de grão recristalizado, e t o tempo entre passes.

2.5 Processamento Termomecânico

Processamento termomecânico pode ser definido como uma sequência de deformações a quente, por exemplo, em laminação ou forjamento, escolhida para a finalidade de alcançar uma microestrutura pré-determinada da austenita antes de sua transformação. Portanto, o processamento a quente controlado não significa simplesmente o controle de passes de laminação e temperaturas em sentido absoluto, mas sim, meios para controlar os passes e a temperatura para atingir um objetivo metalúrgico [28].

Assim, uma prática estreitamente controlada pode ou não ser processamento termomecânico dependendo se a microestrutura pré-determinada da austenita foi ou não alcançada. Um controle apropriado durante o processamento termomecânico significa que tanto a austenita, bem como os seus produtos de transformação subsequentes podem exibir uma microestrutura de grãos refinados. Quando a austenita é o grão refinado, melhorias são observadas tanto na ductilidade a quente como na resistência mecânica da peça de trabalho quando comparadas com aços bainíticos e martensíticos temperados ou microestruturas brutas do processo de conformação [28].

Existem duas abordagens diferentes para a deformação da austenita, sendo elas: processamento termomecânico convencional e processamento termomecânico controlado [28]. Para o primeiro caso o processo consiste de uma sequencia de passes de deformação com o controle apenas das mudanças de geometria e o segundo visa também o controle da microestrutura final do produto.

2.6 Utilização de Softwares de Simulação por elementos finitos em Processos de Conformação

Atualmente produtos para a indústria demandam de alta qualidade em curto prazo. O projeto e otimização dos processos de conformação são frequentemente baseados na experiência operacional de pessoas envolvidas no processo. Portanto, geralmente são necessários vários testes que se tornam inviáveis devido aos altos custos de maquinários e queda da produção. Para evitar estes métodos empíricos, o uso crescente de simulação numérica de processos de conformação é o início de uma importante ferramenta para o projeto e desenvolvimento de novos produtos. Pode ser usado não somente para comprovar a viabilidade de um processo de produção, mas também, para prever a microestrutura e, além disso, as propriedades do componente [29].

O processo de forjamento é uma das mais antigas técnicas de trabalho do metal, e, continua a ser hoje um dos mais importantes processos de fabricação abrangendo desde os processos primários, tais como a redução do tamanho de grandes lingotes, quanto para o microforjamento net-shape de componentes eletrônicos. Tal diversidade de escala pode apresentar à primeira vista uma gama proibitiva de requisitos para diferentes simulações numéricas, mas necessariamente não é verdade. É evidente que certas questões dependentes do tamanho devem ser consideradas como, quantos elementos devem ser utilizados para a modelagem de um lingote, ou a orientação dos grãos é importante em microescala, mas a grande maioria dos processos de forjamento pode ser modelada utilizando um único código que descreva a

plasticidade e seja capaz de reproduzir um modelo realista do processo real. Portanto, as técnicas de simulação numérica podem, em princípio, responder há algumas perguntas como, quantos estágios de deformação são necessários para um determinado produto, um produto pode ser forjado usando a técnica net-shape a fim de evitar processos de pós-forjamento, as ferramentas suportarão a carga cíclica inevitável em alto volume de forjamento a quente, o produto final terá a microestrutura de grãos e propriedades mecânicas desejadas e assim por diante [30].

A simulação do processo de forjamento pode implicar simplesmente na modelagem exclusivamente do processo de deformação, mas se esta definição restrita for aplicada excluiria muitos outros aspectos importantes do processo de produção, como a preparação do lingote, aquecimento antes do processo, recozimento ou arrefecimento entre estágios, comportamento térmico pós-processo, recuperação durante o descarregamento, tensões nas matrizes, deformação e desgaste, os fenômenos de lubrificação, comportamento da prensa de forjamento, etc. A simulação completa deve incluir todas estas características, mas este modelo completo pode exigir melhorias na capacidade de processamento de computadores [30].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

No presente trabalho foi utilizado um aço baixo carbono comercial adquirido em barras laminadas de diâmetro de 1.1/8". A Tabela 3.1 apresenta a composição química típica para este aço, conforme certificado do fabricante.

Tabela 3.1 Composição química do aço carbono AISI 1020 (porcentagem em massa)

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
0,21	0,51	0,021 máx.	0,013 máx.	0,14

3.2 Método

Para este trabalho foi utilizado o software de análise por elementos finitos DEFORM™3D na versão 10.0 para reproduzir o processo de forjamento a quente do produto “Gancho bola” em aço de baixo carbono comercial em matriz fechada, analisando a variação da temperatura, deformação e taxa de deformação bem como a evolução microestrutural durante a conformação. Após o término da simulação é realizado uma comparação entre o tamanho de grão obtido pelo DEFORM™3D e o medido em amostras retiradas de peças obtidas pelo processamento industrial.

3.2.1 Caracterização do processo industrial

Na etapa inicial deste trabalho foi realizada a caracterização do processo industrial com o levantamento dos dados de entrada necessários para a reprodução do processo em escala industrial no software DEFORM™3D.

Foram determinadas as geometrias do material conformado e matrizes, a temperatura de deformação, velocidade de avanço do martelo da prensa e tempo entre estágios em todas as etapas do processo. O resumo dos dados levantados encontram-se na Figura 3.1.

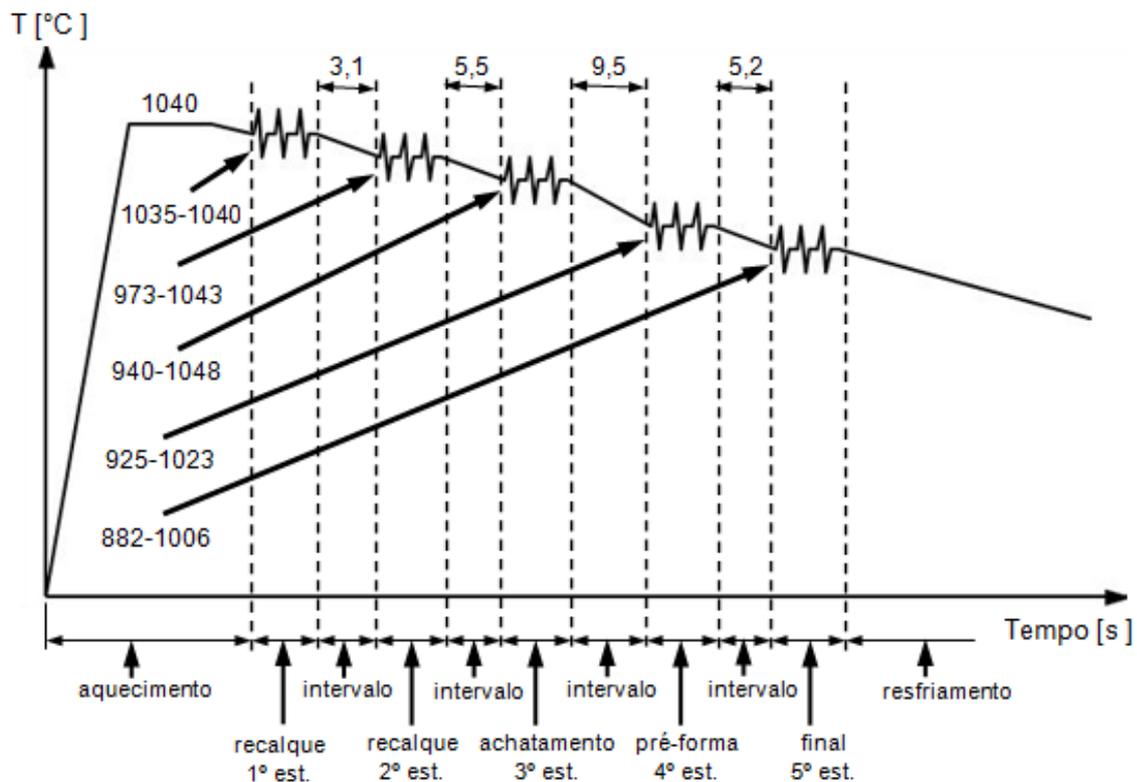


Figura 3.1 Diagrama de caracterização do processo industrial.

O material de partida possui secção cilíndrica com diâmetro de 28,5mm por 185mm de comprimento e temperatura inicial de 1040°C. A geometria das matrizes foi cedida pela empresa que produz este produto através de arquivos de software de CAD. As velocidades de avanço do martelo das prensas de fuso utilizadas no recalque e forjamento são de 125 m/s e 200 m/s respectivamente.

O produto “Gancho bola” objeto de estudo deste trabalho atualmente é processado em seis etapas distintas conforme descritas a seguir e caracterizando um processo de conformação a quente convencional.

3.2.2 Etapas do processo de forjamento industrial

3.2.2.1 Recalque e achatamento

No início do processamento o produto “Gancho bola”, as barras laminadas são cortadas em serra para adequação do comprimento. Em seguida o blank é aquecido em um forno elétrico de indução automatizado por aproximadamente 3 minutos até a temperatura de homogeneização de 1040°C. Após o aquecimento o material é conformado em uma prensa de fuso em dois estágios de recalque e um estágio de achatamento em matriz plana, para preparação e distribuição do volume de material. A Figura 3.2 mostra esquematicamente o ferramental utilizado.

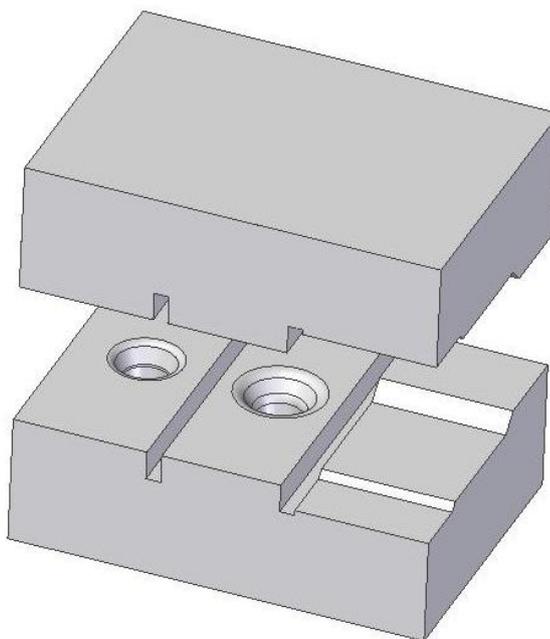


Figura 3.2 Modelo esquemático do ferramental (da esquerda para a direita): 1º e 2º estágio do recalque e o achatamento entre matriz plana.

3.2.2.2 Forjamento em matriz fechada

O forjamento em matriz fechada é realizado em prensa de fuso em dois estágios sucessivos de forjamento (pré e forjamento final), conforme mostra a Figura 3.3. Depois do forjamento final a rebarba é removida em uma prensa excêntrica e a peça resfriada até a temperatura ambiente.

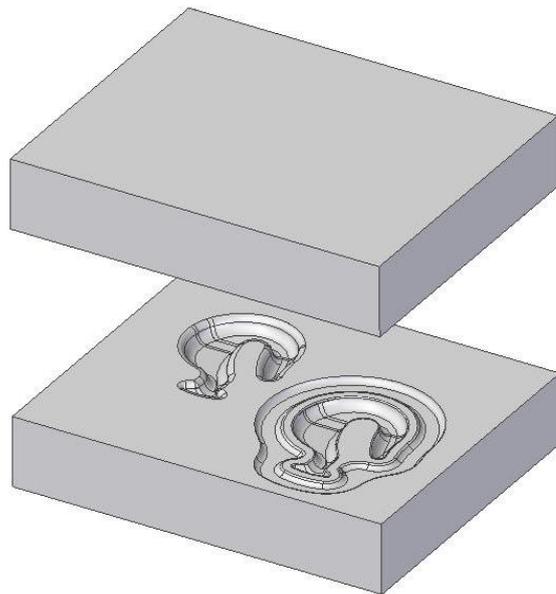


Figura 3.3 Modelo esquemático do processo de forjamento: pré-forjamento (esquerda) e forjamento final (direita).

A Figura 3.4 ilustra os vários estágios e o produto após cada deformação em todo o processo descrito anteriormente.



Figura 3.4 Peça conformada após os estágios de forjamento 1-6 (da esquerda para a direita): 1-2 Recalque; 3 Achatamento; 4-5 Forjamento em matriz; 6 Produto final após remoção da rebarba.

3.2.3 Análise Microestrutural

Para verificação do tamanho médio de grão austenítico, foram retiradas amostras a partir da peça forjada ao final do quinto estágio do processo. A Figura 3.5 mostra a localização de onde foram retiradas as amostras para ensaio e as posições de retirada estão baseadas nas diferentes condições de deformação para cada região e histórico industrial. As amostras identificadas como (a) e (b) na Figura 3.5 foram retiradas perpendicularmente a direção longitudinal de escoamento do material a partir de peças resfriadas em água para verificação microestrutural.

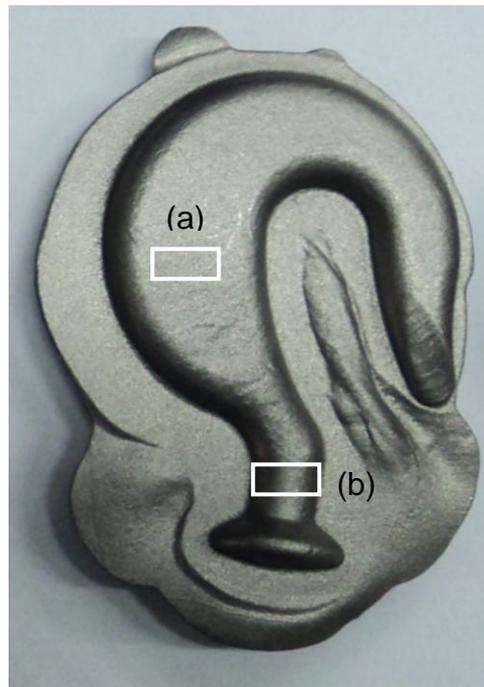


Figura 3.5 Peça após a conformação do estágio 5 indicando as posições das amostras para medição do tamanho médio de grão austenítico.

A caracterização dos corpos de prova foi realizada pela observação em microscópio óptico após o ataque com o reagente Vilella para se analisar o tamanho médio de grão austenítico segundo a norma ASTM E 112-10 pelo método dos interceptos lineares.

3.3 DEFORM™3D

O DEFORM™3D é um código baseado no método de elementos finitos (MEF) desenvolvido para analisar vários processos de conformação termomecânicos e tratamento térmico. Sua formulação para a solução de problemas de conformação mecânica por elementos finitos está baseada em trabalhos de Kobayashi [31], conforme descrito no manual do software. Diferente dos códigos gerais de MEF, o DEFORM é adaptado para modelagem da deformação. Possui um sistema automático e otimizado de remalhamento permitindo que a malha seja refeita quando ocorre algum problema durante as

deformações. Esse software é capaz de modelar complexas interações entre deformação, temperatura, transformação de fases e difusão [32]. A Figura 3.6 ilustra como o software realiza a interação destes módulos.

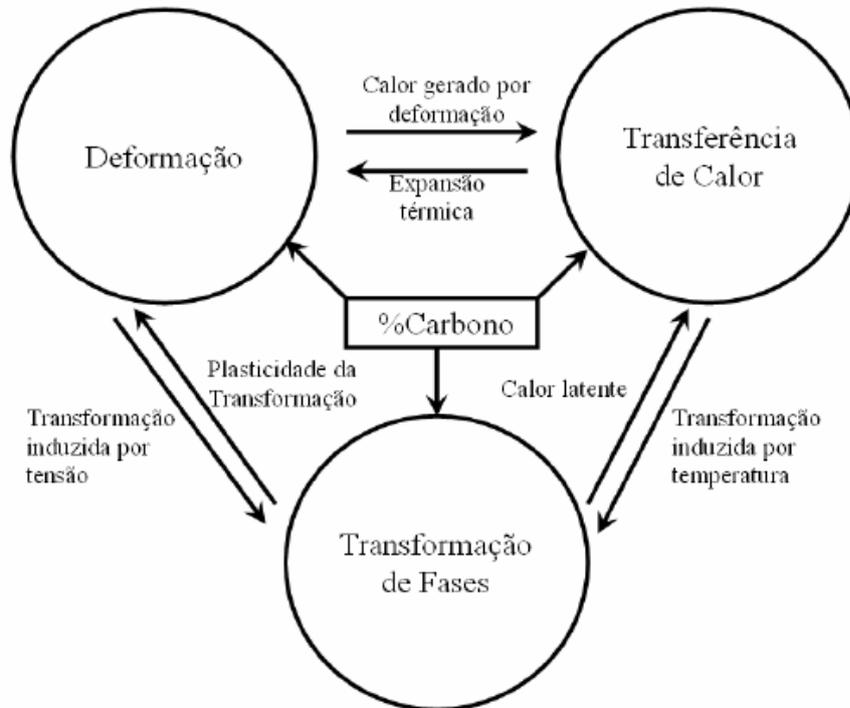


Figura 3.6 Relacionamento entre os módulos do DEFORM [32].

O DEFORM™3D é composto por três elementos: pré-processador, processador e pós-processador. No pré-processador são inseridos os dados de entrada necessários para os cálculos no processador. Em resumo, os dados de entrada são: a definição e interação entre os objetos, dados do material e controle da simulação e, no caso de transformações de fases, a relação de transformação entre as fases. Esses dados são compilados em um arquivo de base de dados [33].

O processador capta as informações do processo a ser simulado no arquivo de base de dados, calcula a solução do problema e adiciona os resultados no arquivo de base de dados. Quando necessário, o procesador para o cálculo para atualizar a malha de elementos finitos automaticamente. Ainda durante o cálculo, o processador escreve informações sobre o andamento da simulação em um arquivo de mensagem. Essas informações

contemplam a verificação dos critérios de convergência e mensagem de erro, quando ocorrem divergências no cálculo. O pós-processador lê o arquivo de base de dados com os resultados calculados e mostra estes resultados numa interface gráfica. Além disso, o pós-processador permite a exportação dos resultados em dados numéricos [33].

3.3.1 Parâmetros de Entrada para as Simulações

Este trabalho envolveu a simulação de um processo completo de forjamento. Nesta seção serão descritos os principais parâmetros de entrada e as propriedades termomecânicas do material necessárias para a realização da simulação. A Tabela 3.2 mostra os principais parâmetros de entrada para simulação.

Tabela 3.2 Principais parâmetros de entrada para a simulação

Parâmetros	Valores
Temperatura ambiente (°C)	30
Temperatura das ferramentas de recalque (°C)	90
Temperatura da matriz fechada (°C)	200
Coeficiente de transferência de calor (peça-ambiente) (N/s/mm/°C)	0,02
Coeficiente de transferência de calor (peça-ferramenta) (N/s/mm/°C)	11
Coeficiente de atrito (recalque)	0,7
Coeficiente de atrito (matriz fechada)	0,3
Tamanho de grão inicial (µm)	100

A seguir, serão descritas algumas operações realizadas para inserir os dados dos parâmetros de entrada que são: definição dos objetos, interação entre objetos, propriedades do material e controles de simulação.

3.3.1.1 Definição dos objetos

No DEFORM™3D os objetos definem a geometria das peças envolvidas na simulação, no caso de forjamento as peças são as matrizes superior e inferior e o metal a ser conformado com suas respectivas dimensões reais. A inserção de dados é iniciada pela escolha do tipo de comportamento mecânico que pode ser: rígido, plástico, elástico, poroso ou elasto-plástico. Para as simulações realizadas neste trabalho, foram adotadas as matrizes com o comportamento rígido, e o material conformado com o comportamento plástico, uma vez que no processo de forjamento a quente as deformações elásticas podem ser desprezadas. Dessa forma, o problema pode ser simplificado e o tempo de simulação reduzido. Em seguida é definida a geometria dos objetos, a qual pode ser feita no próprio DEFORM™3D utilizando geometrias simples pré-definidas, ou através da importação de um arquivo de software de CAD no formato STL.

