

# ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO NA LAMINAÇÃO A QUENTE DE BARRAS DE AÇO MÉDIO CARBONO MICROLIGADO AO VANÁDIO- 38MnSiV5<sup>1</sup>

Valdir Anderson Silvério<sup>2</sup>  
Ronald Lesley Plaut<sup>3</sup>  
Luiz Roberto Moura Valle<sup>4</sup>

## Resumo

Os aços microligados ao vanádio são usados em peças automotivas forjadas, tais como virabrequins e bielas. Através de equações matemáticas que descrevem a cinética de recristalização e de crescimento de grão, foi desenvolvida uma rotina em planilha para simular a evolução dos tamanhos de grão austeníticos durante os passes de laminação em função da temperatura, taxa de deformação, tempo entre passes e características do material. O resultado do tamanho de grão ferrítico calculado final, foi comparado com amostras retiradas do processo de laminação a quente. Esta comparação entre modelamento matemático e o processo, demonstra que é possível descrever a evolução microestrutural e mostra que o principal mecanismo de controle do refino de grão envolvido em uma laminação de não planos com trens abertos é o de recristalização estática, para as condições existentes na usina onde foi efetuado o presente estudo.

**Palavras-chave:** Tamanho de grão; Aço microligado ao vanádio; Laminação.

## GRAIN SIZE PREDICTION OF A HOT ROLLED VANADIUM MICROALLOYED STEEL

### Abstract

Microalloyed steels are used as forging stock for many automotive parts such as crankshafts and connecting rods. Using mathematical equations describing the recrystallization kinetics and grain growth, a spreadsheet has been developed to simulate the austenitic grain size evolution during bar rolling mill schedules as a function of temperature, strain rate and time between passes. The calculated ferritic grain size was compared with samples taken from the process. Comparison between mathematical modeling with the bar rolling mill process, shows that it is possible to predict the microstructural evolution and confirm the main grain refinement control mechanism as being static recrystallization, under the conditions prevailing in the plant where this study has been carried out.

**Key words:** Grain size; Vanadium microalloyed steel; Bar rolling.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, Mestrando em Engenharia Metalúrgica Poli-USP- Gerdau Aços Especiais Brasil - SP*