Neste momento ainda são estabelecidos parâmetros como temperatura inicial, material e número de elementos finitos. O número de elementos finitos determinado no DEFORM™3D serve apenas como um parâmetro de referência, pois o software possui um sistema automático de geração de malha de elementos finitos que determina o número real de elementos com base na referência determinada previamente. Outro aspecto importante do DEFORM™3D é a geração de elementos finitos do tipo tetraédrico com quatro nós, devido a maior eficiência do sistema automático de geração de malha com este tipo de elemento [33].

Finalizando a definição dos objetos são definidas as condições de contorno como plano de simetria dependendo da geometria dos objetos gerados para a simulação e as áreas de transferência de calor que correspondem às faces que estão em contato com o ambiente. Em seguida, definem-se os movimentos conhecidos do processo. O DEFORM™3D oferece várias opções para a definição do movimento como, velocidade, força aplicada, etc. Para este trabalho de forjamento, o movimento foi sempre realizado pela matriz superior e adotado o movimento determinado pela velocidade constante.

As tabelas abaixo apresentam um resumo com os principais dados para a definição dos objetos para cada estágio do processo.

Tabela 3.3 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 1

Definição dos Objetos			
	<i>Blank</i>	<i>Matriz Superior</i>	<i>Matriz Inferior</i>
Tipo de Objeto	Plástico	Rígido	Rígido
Temperatura	1040 °C	90 °C	90 °C
Material	AISI 1020	AISI H13	AISI H13
Número de elementos	29151	28185	35800
Transf. de Calor (faces)	Todas	Todas	Todas
Tipo de Movimento	-	Velocidade	-
Direção	-	-Z	-
Módulo	-	125 mm/s	-

Tabela 3.4 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 2

Definição dos Objetos			
	<i>Blank</i>	<i>Matriz Superior</i>	<i>Matriz Inferior</i>
Tipo de Objeto	Plástico	Rígido	Rígido
Temperatura	973 ~ 1043 °C	90 °C	90 °C
Material	AISI 1020	AISI H13	AISI H13
Número de elementos	29151	19632	34981
Transf. de Calor (faces)	Todas	Todas	Todas
Tipo de Movimento	-	Velocidade	-
Direção	-	-Z	-
Módulo	-	125 mm/s	-

Tabela 3.5 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 3

Definição dos Objetos			
	Blank	Matriz Superior	Matriz Inferior
Tipo de Objeto	Plástico	Rígido	Rígido
Temperatura	940 ~ 1046 °C	90 °C	90 °C
Material	AISI 1020	AISI H13	AISI H13
Número de elementos	29151	11648	11648
Transf. de Calor (faces)	Todas	Todas	Todas
Tipo de Movimento	-	Velocidade	-
Direção	-	-Z	-
Módulo	-	125 mm/s	-

Tabela 3.6 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 4

Definição dos Objetos			
	Blank	Matriz Superior	Matriz Inferior
Tipo de Objeto	Plástico	Rígido	Rígido
Temperatura	932 ~ 1023 °C	200 °C	200 °C
Material	AISI 1020	AISI H13	AISI H13
Número de elementos	22033	72927	81946
Transf. de Calor (faces)	Todas	Todas	Todas
Tipo de Movimento	-	Velocidade	-
Direção	-	-Z	-
Módulo	-	200 mm/s	-

Tabela 3.7 Dados para Definição dos Objetos – Estágio 5

Definição dos Objetos			
	Blank	Matriz Superior	Matriz Inferior
Tipo de Objeto	Plástico	Rígido	Rígido
Temperatura	882 ~ 1006 °C	200 °C	200 °C
Material	AISI 1020	AISI H13	AISI H13
Número de elementos	33490	95647	95828
Transf. de Calor (faces)	Todas	Todas	Todas
Tipo de Movimento	-	Velocidade	-
Direção	-	-Z	-
Módulo	-	200 mm/s	-

3.3.1.2 Interação entre objetos

O parâmetro de relação de contato é usado para definir a relação entre o metal conformado e as matrizes que realizam a deformação. Devem ser especificados os contatos entre cada par de objetos deformáveis e entre os objetos deformáveis e as ferramentas que possam ter contato durante a simulação. O objetivo da interação entre objetos é definir como os diferentes objetos em uma simulação interagem uns com os outros.

A definição do atrito entre objetos utilizada neste trabalho foi de atrito por cisalhamento, conforme a equação modelo:

$$f_s = mk \quad (3.1)$$

onde f_s é a tensão de atrito de cisalhamento entre materiais, m é o fator de cisalhamento de atrito e k é a tensão de escoamento do material deformado. O valor utilizado para o atrito de cisalhamento foi de 0,7 (forjamento sem lubrificação) para as operações de recalque e achatamento e para as operações de forjamento em matriz foi de 0,3 (forjamento com lubrificação).

Para o coeficiente de transferência de calor entre os objetos foi utilizado o valor de 11N/mm/s/°C, conforme recomendado pelo DEFORM™3D.

3.3.1.3 Propriedades do material

O material utilizado para conformação nas simulações é o AISI 1020 conforme composição descrita na Tabela 3.1, e para as matrizes o aço AISI H13. A Tabela 3.8 apresenta a composição do aço AISI H13, conforme catálogo da empresa Villares Metals S.A.

Tabela 3.8 Composição química do aço AISI H13 (porcentagem em massa)

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
0,40	1,00	0,35	5,20	1,30	0,90

Para este trabalho foram utilizadas as propriedades térmicas disponibilizadas na biblioteca do DEFORM™3D. A exatidão destes dados influencia diretamente no resultado final da simulação, por este motivo, é desejável que os valores para estas propriedades sejam obtidos através de ensaios para reproduzirem as mesmas condições de trabalho do material a ser conformado.

3.3.1.4 Controles de simulação

Através dos controles de simulação o DEFORM™3D identifica o problema e o comportamento numérico da solução. Na janela principal, é definido o título da simulação, o nome e número da operação e o sistema de unidade. Para este trabalho foi adotado o sistema internacional. Em seguida, determina-se o tipo de simulação que de acordo com o manual do software para o processo de forjamento pode ser utilizado o Lagrangeano Incremental por ser mais rápida e apresentar melhores resultados. Na sequência, definem-se os módulos de deformação e transferência de calor. Neste trabalho foram ativados sempre os dois módulos em todas as simulações de forma a reproduzir melhor o processo industrial.

Ainda no controle de simulação, é necessário definir o número total de passos da simulação, o incremento para salvar os passos, qual a matriz primária, o controle dos passos que pode ser por incremento de tempo ou deslocamento das matrizes, os parâmetros de iteração e as condições de processo. Em todas as simulações realizadas neste trabalho foram utilizados os seguintes parâmetros: a matriz superior como sendo a primária, o controle dos passos por incremento de tempo para os intervalos entre passes e incremento por deslocamento de matriz em todos os estágios de deformação. O método de iteração adotado foi “Newton-Raphson” e o solucionador “Sparse”. De acordo com as condições de processo industrial a temperatura ambiente é de 30°C e o coeficiente de transferência de calor por convecção de 0,01N/s/mm/°C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos após a simulação numérica realizada analisando-se separadamente a evolução ao longo do processo das seguintes variáveis: deformação, taxa de deformação, temperatura, tamanho médio de grão austenítico e frações volumétricas recristalizadas dinâmica, metadinâmica e estaticamente.

Conforme exposto anteriormente, a simulação foi realizada abrangendo todo o processo de forjamento do produto, com as deformações iniciando com a temperatura homogênea e igual a 1040°C em todo o blank e igual a 90°C e 200°C para as ferramentas de recalque e forjamento respectivamente, respeitando-se os tempos decorridos nos intervalos entre estágios de deformação.

4.1 Parâmetros de processo para o primeiro estágio

4.1.1 Variação da deformação

A análise da distribuição de deformação durante as operações de recalque e achatamento pode ser realizada a partir da observação de cortes longitudinais ao longo do material conformado. A Figura 4.1 mostra a visualização da distribuição de deformação após o primeiro estágio do processo.

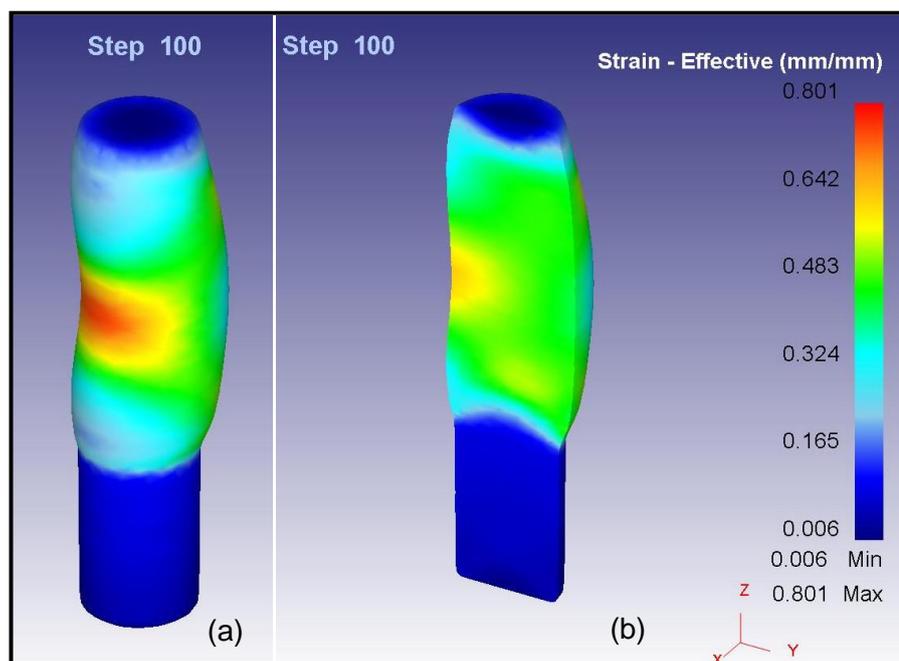


Figura 4.1 Representação gráfica da distribuição de deformação plástica imposta ao material ao final do 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

No primeiro estágio do recalque observa-se que o material sofre uma deformação média efetiva de 0,5 na região superior e na região do pé do blank a deformação é mínima (em torno de 0,01), conforme a Figura 4.1. A região representada pela cor vermelha mostra que houve uma concentração de deformação nesta região, indicando a ocorrência de flambagem do material, a qual também pode ser observada no processo real (vide Figura 3.4).

4.1.2 Variação da taxa de deformação

A taxa de deformação é um parâmetro muito importante no trabalho a quente, pois tem forte influência nos mecanismos de amaciamento. A Figura 4.2 mostra a variação da taxa de deformação imposta para o primeiro estágio do processo.

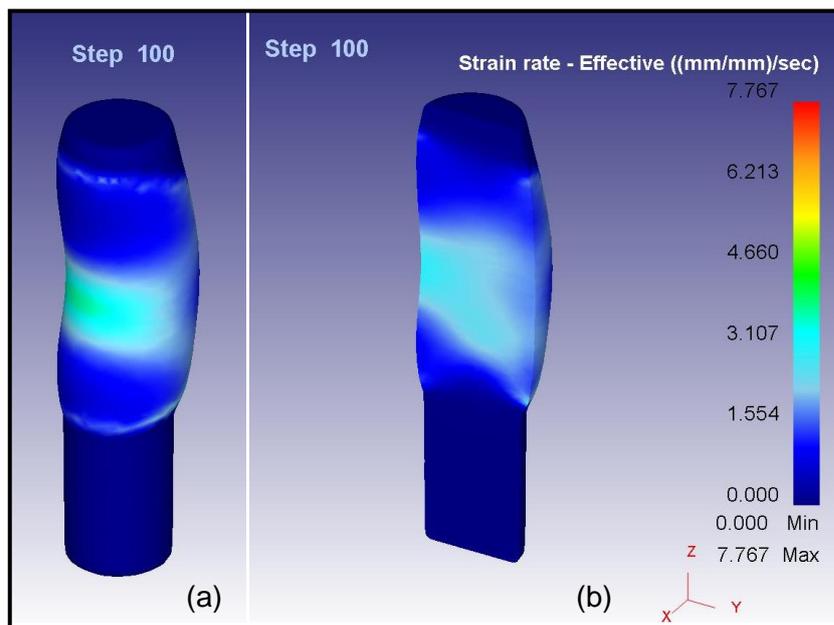


Figura 4.2 Representação gráfica mostrando a distribuição da taxa de deformação imposta ao material durante o 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Como pode ser visto na Figura 4.2 a distribuição da taxa de deformação se assemelha a distribuição de deformação com valores máximos na região central e chegando a zero à medida que se aproxima do pé do blank.

4.1.3 Variação da temperatura

A Figura 4.3 mostra a distribuição de temperatura no material para o primeiro estágio do processo.

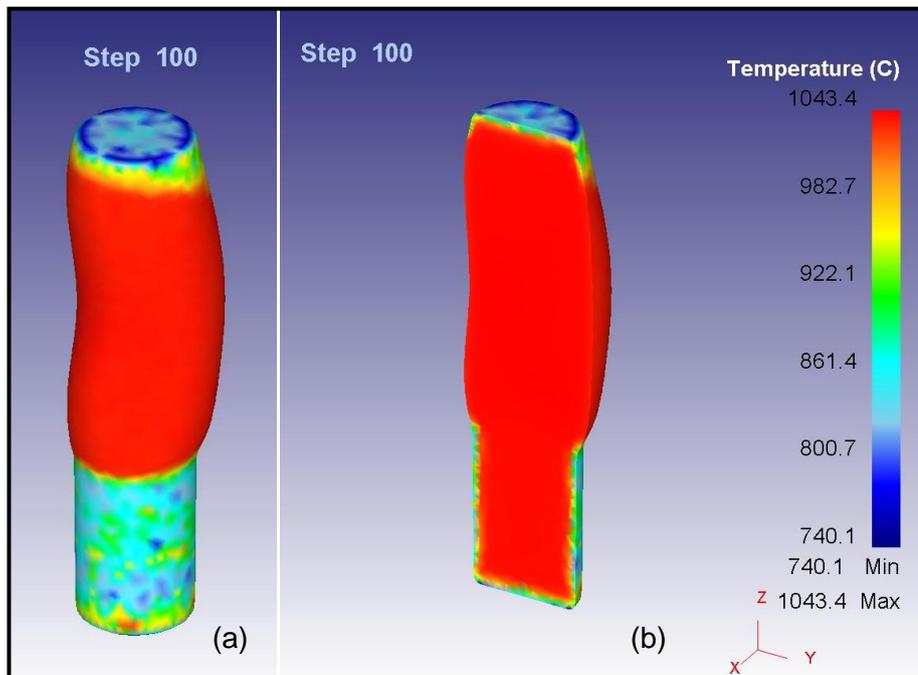


Figura 4.3 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material ao final do 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Pode-se observar que a temperatura no interior do blank não sofre grandes alterações no primeiro estágio. A diminuição de temperatura na superfície do material foi de cerca de 180 °C. Durante o processo de forjamento a transferência de calor se dá pelo contato do material com o ar atmosférico por radiação e convecção térmica. Mas, a principal perda de calor ocorre por condução térmica devido ao contato do material com as ferramentas de conformação e, neste caso, como o material está sempre apoiado sobre a matriz inferior, a parte ou lado inferior sempre sofrerá maior perda de calor como pode ser observado na Figura 4.3.

4.1.4 Recristalização Dinâmica

A Figura 4.4 mostra a fração volumétrica recristalizada dinamicamente durante o primeiro estágio processo.

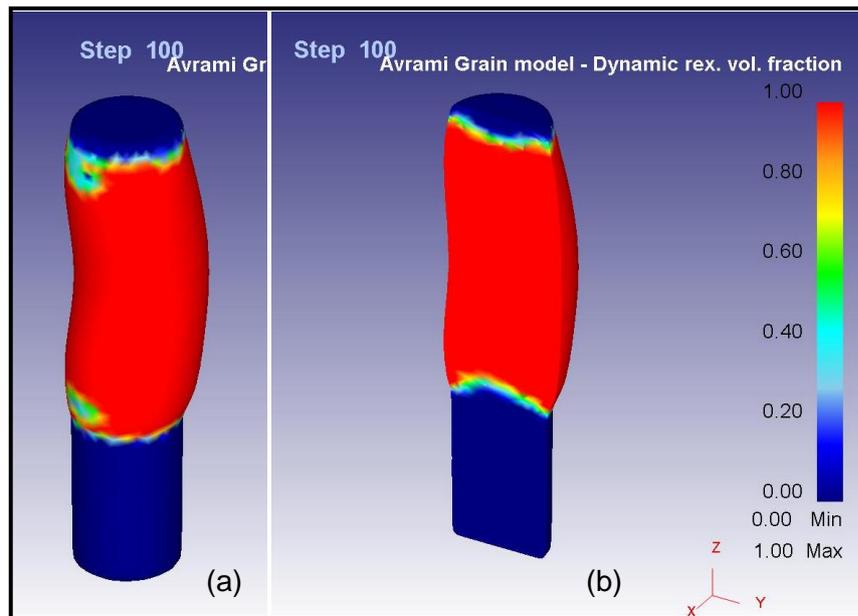


Figura 4.4 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final da deformação do 1º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Para que a recristalização dinâmica ocorra é necessário que a deformação aplicada ao material supere a deformação crítica. Portanto, a fração recristalizada depende do quanto à deformação aplicada supera a deformação crítica em cada uma das regiões onde ela ocorre.

Observa-se na Figura 4.4 que a fração de recristalização dinâmica chega a 100% em toda a região central do blank onde a deformação foi aplicada (ver Figura 4.1). Nas regiões do topo e pé do blank que não sofrem deformação a recristalização dinâmica não se inicia.

4.1.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica

A Figura 4.5 mostra a evolução do tamanho médio de grão ao final do primeiro estágio.

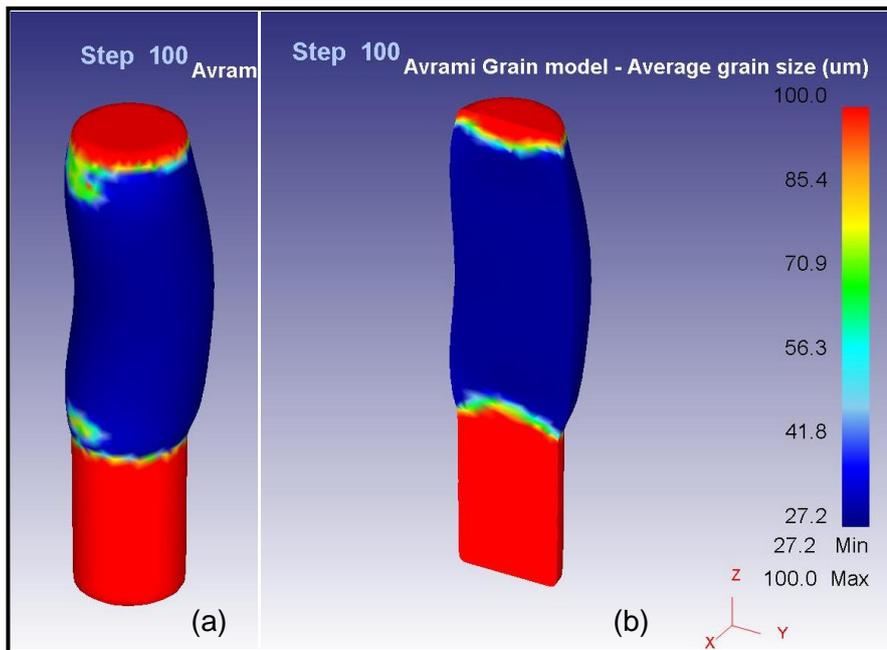


Figura 4.5 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do primeiro estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

A Figura 4.5 mostra a variação do tamanho médio de grão em todo o volume da peça após a deformação do primeiro estágio do processo. Observa-se que houve um refino de grãos na região onde ocorreu recristalização dinâmica (ver Figura 4.4), e o tamanho médio de grão inicialmente de 100 µm, foi reduzido para 27 µm.

4.1.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios

A Figura 4.6 mostra a distribuição de temperatura no material após o intervalo de 3,1 s entre o primeiro e segundo estágio.

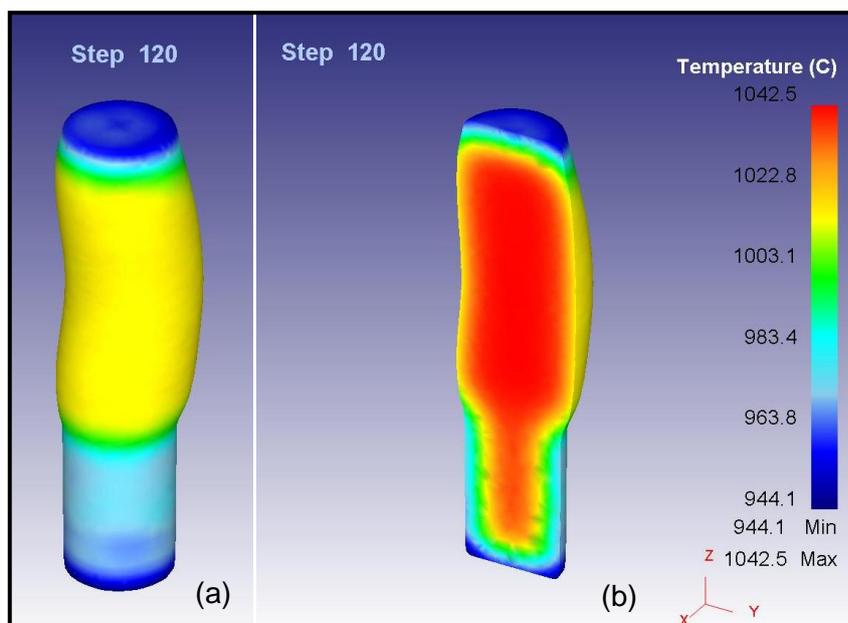


Figura 4.6 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

A Figura 4.6 mostra que a temperatura no interior do blank ainda permanece homogênea após o intervalo de 3,1 s. A maior perda de calor ocorre na superfície do material e nas regiões do topo e pé do blank as quais perdem calor para as matrizes.

4.1.7 Recristalização Metadinâmica no intervalo entre estágios

A Figura 4.7 mostra a fração volumétrica recristalizada metadinamicamente após o intervalo de 3,1 s entre o primeiro e segundo estágio.

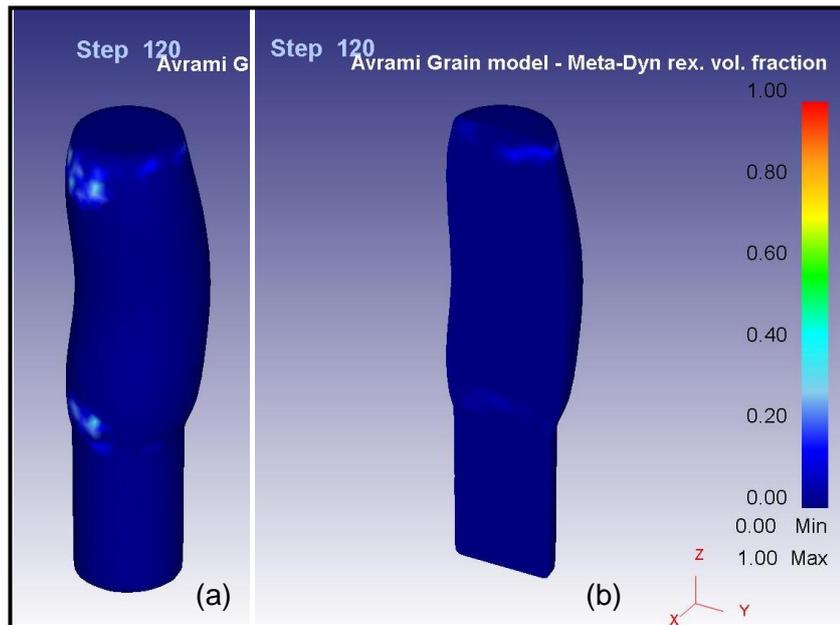


Figura 4.7 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada metadinamicamente do material após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se que a recristalização metadinâmica não se mostrou efetiva durante o intervalo de deformações. Pode-se dizer que as condições cinéticas necessárias para a ocorrência da recristalização metadinâmica não foram alcançadas.

4.1.8 Recristalização Estática no intervalo entre estágios

A Figura 4.8 mostra a fração volumétrica recristalizada estaticamente após o intervalo de 3,1 s entre o primeiro e segundo estágio.

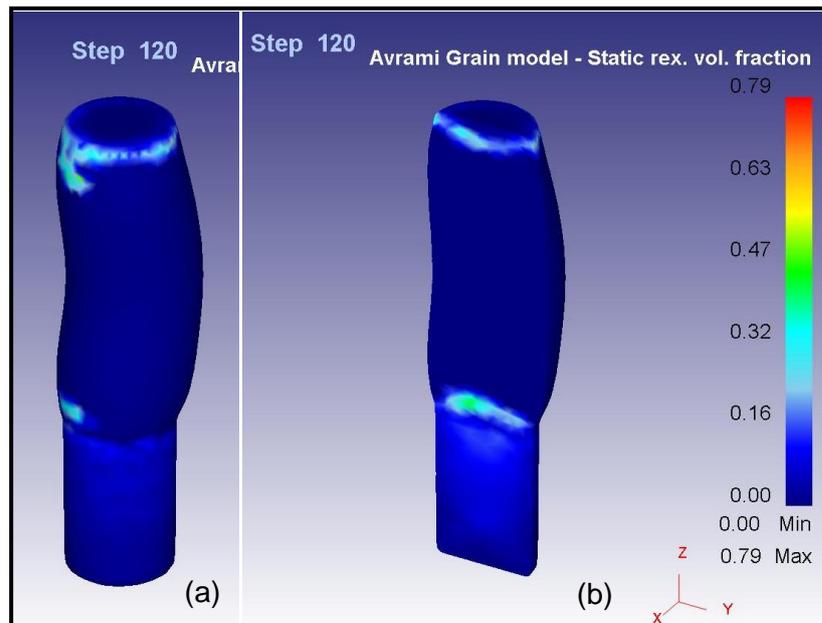


Figura 4.8 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Nota-se que a recristalização estática apresentou valores de 32%, mas ocorreu somente em duas pequenas regiões onde a recristalização dinâmica não atingiu 100% (vide Figura 4.4).

4.1.9 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios

A Figura 4.9 mostra a evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 3,1 s entre o primeiro e segundo estágio.

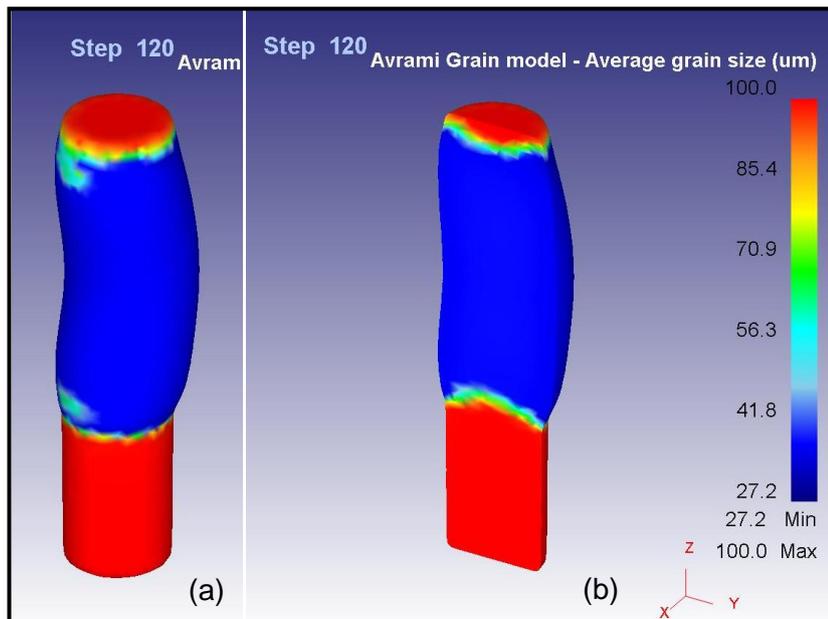


Figura 4.9 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 3,1 s entre o 1º e 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Após o intervalo de 3,1 s observa-se que o tamanho de grão máximo é igual ao inicial, ou seja, de 100 μm . A Figura 4.9 mostra que ocorreu um pequeno crescimento dos grãos recristalizados dinamicamente, pois o tamanho médio de grão ao final da deformação que era de 27 μm atingiu valores de 35 μm aproximadamente durante o intervalo.

4.2 Parâmetros de processo para o segundo estágio

4.2.1 Variação da deformação

A Figura 4.10 mostra a visualização da distribuição de deformação após o segundo estágio do processo.

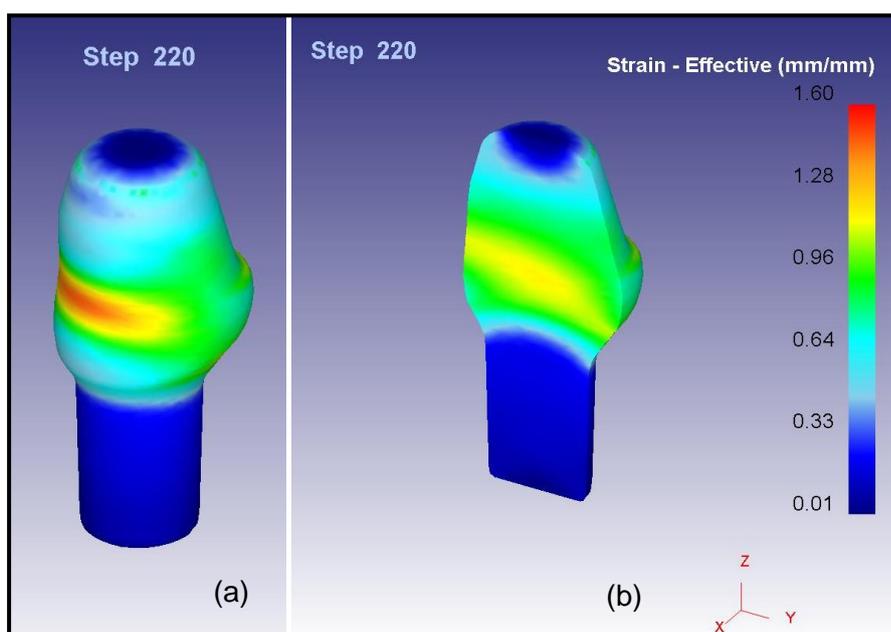


Figura 4.10 Representação gráfica da distribuição de deformação plástica imposta ao material ao final do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Nota-se que no segundo estágio a região com maior grau de deformação localiza-se no centro do material apresentando um valor médio de 1,0, onde o recalque tende a formar um colar devido a flambagem que ocorre no primeiro estágio. Observa-se que a distribuição de deformação é semelhante ao primeiro estágio, e a deformação efetiva vai se tornando cada vez menor em direção ao pé do blank.

4.2.2 Variação da taxa de deformação

A Figura 4.11 mostra a variação da taxa de deformação imposta para o segundo estágio do processo.

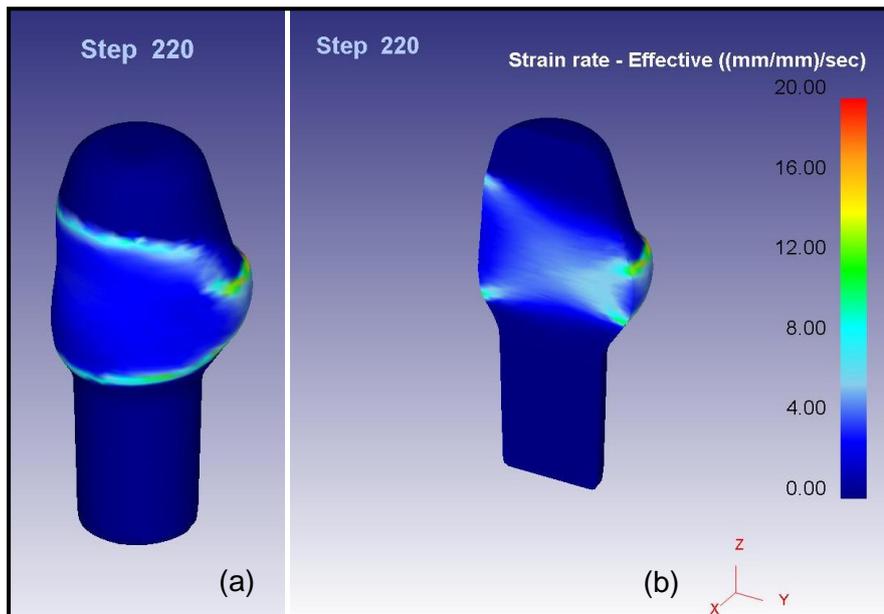


Figura 4.11 Representação gráfica mostrando a distribuição da taxa de deformação imposta ao material durante o 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se que a taxa de deformação atinge maiores valores na região central do blank onde ocorre a formação do colar conforme descrito anteriormente. Os valores máximos observados na Figura 4.11 superam a taxa de deformação do primeiro estágio devido ao aumento de deformação no segundo estágio.

4.2.3 Variação da temperatura

A Figura 4.12 mostra a distribuição de temperatura no material para o segundo estágio do processo.

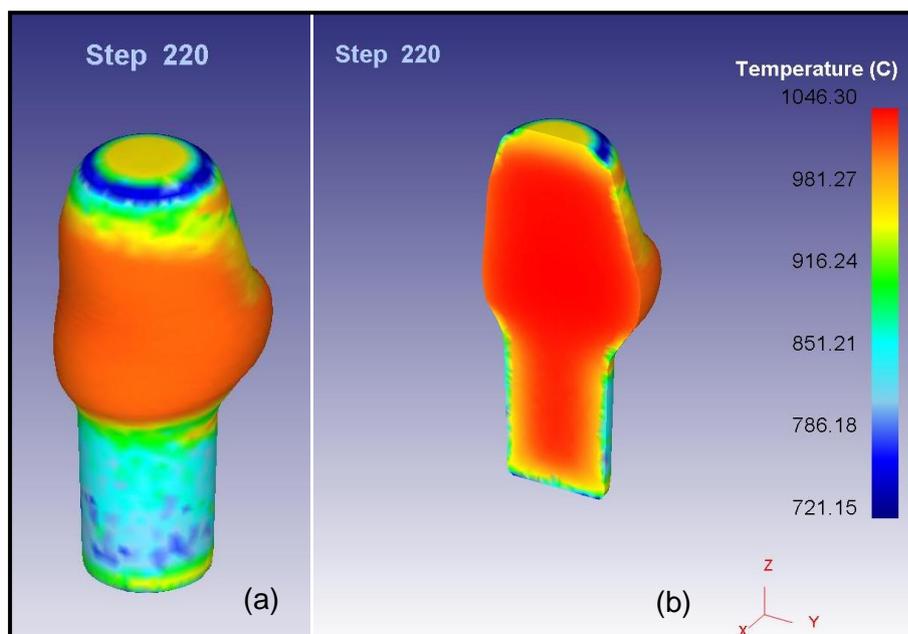


Figura 4.12 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material ao final do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Nota-se na Figura 4.12 que a temperatura no interior do material mantém-se homogênea e em torno de 1040 °C. As maiores variações térmicas ocorrem na superfície do material que permanecem em contato com as matrizes, com valores próximos a 850 °C.

Também se observa que a temperatura máxima aumentou de 1040 °C (inicial) para 1046 °C ao término do segundo estágio, devido ao aquecimento adiabático. Este fenômeno ocorre devido à energia de deformação aplicada, que em sua maior parte é convertida em calor.

4.2.4 Recristalização Dinâmica

A Figura 4.13 mostra a fração volumétrica recristalizada dinamicamente durante o segundo estágio do processo.

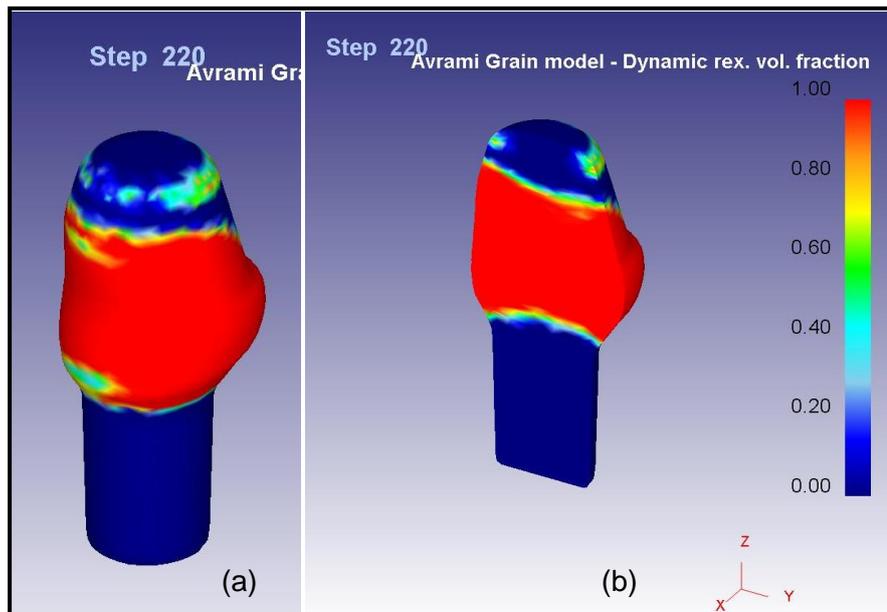


Figura 4.13 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final da deformação do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se na Figura 4.13 que a fração recristalizada dinamicamente é semelhante ao primeiro estágio atingindo 100% em toda a região central do blank onde a deformação aplicada tem valor máximo (ver Figura 4.11). Nas regiões do topo e pé do blank que não sofrem deformação a recristalização dinâmica não se inicia.

4.2.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica

A Figura 4.14 mostra a evolução do tamanho médio de grão ao final do segundo estágio.

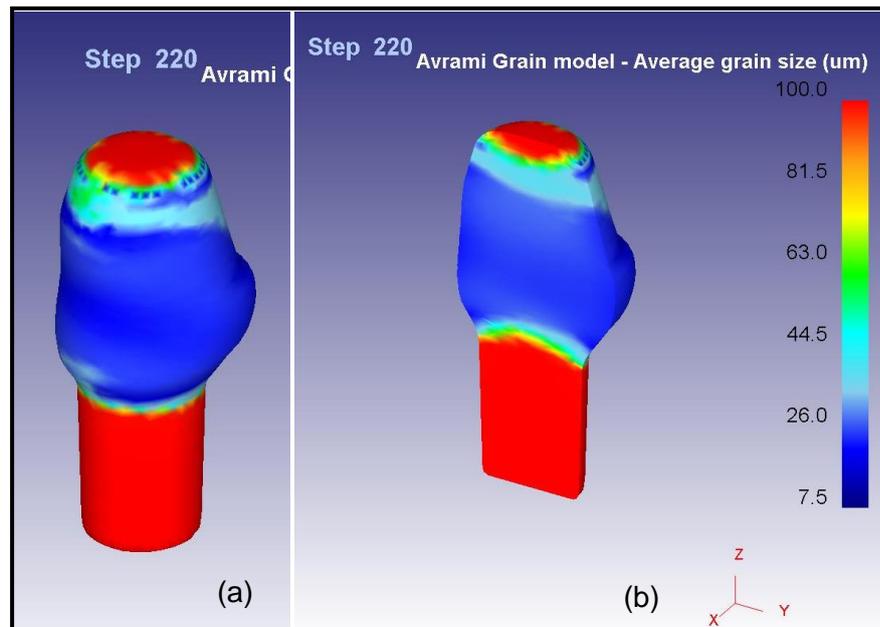


Figura 4.14 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 2º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Novamente observa-se na Figura 4.14 que a recristalização dinâmica foi eficiente no refinamento de grãos na região superior (vide Figura 4.13), e o tamanho médio de grão para esta região de 35 μm após o intervalo entre estágios, foi reduzido para 30 μm aproximadamente.

4.2.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios

A Figura 4.15 mostra a distribuição de temperatura no material após o intervalo de 5,5 s entre o segundo e terceiro estágio.

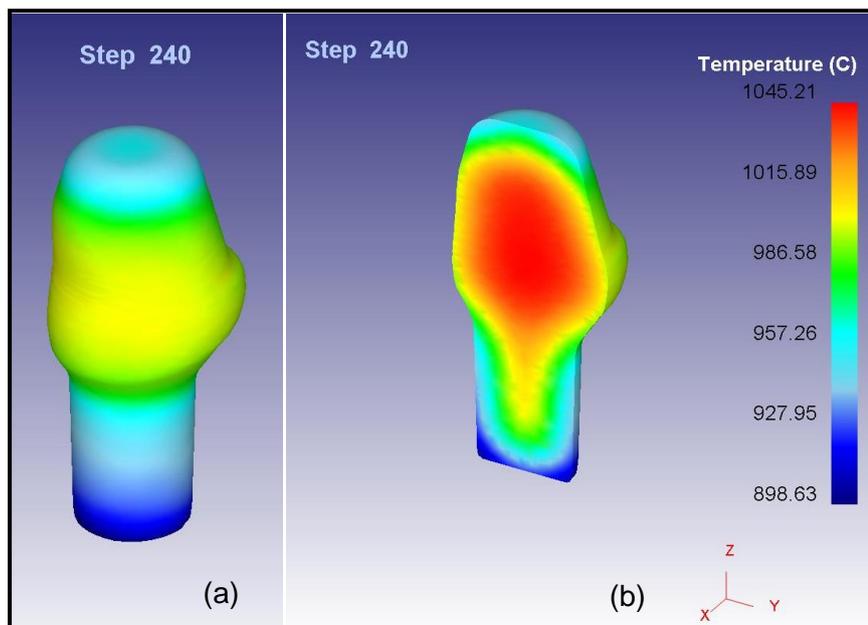


Figura 4.15 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 5,5 s entre o 2º e 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Nota-se na Figura 4.15 que a temperatura no interior do blank permanece acima de 1040 °C somente na região superior após o intervalo de 5,5 s, pois nesta região ocorreu o aquecimento adiabático e o volume aumentou devido ao recalque. A maior perda de calor ocorre na superfície do material e principalmente na região do pé do blank que durante a conformação fica toda envolvida pela matriz.

4.2.7 Recristalização Estática no intervalo entre estágios

A Figura 4.16 mostra a fração volumétrica recristalizada estaticamente após o intervalo de 5,5 s entre o segundo e terceiro estágio.

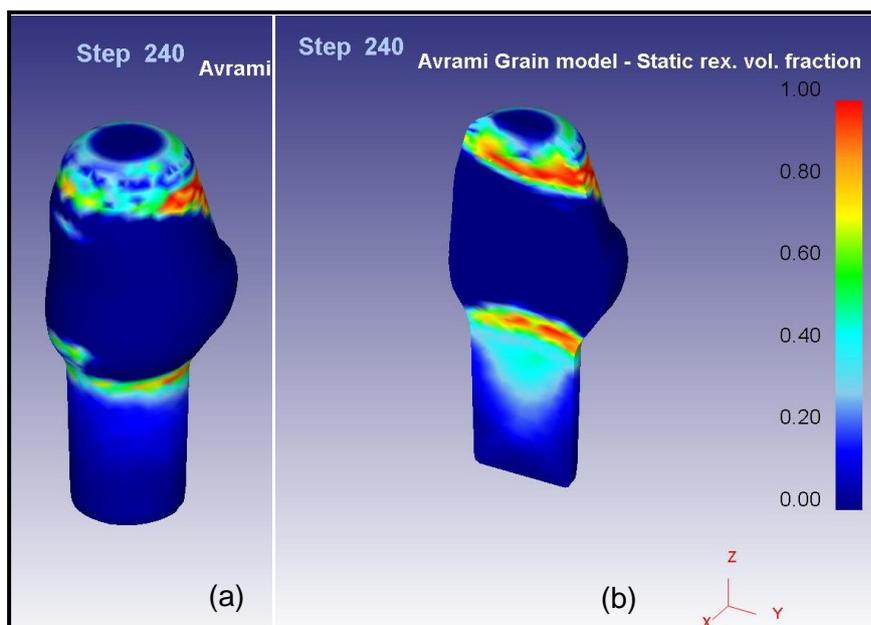


Figura 4.16 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 5,5 s entre o 2º e 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se na Figura 4.16 que a recristalização estática atingiu 100% logo abaixo e acima da região que sofreu maior deformação e recristalização dinâmica. Para a região inferior a fração recristalizada está em torno de 40%, mas reduz à zero em direção ao pé do blank, isto se deve a baixa temperatura nesta região que não fornece condições cinéticas.

De maneira similar ao primeiro estágio, a recristalização metadinâmica não se mostrou eficiente para o segundo e terceiro estágio, portanto este parâmetro não mais será tratado para os demais estágios seguintes do recalque.

4.2.8 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios

A Figura 4.17 mostra a evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 5,5 s entre o segundo e terceiro estágio.

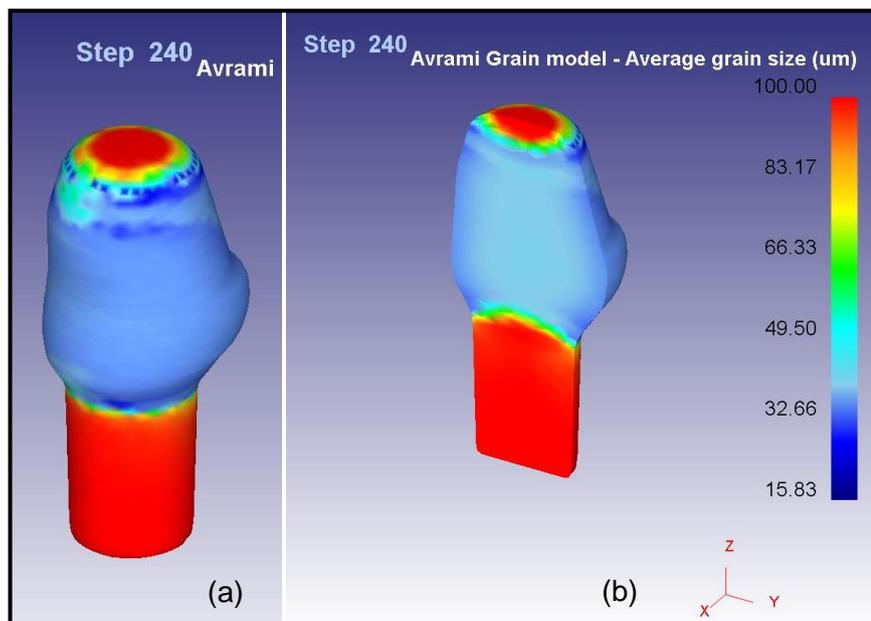


Figura 4.17 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 5,5 s entre o 2º e 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Pode-se observar na Figura 4.17 que o tamanho de grão máximo para a peça é de 100 μm . Novamente ocorreu um pequeno crescimento dos grãos recristalizados dinamicamente, pois o tamanho médio de grão ao final da deformação de 30 μm atingiu valores de 40 μm aproximadamente durante o intervalo.

4.3 Parâmetros de processo para o terceiro estágio

4.3.1 Variação da deformação

A Figura 4.18 mostra a visualização da distribuição de deformação após o terceiro estágio do processo.

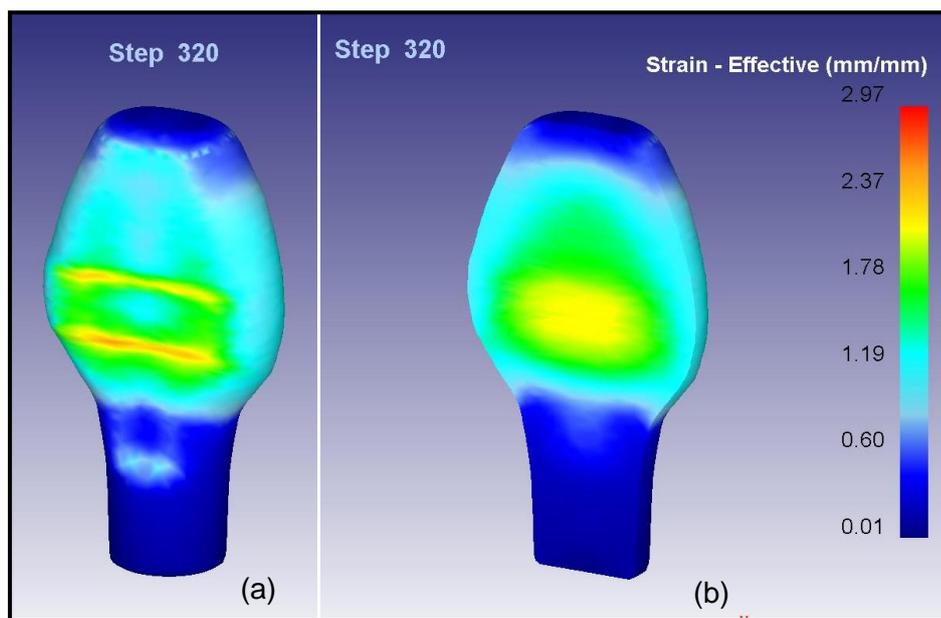


Figura 4.18 Representação gráfica da distribuição de deformação plástica imposta ao material ao final do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Como pode ser visto na Figura 4.18, somente a região central sofreu maior deformação durante o achatamento apresentando um valor médio de 2,0.

Os três primeiros estágios realizam apenas uma adequação de massa do material para prepará-lo para o estágio seguinte onde será o forjamento em matriz fechada. Pode-se observar que a deformação é muito heterogênea ao longo da seção longitudinal, pois a região pé do blank durante os estágios 1 e 2 sofreu pouca (menor que 0,01) ou nenhuma deformação como no caso do 3º estágio.

4.3.2 Variação da taxa de deformação

A Figura 4.19 mostra a variação da taxa de deformação imposta para o terceiro estágio do processo.

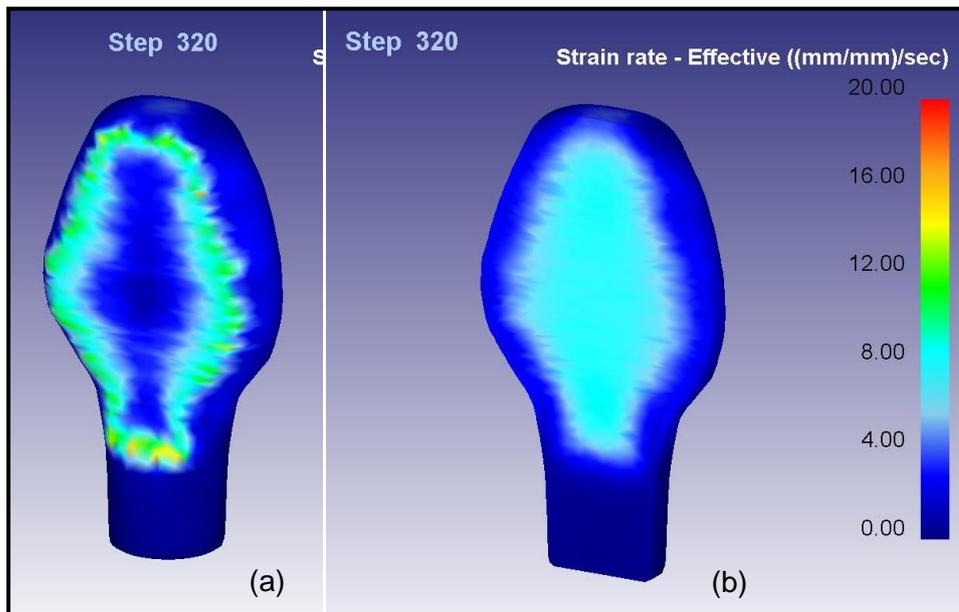


Figura 4.19 Representação gráfica mostrando a distribuição da taxa de deformação imposta ao material durante o 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

A distribuição de taxa de deformação se assemelha a distribuição de deformação com valores máximos na região superior e central e reduz ao mínimo na superfície do material.

Observa-se na Figura 4.19 que o valor médio de $8,0 \text{ s}^{-1}$ para a taxa de deformação pode ser atribuído a grande deformação nessa região devido ao achatamento do material.

4.3.3 Variação da temperatura

A Figura 4.20 mostra a distribuição de temperatura no material para o terceiro estágio do processo.

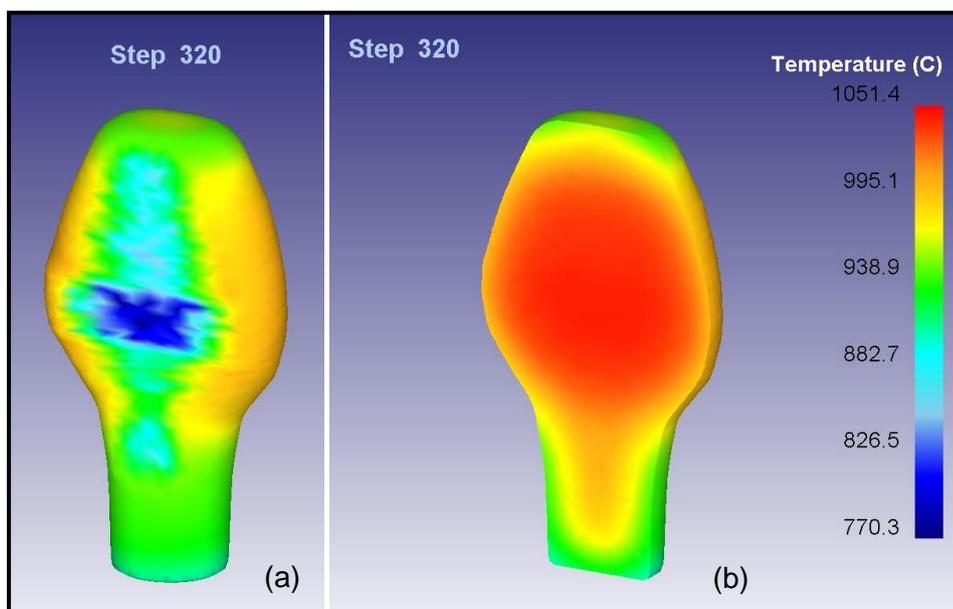


Figura 4.20 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material ao final do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Nota-se na Figura 4.20 que a temperatura no interior do material mantém-se homogênea e em torno de 1050 °C. As maiores variações térmicas ocorrem na superfície do material que permanecem em contato com as matrizes, com valor médio de 890 °C. É notável o efeito do aquecimento adiabático no terceiro estágio que eleva a temperatura do núcleo para 1051 °C.

4.3.4 Recristalização Dinâmica

A Figura 4.21 mostra a fração volumétrica recristalizada dinamicamente durante o terceiro estágio do processo.

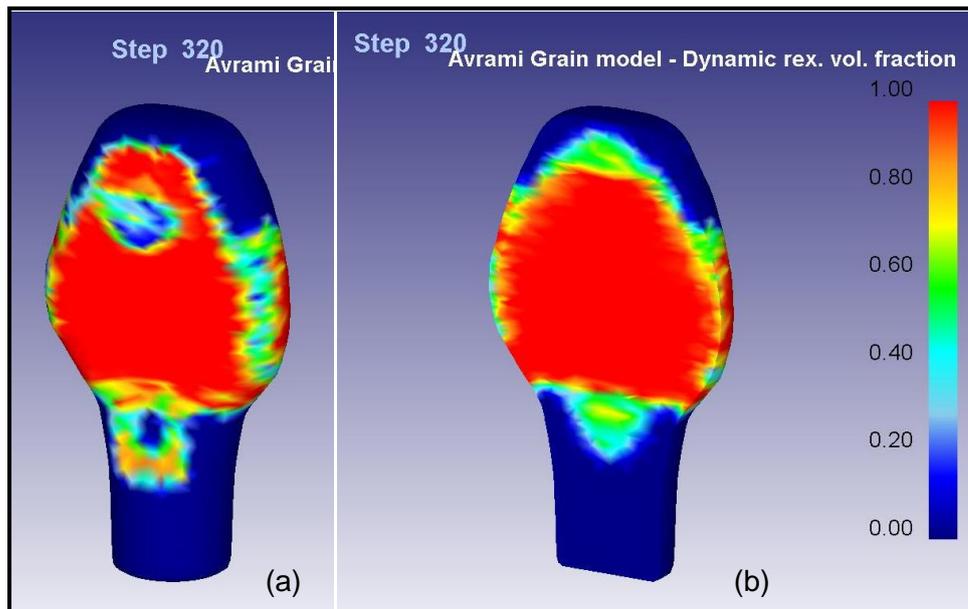


Figura 4.21 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final da deformação do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Pode ser visto na Figura 4.21 que a fração de recristalização dinâmica segue o comportamento da deformação para o terceiro estágio atingindo 100% na região central do blank onde a deformação aplicada tem valor máximo (ver Figura 4.18).

4.3.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica

A Figura 4.22 mostra a evolução do tamanho médio de grão ao final do terceiro estágio.

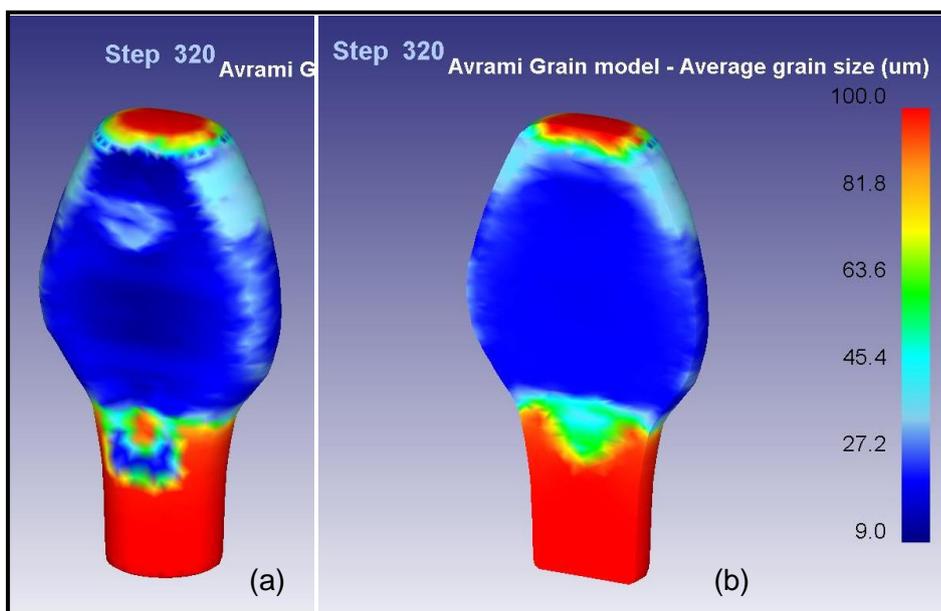


Figura 4.22 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 3º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

A Figura 4.22 evidencia a eficiência da recristalização dinâmica no refinamento de grãos para o material em estudo. Observa-se que durante todo o processo de recalque as deformações foram suficientes para atingir a deformação crítica e iniciar a recristalização dinâmica.

O tamanho médio de grão para a região deformada teve seu tamanho reduzido de 40 μm (vide Figura 4.17), para 27 μm aproximadamente, e o tamanho máximo de grão para a peça permaneceu em 100 μm .

4.3.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios

A Figura 4.23 mostra a distribuição de temperatura no material após o intervalo de 9,5 s entre o terceiro e quarto estágio.

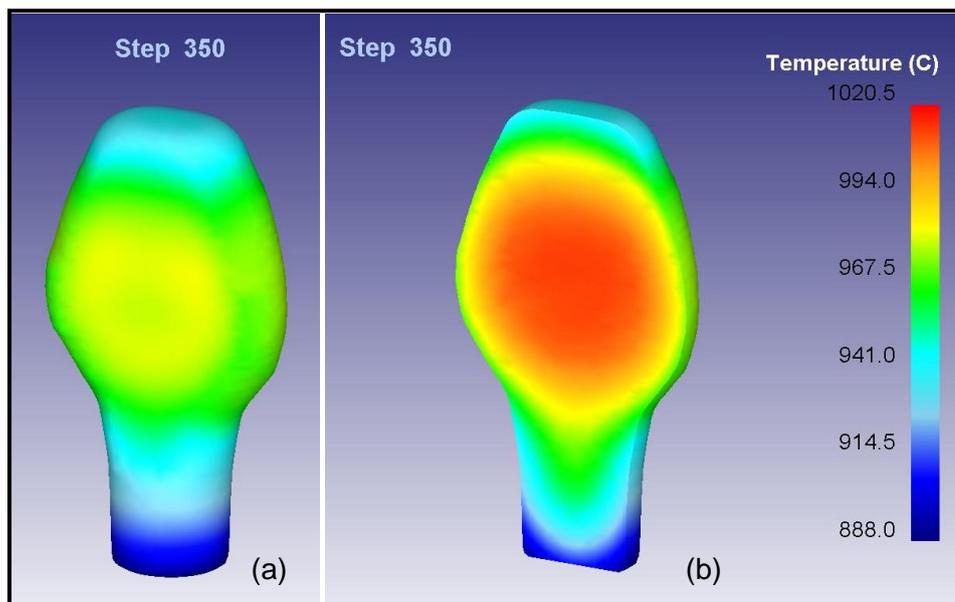


Figura 4.23 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 9,5 s entre o 3º e 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Na Figura 4.23 nota-se que o material busca homogeneizar a temperatura em todo seu volume, para isto, o núcleo dissipa calor para periferia do material buscando o equilíbrio.

Observa-se que o núcleo do material teve sua temperatura reduzida em 30 °C, porém a temperatura superficial na região deformada foi elevada em 110 °C aproximadamente durante a espera de 9,5 s.

4.3.7 Recristalização Estática no intervalo entre estágios

A Figura 4.24 mostra a fração volumétrica recristalizada estaticamente após o intervalo de 9,5 s entre o terceiro e quarto estágio.

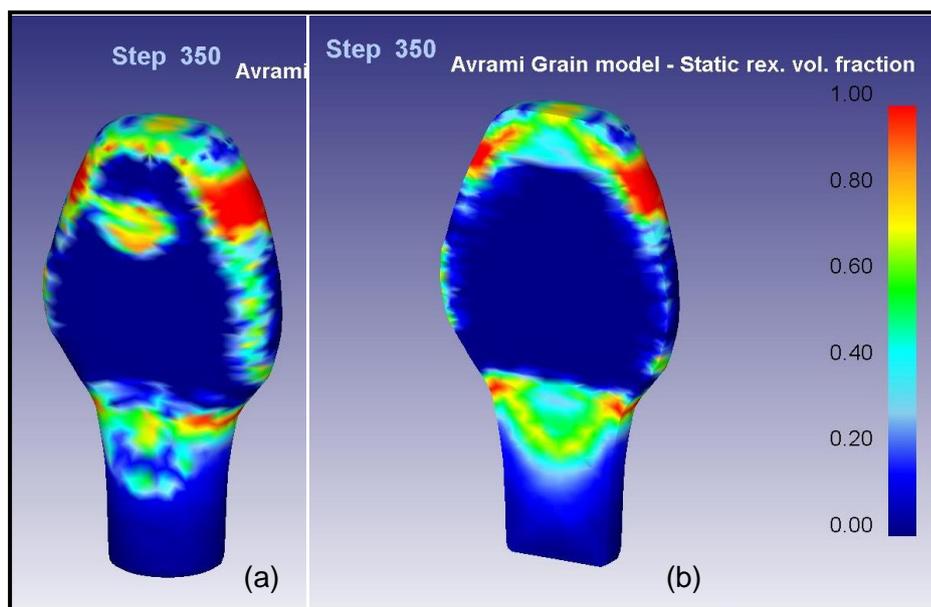


Figura 4.24 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 9,5 s entre o 3º e 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se na Figura 4.24 que a recristalização estática atingiu 100% em regiões em que a recristalização dinâmica não se completou, e houve a ocorrência de recristalização estática nos estágios anteriores.

Nota-se que as regiões onde a fração alcançou 100% estão na superfície do material, indicando que a recristalização estática não se mostrou muito eficiente para o refino de grãos no material em estudo, nas condições de processamento do recalque.

4.3.8 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios

A Figura 4.25 mostra a evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 9,5 s entre o terceiro e quarto estágio.

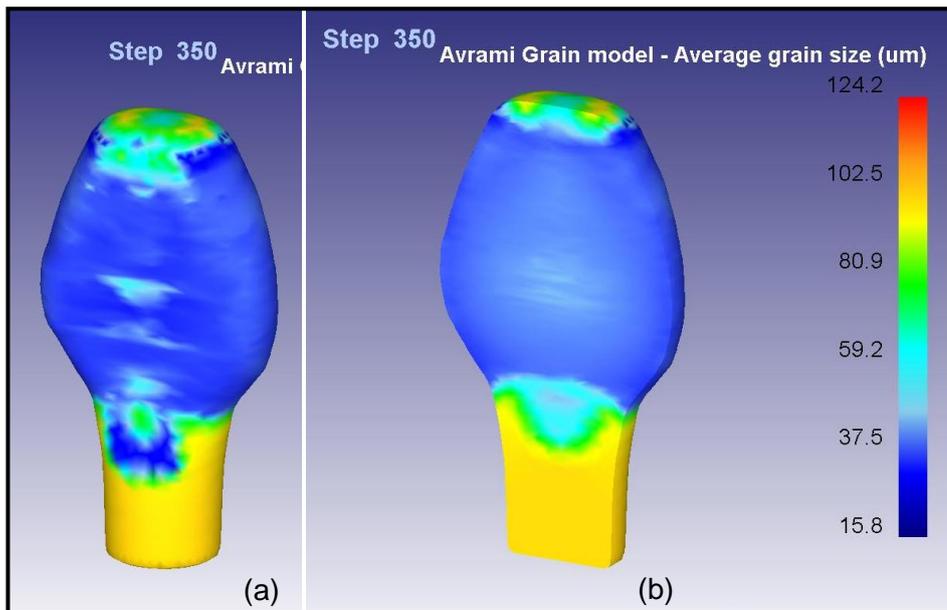


Figura 4.25 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 9,5 s entre o 3º e 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se na Figura 4.25 que o tamanho de grão máximo para a peça é de 124 μm , indicando que houve crescimento de grãos nas regiões livres de deformação e onde a recristalização estática não se completou (vide Figuras 4.18 e 4.24). Para a região deformada, ocorreu um pequeno crescimento dos grãos recristalizados dinamicamente, pois o tamanho médio de grão ao final da deformação de 27 μm atingiu valores de 38 μm aproximadamente durante o intervalo.

4.4 Parâmetros de processo para o quarto estágio

4.4.1 Variação da deformação

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a variação da distribuição de deformação aplicada no material para o quarto estágio do processo.

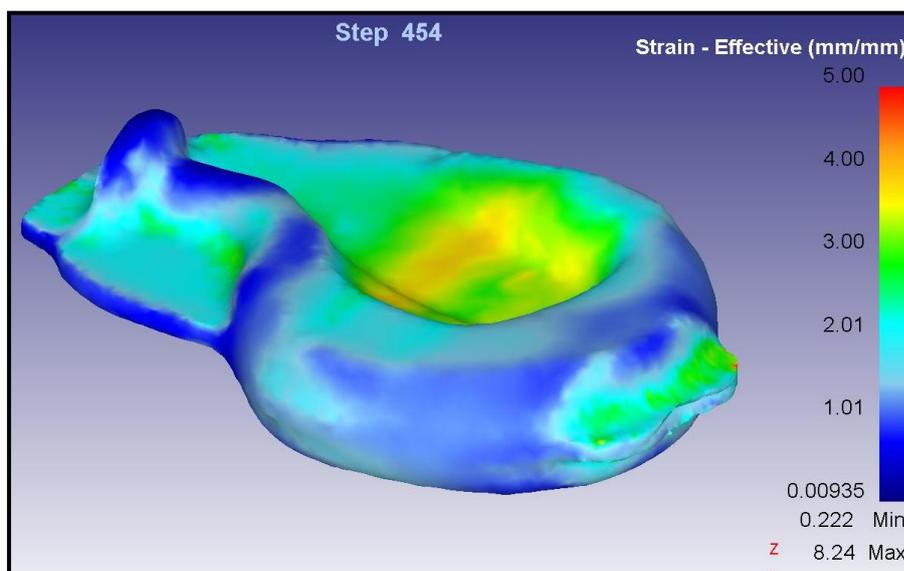


Figura 4.26 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 4º estágio.

No quarto estágio, o material preparado é distribuído pela cavidade da matriz de forjamento fechada, de tal forma que, ao final deste estágio o blank muito se aproxima da geometria final do produto. Observa-se, que devido a este fluxo do material ocorre uma maior distribuição da deformação imposta por toda a geometria, como mostrado pela Figura 4.26. O gradiente de deformação é observado pela deformação superficial de 0,01 na extremidade do gancho que sofreu pouca deformação (região azul da Figura 4.26 e anteriormente denominada como pé do blank) e a deformação de 3,50 na região central do gancho onde teve início a formação da rebarba da peça e a distribuição do material para a formação do bico do gancho (região verde/amarelo da Figura 4.26).

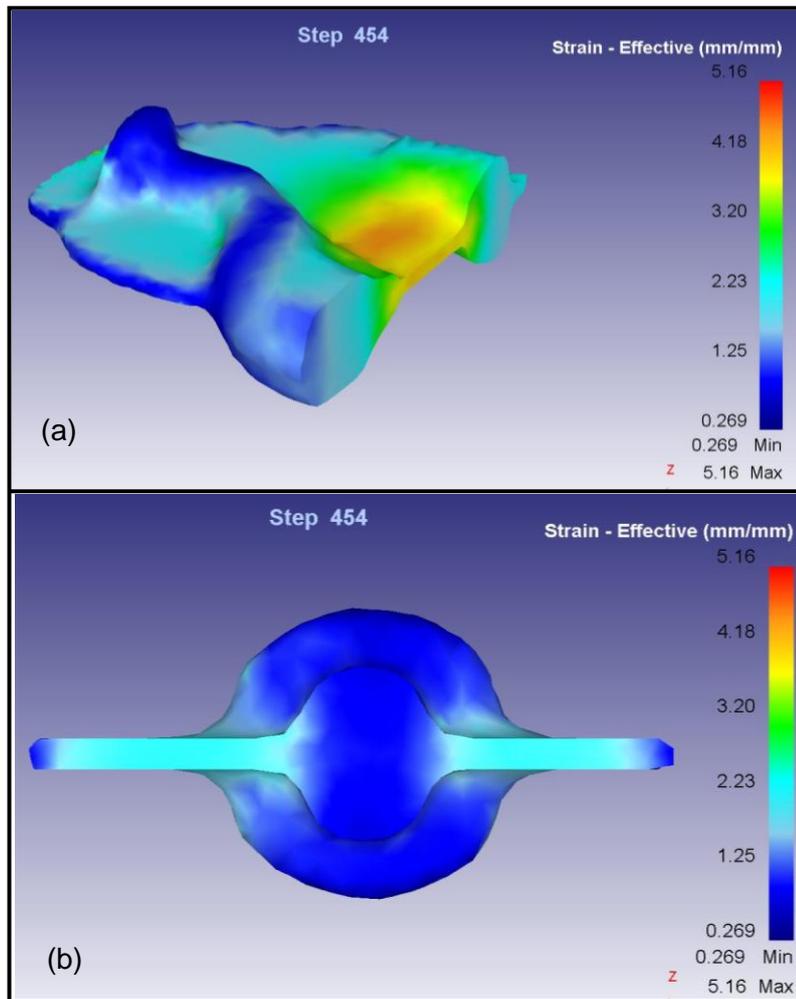


Figura 4.27 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 4º estágio, aplicando corte transversal: (a) região da curvatura do gancho e (b) região da extremidade do gancho.

Na Figura 4.27 nota-se que a deformação aplicada ao material no quarto estágio é suficiente para penetrar em toda a espessura do material, e conseqüentemente, provocará um refinamento de grãos nestas regiões dependendo das condições metalúrgicas.

4.4.2 Variação da taxa de deformação

A taxa de deformação é a relação entre a deformação aplicada e o tempo em que ela é realizada. Neste estágio do processo torna-se muito importante sua avaliação, pois a taxa de deformação é um parâmetro que altera a cinética de recristalização e, portanto, quanto maior for seu valor, maior será a velocidade e conseqüentemente a fração recristalizada.

A Figura 4.28 mostra a variação da taxa de deformação imposta ao material para o quarto estágio do processo.

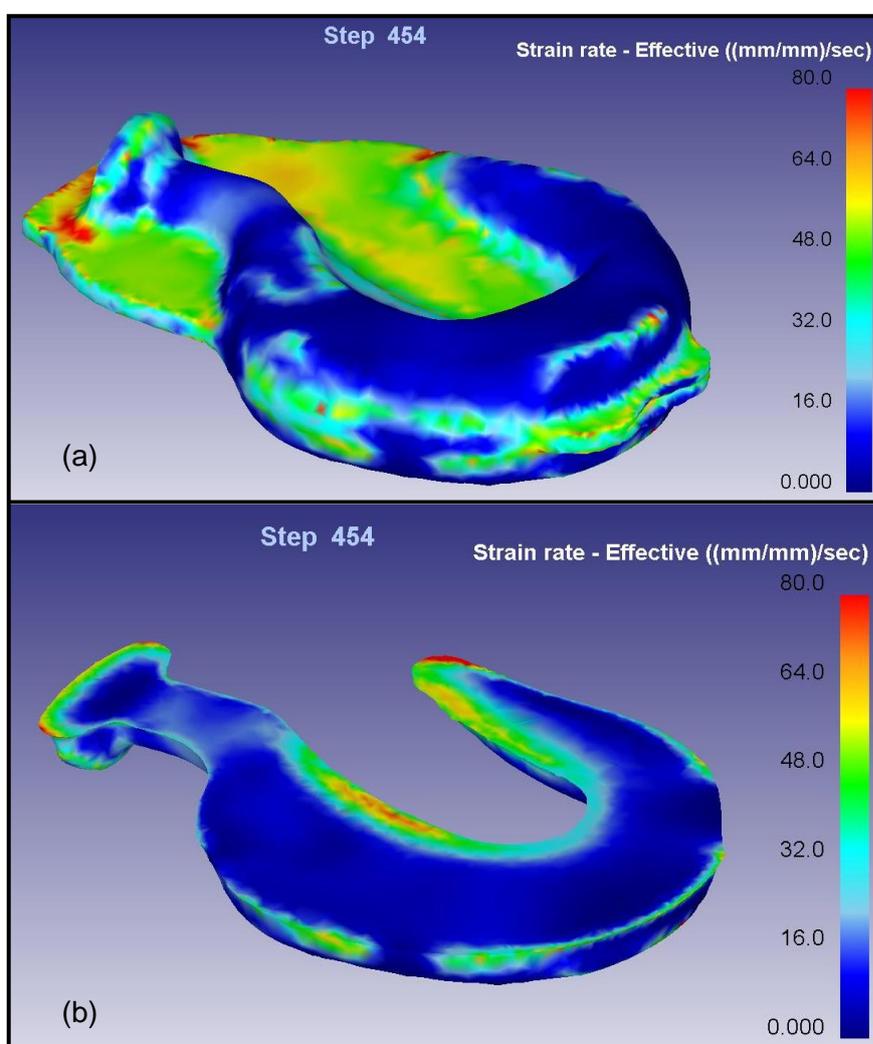


Figura 4.28 Representação gráfica mostrando a variação da taxa de deformação imposta ao material ao final do 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se que a distribuição da taxa de deformação é semelhante à distribuição da deformação aplicada ao material. Nota-se que no quarto estágio a taxa de deformação é heterogênea e têm seu pico nas regiões onde há maior concentração de deformação conforme mostra a Figura 4.28.

4.4.3 Variação da temperatura

A Figura 4.29 mostra a distribuição de temperatura no material para o quarto estágio do processo.

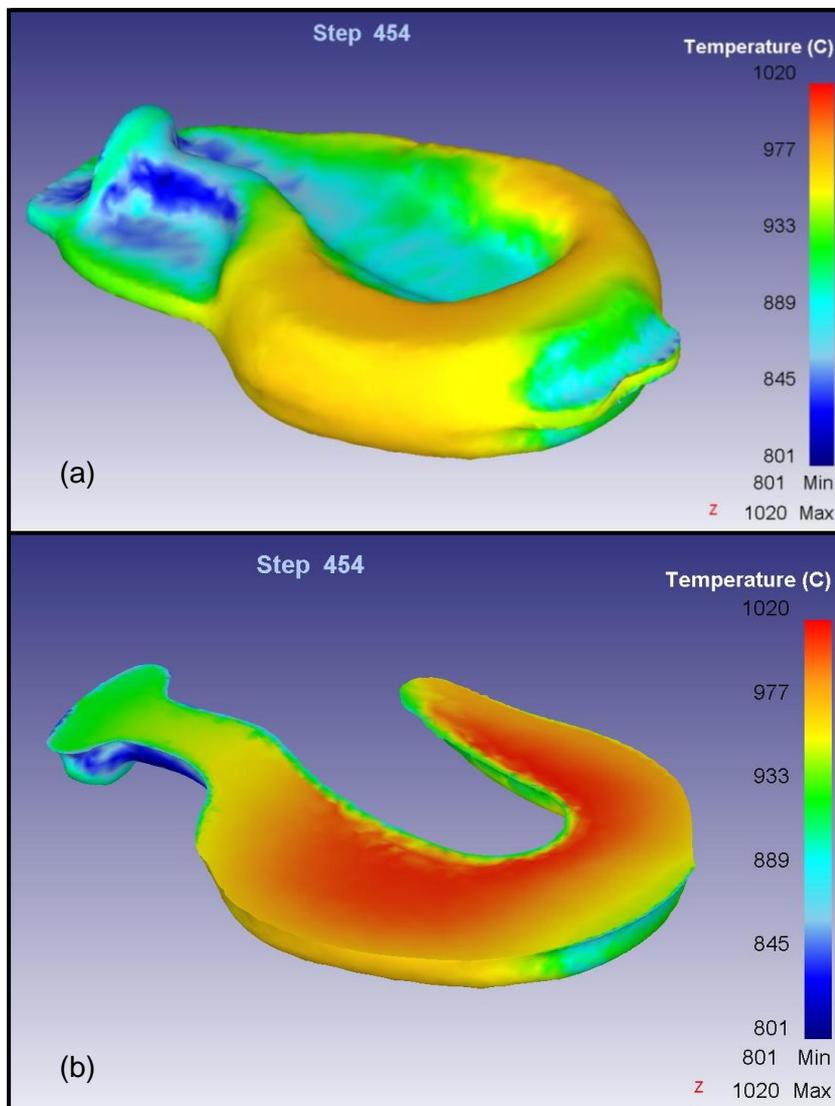


Figura 4.29 Representação gráfica mostrando a variação da temperatura do material ao final do 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Pode-se observar na Figura 4.29 que a distribuição de volume do material pela cavidade da matriz resultou em uma grande perda de calor superficial levando a temperaturas de 860 °C em regiões menos espessas como a extremidade do gancho e ao centro da curvatura onde houve a formação de rebarba. No entanto, a temperatura no interior da peça não sofreu grandes alterações.

4.4.4 Recristalização Dinâmica

A Figura 4.30 mostra a fração volumétrica recristalizada dinamicamente durante o quarto estágio do processo.

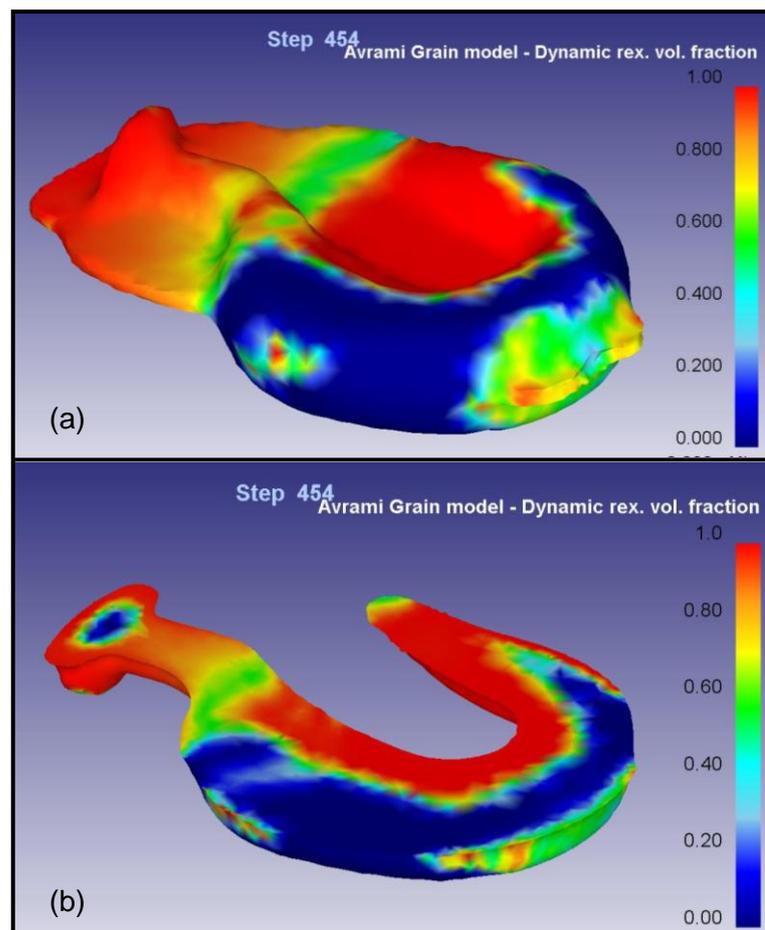


Figura 4.30 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final do 4º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Para que a recristalização dinâmica ocorra é necessário que a deformação aplicada ao material supere a deformação crítica. Portanto, a fração recristalizada depende do quanto a deformação aplicada supera a deformação crítica em cada uma das regiões onde ela ocorre.

Observa-se que ocorre recristalização dinâmica nas regiões sujeitas a um maior grau de deformação (ver Figuras 4.26 e 4.27). Nestes locais a deformação superou a deformação crítica necessária para iniciar este mecanismo de amaciamento. As regiões que apresentam 100% de recristalização dinâmica são locais que foram sujeitos a grandes deformações. Como pode ser visto na Figura 4.30 a superfície da peça apresenta as maiores frações recristalizadas que reduzem à zero em determinadas regiões à medida que se avança para o interior da peça.

4.4.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica

As figuras utilizadas para demonstrar a evolução microestrutural para os estágios quatro e cinco foram obtidas aplicando cortes transversais em regiões específicas conforme determinadas na Figura 3.5 para análise do tamanho médio de grão austenítico e posterior comparativo com a microscopia ótica de amostras de peças retiradas do processo industrial.

A Figura 4.31 mostra a evolução do tamanho médio de grão nas regiões de análise conforme determinada pela Figura 3.5.

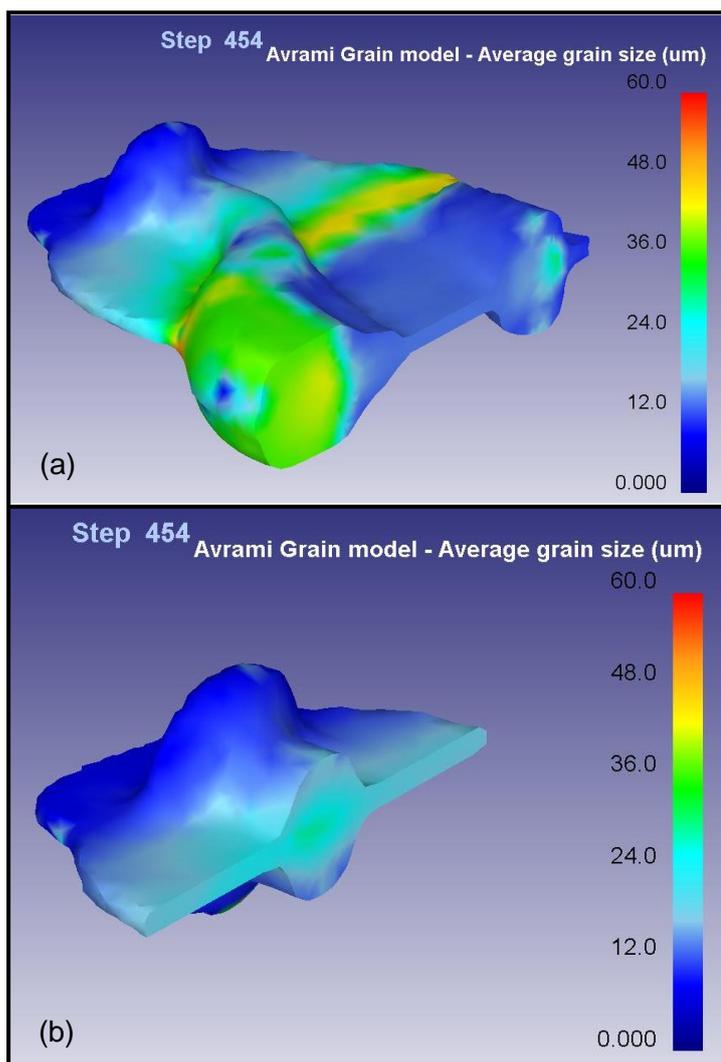


Figura 4.31 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 4º estágio, aplicando corte transversal: (a) na região da curvatura do gancho, (b) na extremidade do gancho.

A Figura 4.31 mostra a heterogeneidade do tamanho médio de grão para a peça ao final do quarto estágio do processo. Nota-se que a recristalização dinâmica promoveu um refino de grãos em toda a peça, onde o tamanho médio de grão de aproximadamente $100\ \mu\text{m}$ em regiões livres de deformação ao final do terceiro estágio foi reduzido para até $26\ \mu\text{m}$ na região da extremidade do gancho (ver Figura 4.31 (b)). Comparando as Figuras 4.30 (a) e 4.31 (b) verifica-se o quão a recristalização dinâmica foi mais eficiente superficialmente quando se observa a variação do tamanho médio de grão na região “a” de análise.

4.4.6 Variação da Temperatura no intervalo entre estágios

A Figura 4.32 mostra a distribuição de temperatura no material após o intervalo de 5,2 s entre o quarto e o quinto estágio.

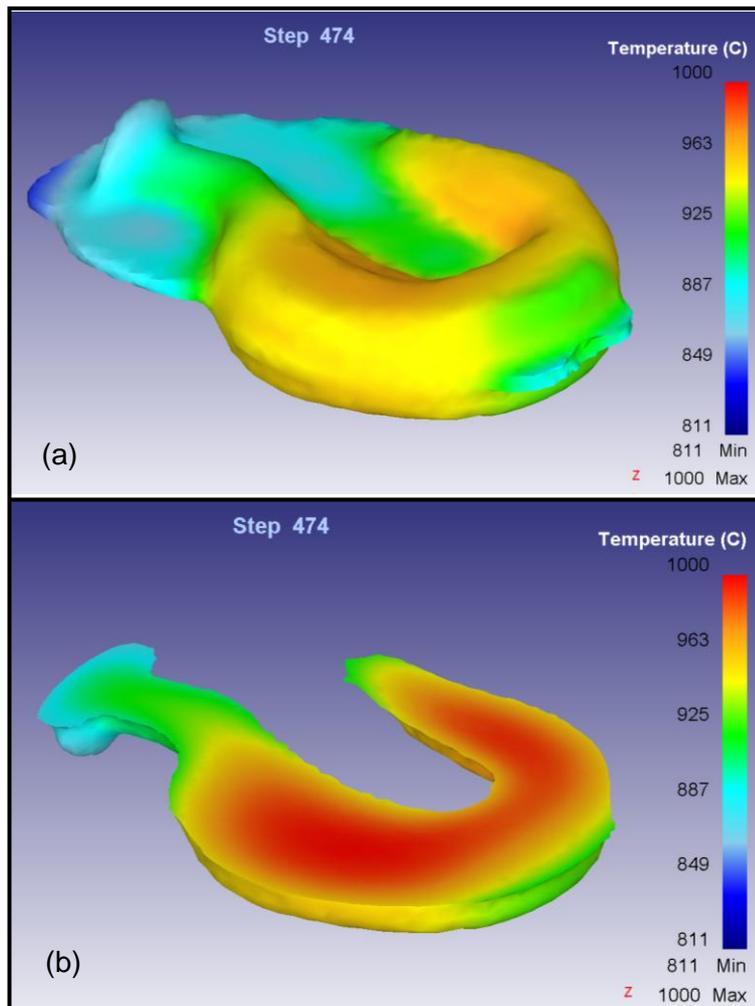


Figura 4.32 Representação gráfica mostrando a distribuição de temperatura do material após o intervalo de 5,2 s entre o 4º e 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se na Figura 4.32 que a maior perda de calor ocorreu superficialmente e na extremidade do gancho onde a espessura foi reduzida, aumentando a área de troca de calor.

4.4.7 Recristalização Estática no intervalo entre estágios

A Figura 4.33 mostra a fração volumétrica recristalizada estaticamente após o intervalo de 5,2 s entre o quarto e quinto estágio.

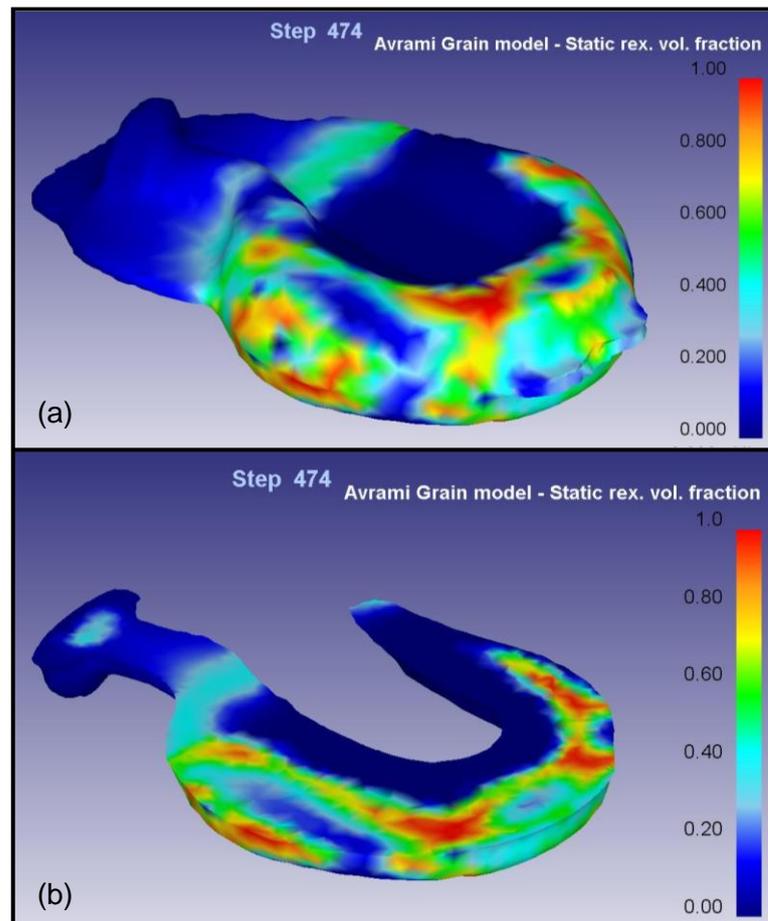


Figura 4.33 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material após o intervalo de 5,2 s entre o 4^o e 5^o estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se que a recristalização estática atinge maiores valores onde ocorreu pouca deformação (vide Figura 4.26), portanto, nestas regiões a deformação crítica não foi superada e a recristalização dinâmica não ocorreu, ou se ocorreu, não completou 100% de fração recristalizada (ver Figura 4.31).

4.4.8 Evolução do Tamanho de Grão no intervalo entre estágios

A Figura 4.34 mostra a evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 5,2 s entre o quarto e quinto estágio.

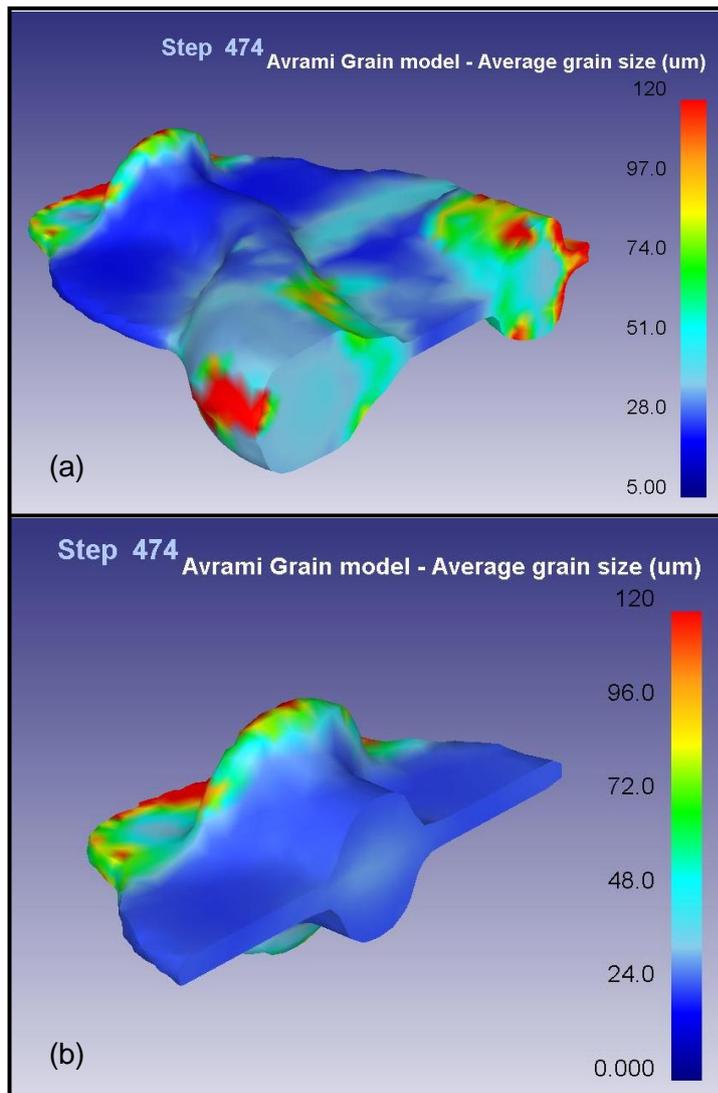


Figura 4.34 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão após o intervalo de 5,2 s entre o 4º e 5º estágio, aplicando corte transversal: (a) na região da curvatura do gancho, (b) na extremidade do gancho.

Pode-se observar que a recristalização estática atuou na região da curvatura do gancho reduzindo o tamanho médio de grão de 42 μm obtido após a deformação (vide Figura 4.31), para 34 μm aproximadamente conforme a

Figura 4.34 (a). No entanto, na região da extremidade do gancho o tamanho de grão permaneceu inalterado, indicando que não houve condições metalúrgicas para o crescimento de grãos, pois nesta região a recristalização estática não atuou.

4.5 Parâmetros de processo para o quinto estágio

4.5.1 Variação da deformação

As Figuras 4.35 e 4.36 mostram a variação da distribuição de deformação aplicada no material para o quinto estágio do processo.

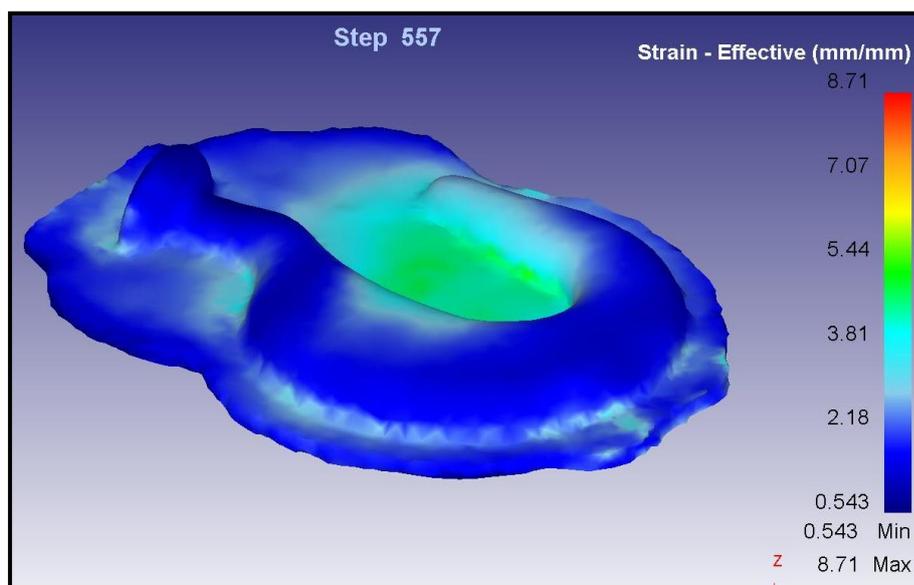


Figura 4.35 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 5º estágio.

A partir da Figura 4.35 pode-se observar que no quinto estágio a deformação aplicada é mais homogênea em toda a área da peça, pois neste estágio é realizado o acabamento e adequação dimensional do produto final, com seus maiores picos de valores de deformação na região central do gancho semelhante ao quarto estágio, devido à redução na espessura da rebarba.

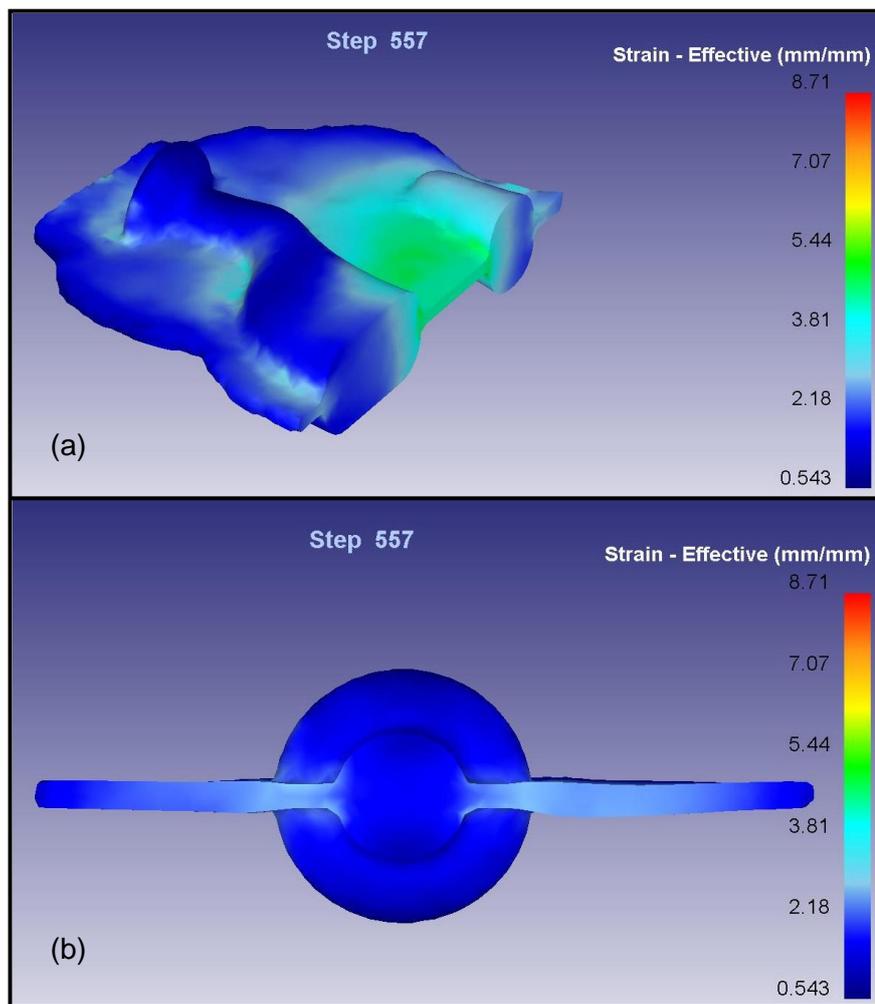


Figura 4.36 Representação gráfica da deformação plástica imposta ao material ao final do 5º estágio, aplicando corte transversal: (a) região da curvatura do gancho e (b) região da extremidade do gancho.

Observa-se na Figura 4.36 que a deformação aplicada ao material no quinto estágio é apenas superficial e seu valor chega a 0,5 no núcleo da peça.

4.5.2 Variação da taxa de deformação

A Figura 4.37 mostra a variação da taxa de deformação imposta ao material para o quinto estágio do processo.

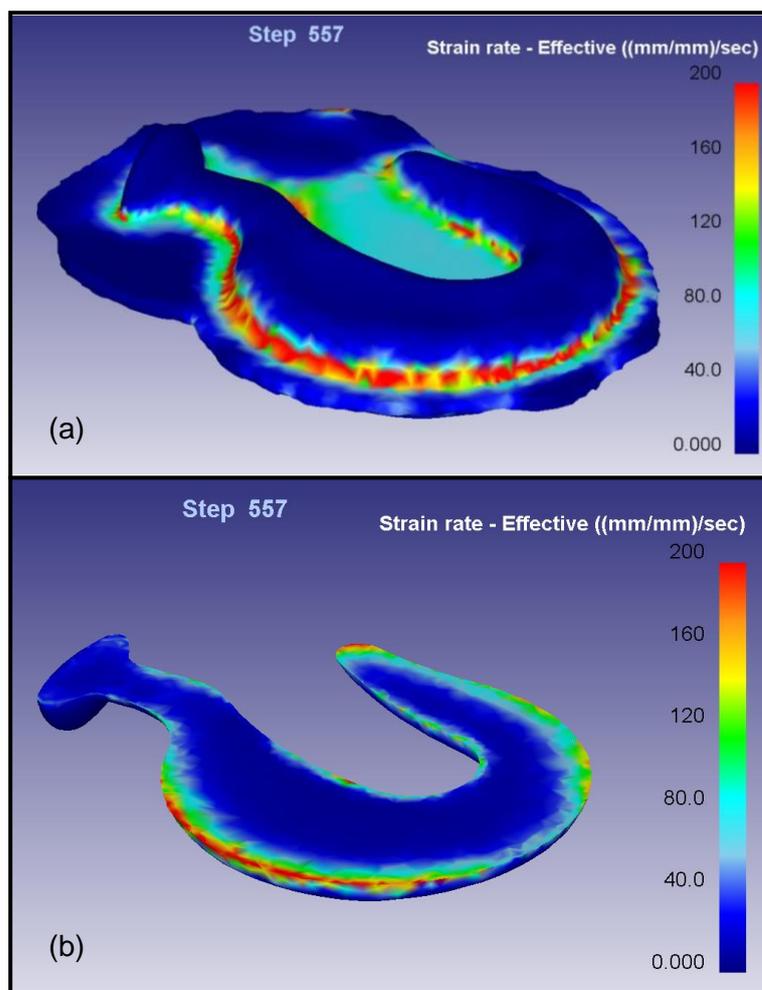


Figura 4.37 Representação gráfica mostrando a variação da taxa de deformação imposta ao material ao final do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se que a distribuição da taxa de deformação é semelhante à distribuição da deformação aplicada ao material. Para o quinto estágio a taxa de deformação de 200 s^{-1} está condicionada a concentração de tensões e conseqüentemente as deformações impostas em toda a borda da cavidade da matriz devido à geração da rebarba conforme a Figura 4.37.

4.5.3 Variação da temperatura

A Figura 4.38 mostra a distribuição de temperatura no material para o quinto estágio do processo.

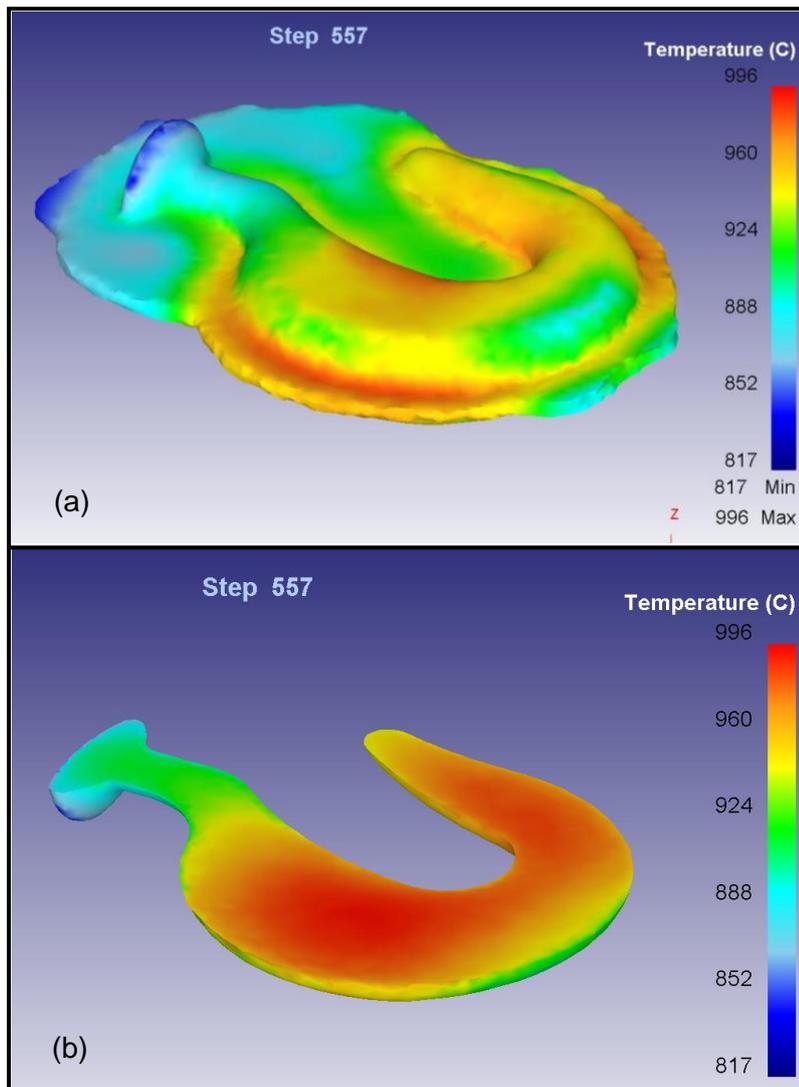


Figura 4.38 Representação gráfica mostrando a variação da temperatura do material ao final do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Observa-se na Figura 4.38 que as maiores variações térmicas acontecem na superfície da peça, com o menor valor de 852 °C. Todavia, os gradientes térmicos no interior da peça são muito menores, porém resultam em diferentes microestruturas ao longo de toda a peça.

4.5.4 Recristalização Dinâmica

A Figura 4.39 mostra a fração volumétrica recristalizada dinamicamente durante o quinto estágio do processo.

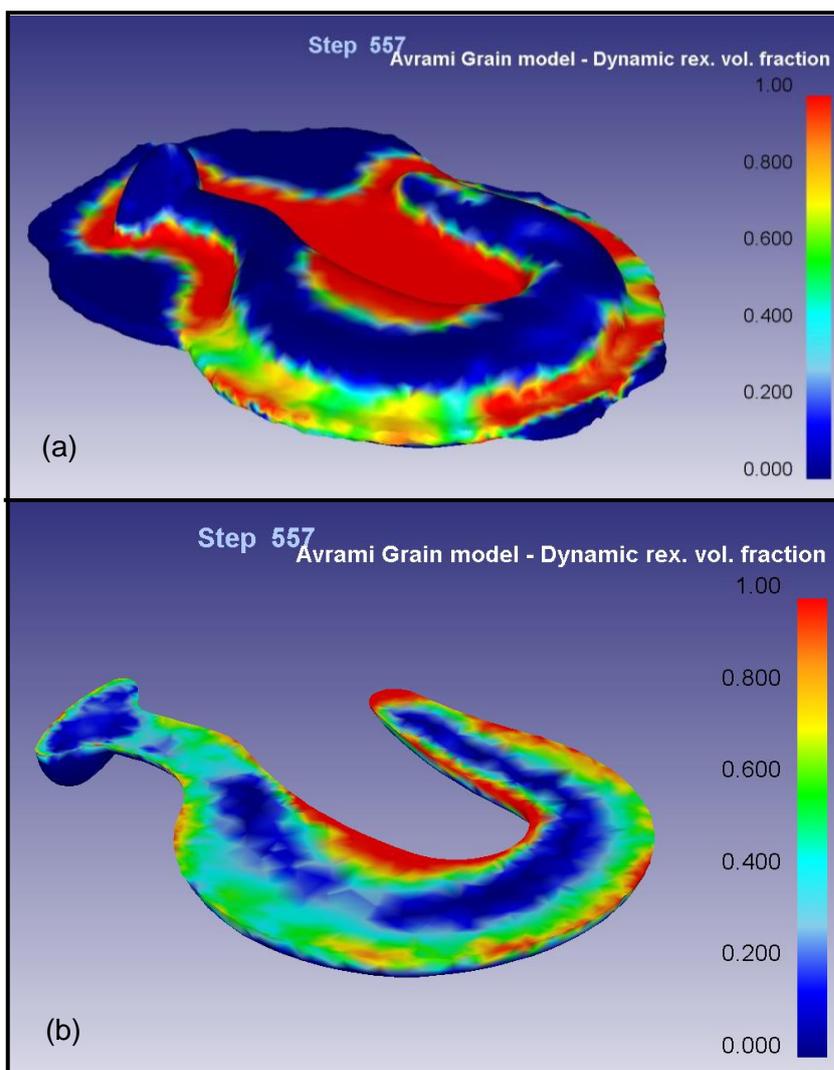


Figura 4.39 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada dinamicamente do material ao final do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

Para o quinto estágio nota-se que a recristalização dinâmica chega a 100% de fração recristalizada no contorno da peça onde a matriz concentra tensões, devido à geração de rebarba pelo excesso de material na cavidade e avanço para o interior da peça, no entanto tem seu valor reduzido ao mínimo.

Em algumas regiões da superfície da peça nota-se que a recristalização dinâmica atinge um valor muito baixo ou quase nulo, por consequência da heterogeneidade da deformação.

4.5.5 Tamanho de Grão após a Recristalização Dinâmica

A Figura 4.40 mostra a evolução do tamanho médio de grão na região “a” e “b” de análise conforme determinada pela Figura 3.5.

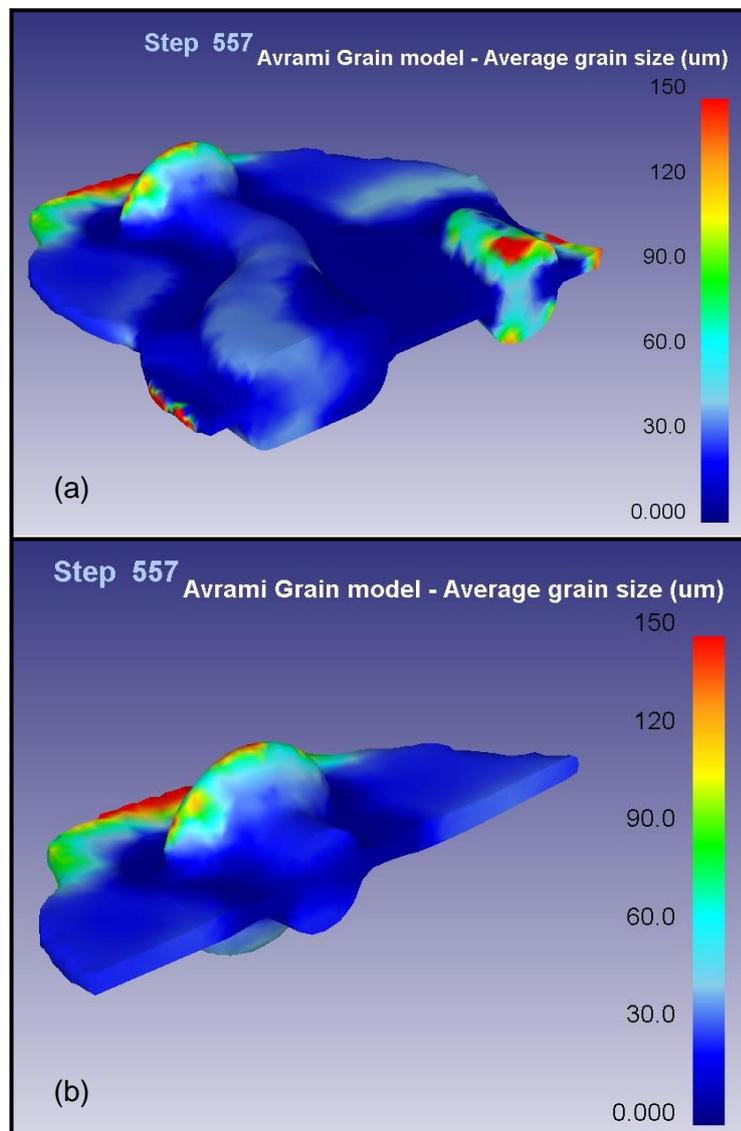


Figura 4.40 Representação gráfica da evolução do tamanho médio de grão ao final da deformação do 5º estágio, aplicando corte transversal: (a) na região da curvatura do gancho, (b) na extremidade do gancho.

Observa-se na Figura 4.40 a heterogeneidade do tamanho médio de grão para a peça ao final do quinto estágio. Nota-se que a recristalização dinâmica promoveu um refino de grãos somente na região da extremidade do gancho, onde a espessura da peça é menor, e o tamanho médio de grão para o núcleo desta região é de 20 μm . Para a região da curvatura do gancho a recristalização dinâmica não foi efetiva e ocorreu um crescimento de grãos, elevando o tamanho médio de grão desta região de 34 μm (ao final do quarto estágio) para 45 μm após a deformação.

Por outro lado, em regiões isoladas da peça o tamanho médio de grão atinge aproximadamente 150 μm , indicando que nestes locais pode ocorrer um crescimento de grãos indesejável durante o resfriamento da peça até a temperatura ambiente.

4.5.6 Recristalização Metadinâmica durante o resfriamento

A Figura 4.41 mostra a fração volumétrica recristalizada metadinamicamente 5 s após o quinto estágio durante o resfriamento.

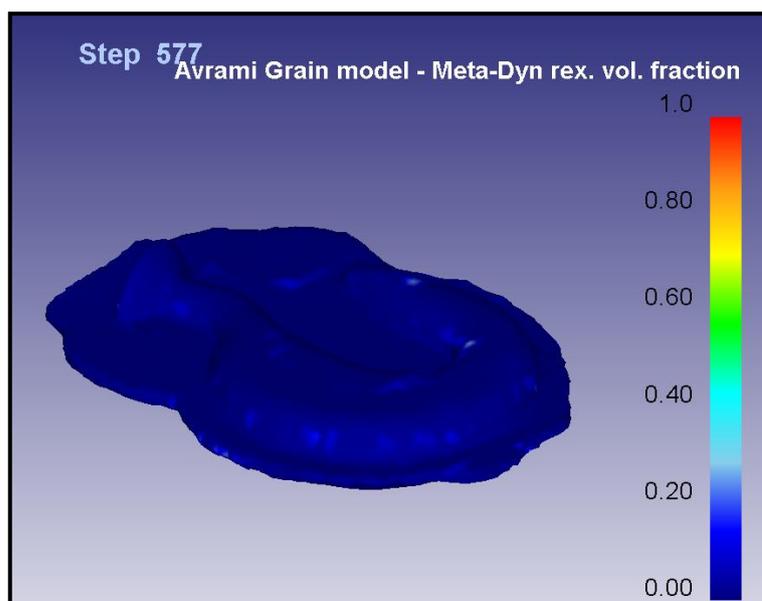


Figura 4.41 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada metadinamicamente do material 5 s após o final da deformação do 5º estágio.

Nota-se que a recristalização metadinâmica atingiu valores baixíssimos, durante o resfriamento ao final do processo. Analisando as condições de processamento, pode-se dizer que a taxa de deformação imposta e a temperatura de deformação, não foram suficientes para fornecer as condições cinéticas necessárias para a ocorrência da recristalização metadinâmica.

4.5.7 Recristalização Estática durante o resfriamento

As Figuras 4.42 e 4.43 mostram a fração volumétrica recristalizada estaticamente durante o resfriamento após o quinto estágio.

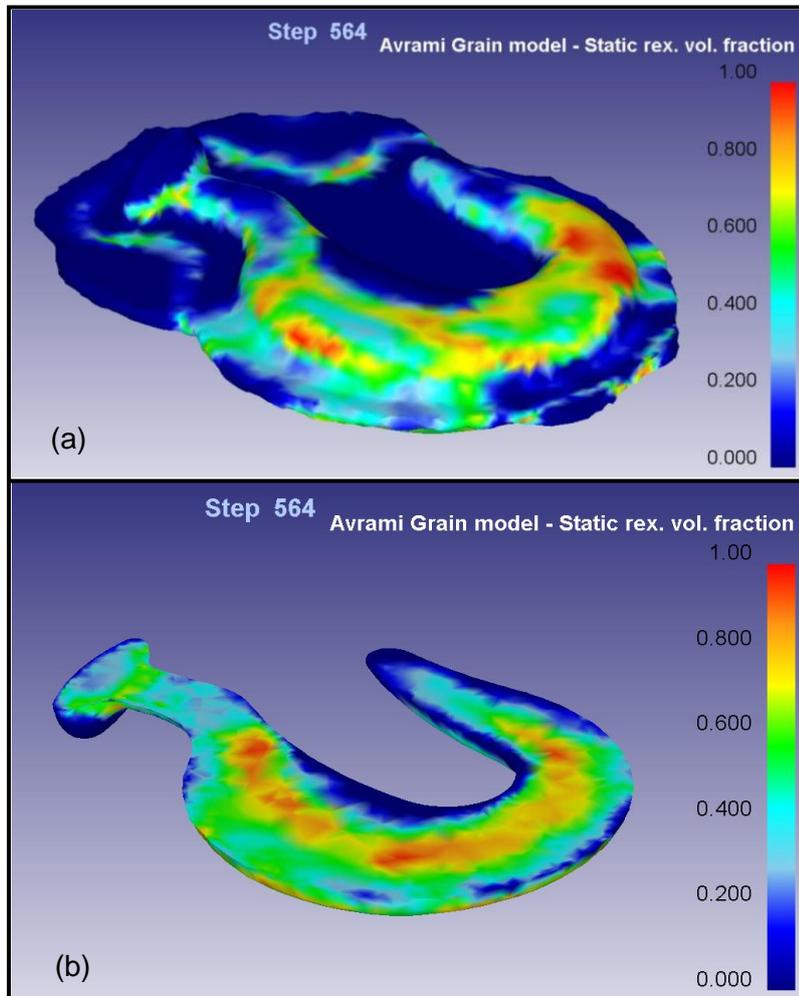


Figura 4.42 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material 2 s após o final da deformação do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

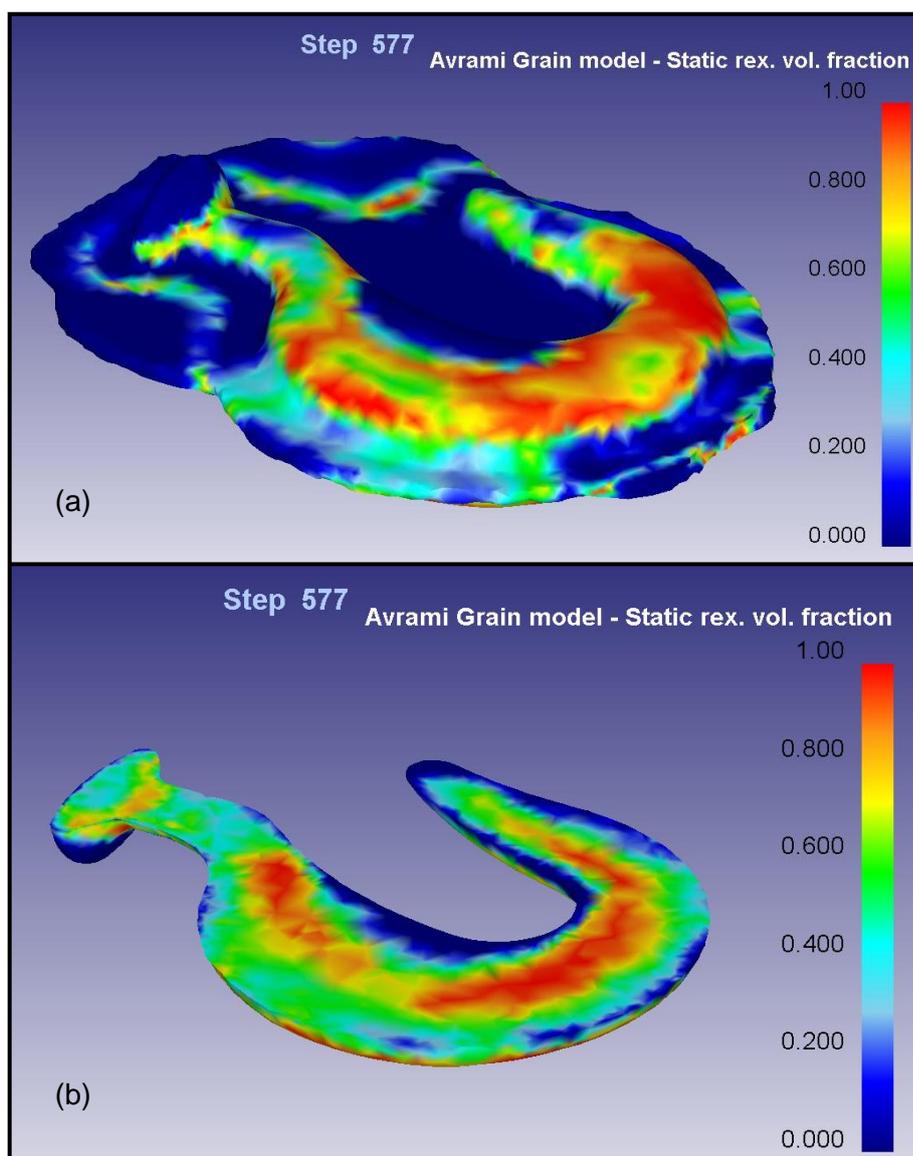


Figura 4.43 Representação gráfica mostrando a fração recristalizada estaticamente do material 5 s após o final da deformação do 5º estágio: (a) sem corte, (b) aplicando corte longitudinal.

A cinética da recristalização estática é fortemente dependente do tempo de incubação. Conforme mostram as Figuras 4.42 e 4.43, o tempo de espera de 2 s após o término da deformação do quinto estágio é suficiente para atingir aproximadamente 50% de recristalização, e após 5 s de espera têm-se quase 100% de fração recristalizada estaticamente na superfície e interior da peça onde a recristalização dinâmica não ocorreu, ou se ocorreu, não completou 100% de fração recristalizada (vide Figura 4.39).

4.6 Verificação Microscópica do Tamanho Médio de Grão

As Figuras 4.44 e 4.45 mostram as fotomicrografias obtidas a partir de amostras retiradas do processo industrial.

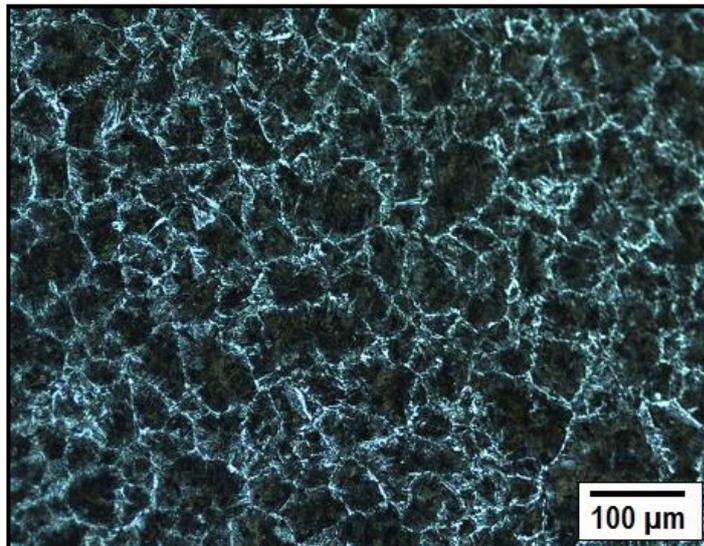


Figura 4.44 Microestrutura do material do núcleo da amostra após ataque químico, obtida da região “a” da peça conforme Figura 3.5.

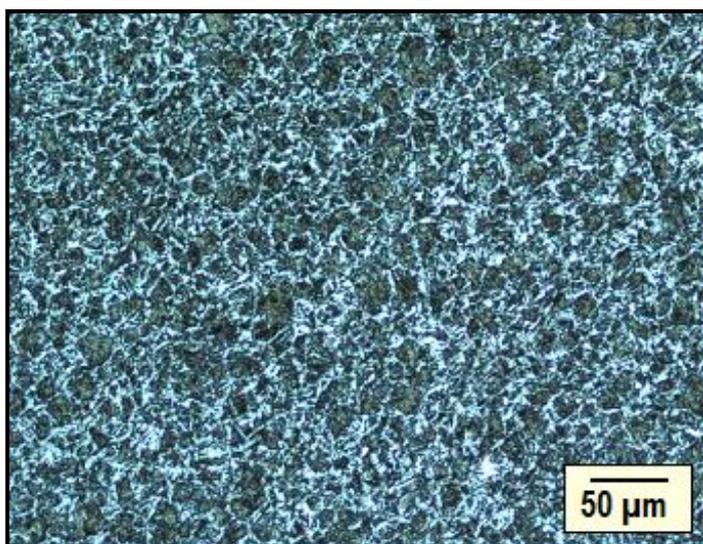


Figura 4.45 Microestrutura do material do núcleo da amostra após ataque químico, obtida da região “b” da peça conforme Figura 3.5.

As fotomicrografias foram analisadas via microscopia ótica e o tamanho médio de grão determinado está descrito nas Tabelas 4.1 e 4.2 a seguir.

Tabela 4.1 Tamanho médio de grãos referentes à posição “a” da amostra

Peça	Posição da Amostra	Tamanho médio de grão determinado (μm)	Tamanho médio de grão simulação (μm)
1	a	52	45
2	a	55	45
3	a	50	45
4	a	51	45

Tabela 4.2 Tamanho médio de grãos referentes à posição “b” da amostra

Peça	Posição da Amostra	Tamanho médio de grão determinado (μm)	Tamanho médio de grão simulação (μm)
1	b	26	20
2	b	25	20
3	b	23	20
4	b	28	20

Através das Tabelas 4.1 e 4.2 observa-se que a simulação demonstrou resultados satisfatórios em relação ao tamanho médio de grão quando comparados com os resultados da microscopia ótica. Considerando os resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, pode-se esperar que ao final do resfriamento ocorra gradientes microestruturais, os quais podem prejudicar a resistência mecânica e conseqüentemente as propriedades do produto final.

5 CONCLUSÕES

Para este trabalho a simulação numérica mostrou-se uma importante ferramenta para análise de parâmetros envolvidos no processo de forjamento à quente de aços baixo carbono, auxiliando no projeto e análise de novas rotas de fabricação e otimização de processos de forjamento industriais reduzindo os custos gerados devido ao tempo de desenvolvimento e testes físicos durante a produção. No presente trabalho foram analisados os seguintes parâmetros: variação da temperatura, deformação e taxa de deformação bem como a evolução microestrutural durante o processo de conformação.

Considerando as condições do processamento industrial e os resultados obtidos nesse estudo, pode-se concluir:

- Durante os três primeiros estágios que caracterizam o recalque do processo, a deformação mostrou-se muito heterogênea no sentido longitudinal do blank, chegando à zero no pé do blank e atingindo os maiores valores nas regiões centrais e superiores onde ocorreu a maior fração de recristalização dinâmica no terceiro estágio.
- Durante o processamento o material troca calor com as matrizes e a atmosfera, o que resultou em temperaturas mais baixas para toda a superfície da peça. Todavia, para o núcleo a temperatura mantém-se mais homogênea e no segundo e terceiro estágio têm-se um ganho de calor através do aquecimento adiabático elevando a sua temperatura.
- A deformação imposta ao material durante o forjamento em matriz fechada (estágios 4 e 5) é mais homogênea. Isto se deve ao fluxo do material pela cavidade da matriz e a restrição do fluxo de material pelas paredes da cavidade. Nota-se que no quarto estágio a deformação imposta foi capaz de penetrar toda a espessura da peça e dessa forma, iniciando uma alta fração de recristalização dinâmica nas regiões “a” e “b” analisadas.

- A temperatura da peça nos estágios quatro e cinco também apresenta uma variação da extremidade para a curvatura do gancho devido ao aumento da área de troca de calor e a alteração na espessura de toda a peça.
- A recristalização dinâmica mostrou-se efetiva neste estudo e atingindo 100% de fração recristalizada em várias regiões da peça e estágios do processo. Dessa forma pode-se dizer que a recristalização dinâmica foi o principal mecanismo para o refinamento de grãos atuante nos estágios de recalque e achatamento e para o forjamento em matriz predominou a a recristalização estática para o material de estudo.
- Ao longo de todo o volume da peça o tamanho de grão apresentou heterogeneidade. Isto pode ser atribuído aos gradientes de deformação e temperaturas aos quais a peça foi submetida durante o processo.
- Nas seções observadas (regiões “a” e “b”) via microscopia ótica o tamanho médio de grão como era esperado, mostrou-se sempre maior no núcleo em relação a superfície da peça, o que pode ser observado nas peças reais como na simulação.
- O tamanho médio de grão austenítico determinado pela simulação mostrou boa concordância com os valores encontrados pela microscopia, e dessa forma, validando os parâmetros utilizados para a simulação numérica.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para continuidade deste trabalho segere-se os seguintes estudos futuros:

- Através da simulação numérica realizar o estudo de outros parâmetros como a geometria do material de partida e matrizes.
- Avaliar a sequência operacional para o produto gancho bola visando melhor distribuição da deformação e conseqüentemente homogeneidade no tamanho de grão.
- Incluir na simulação numérica a análise da microestrutura durante o resfriamento até temperatura ambiente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Silva, A.L.C. Aços e Ligas especiais. 2. Ed. São Paulo: Blücher, 2006. 646p.
- [2] McQueen, H.J. e Jonas, J.J. Recovery and Recrystallization During High Temperature Deformation. Treatise on Materials Science and Technology, London. Academic Press, v.6 (1977) p. 394.
- [3] Lima, N.B.; Lima, L.M.G. e Padilha, A.F. Texturas de recristalização. IN: Tschiptschin, A.P. et. al. (Ed.). Textura e relações de orientação. São Paulo: EPUSP, 2001. p. 59-75.
- [4] SANDIM, H.R.Z. Heterogeneidades de deformação: uma visão microscópica. IN: TSCHIPTSCHIN, A.P. et. al. (Ed.). Textura e relações de orientação. São Paulo: EPUSP, 2001. p. 11-22.
- [5] Dieter, G.E. Mechanical Metallurgy. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [6] Djaic, R.A.P. e Jonas, J.J. Static Recrystallization of austenite between intervals of hot working. J. Iron and Steel Inst. (1972) p. 256–261.
- [7] Regone, W. Modelagem e Simulação de Seqüências de Deformações a Quente para Descrever e Predizer a Evolução Microestrutural durante o Processamento Metalúrgico, Metalurgia & Materiais, v.51 (1998) p. 27-33.
- [8] Jorge Jr., A.M. Análise do Comportamento Plástico Mecânico dos Aços Inoxidáveis em Altas Temperaturas e Altas Taxas de Deformação. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 1997.
- [9] Frost, H.J. e Ashby, M.F. Deformation-Mechanism Maps. Pergamon Press, Oxford, 1982.

[10] Humphreys, F.J. e Hatherly, M. Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Pergamon Press, Oxford, 1995.

[11] Cahn, R.W. Recovery and Recrystallization. Physical Metallurgy, ed. Wiley, N.Y., (1965) p.925.

[12] H. Beladi, P. Cizek e P.D. Hodgson, The mechanism of metadynamic softening in austenite after complete dynamic recrystallization, Scripta Materialia, v.62 (2010) p. 191–194.

[13] Reed-Hill, R. E. Physical Metallurgy Principles. 2.ed. Boston: Van Nostrand Reinhold, 1973.

[14] Silva, E.S. Caracterização e Modelamento do Comportamento Plástico a Quente do Aço Inoxidável Austenítico ISO 5832-9, utilizado em Implantes Ortopédicos. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2011.

[15] Akta, S.; Richardson, G.J. e Sellars, C.M. Hot Deformation and Recrystallization of 3% Silicon Steel Part 4: Effect of Recovery and Partial Recrystallization between Passes on Subsequent Recrystallization Behaviour. ISIJ International, v.45, No.11(2005) p. 1696-1702.

[16] McQueen, H.J.; Yue, S.; Ryan, N.D. e Fly, E. Hot Working Characteristics of steels In Austenitic State. Journal of Materials Processing Technology, v.53 (1995) p. 293-310.

[17] Regone, W. Simulação da Laminação a Quente de um Aço Livre de Intersticiais (IF) através de Ensaio de Torção. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2001.

[18] Poliak, E.I. e Jonas, J.J. A One Parameter Approach to Determining the Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization. *Acta Mater.*, v.44, No. 1 (1996) p. 127-136.

[19] Najafizadeh, A. e Jonas, J.J. Predicting the Critical Stress for Initiation of Dynamic Recrystallization, *ISIJ International*, v.46, No. 11 (2006) p. 1679-1684.

[20] Poliak, E.I. e Jonas, J.J. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation, *ISIJ International*, v.43, No. 5 (2003) p. 684-691.

[21] Sellars, C.M. In Proc. 7th Riso Int. Symp. on Metallurgy and Materials Science, p. 167, Roskilde Denmark. 1986.

[22] Sicililano Jr., F. Recuperação e recristalização durante a deformação a quente. IN: TSCHIPTSCHIN, A.P. et. al. (Ed.). *Textura e relações de orientação*. São Paulo: EPUSP, 2001. p. 93-108.

[23] Phaniraj, M.P.; Behera, B.B. e Lahiri, A.K. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill. Part-II. Microstructure evolution. *Journal of Materials Processing Technology* v.178 (2006) 388-394.

[24] Sellars, C.M., Tegart, W.J. *Mem. Sci. Rev. Metall.*, v.63 (1966) p. 731-740.

[25] Cutrim, R.M. *Influência das Condições de Deformação na Recristalização Dinâmica do Aço Médio Carbono 38MnSiVS5 Microligado ao Vanádio*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2009.

[26] Maccagno, T.M.; Jonas, J.J e Hodgson, P.D. Spreadsheet Modelling of Grain Size Evolution during Rod Rolling, *ISIJ International*, v.36, No. 6 (1996) p. 720-728.

[27] Yada, H. Proc. Int. Symp. on Accelerated Cooling of Rolled Steel, Ed. G.E. Ruddle e Crawley, A.F. Pergamon (1988) p. 105.

[28] DeArdo, A. J. Modern Processing of Microalloyed Steel: A Physical Metallurgy Perspective, Microalloying “95 Conference Proceedings”, p. 15-33.

[29] Grass, H.; Kremaszky, C.; Reip, T. e Werner E. 3-D Simulation of hot forming and microstructure evolution, Computational Materials Science, v. 28 (2003) p. 469–477.

[30] Hartley, P. e Pillinger, I. Numerical simulation of the forging process, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., v.195 (2006) p. 6676–6690.

[31] Kobayashi, S.; OH, S.; Altan, T. Metal Forming and Finite-Element Method, New York: Oxford University Press, 1989.

[32] SFTC (Scientific Forming Technologies Corporation) DEFORM™3D User's Manual, Columbus, 2007.

[33] Frota Jr., R.T.C., Avaliação de Parâmetros de Processo de Forjamento a Quente em Matriz Aberta pelo Método de Elementos Finitos. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009.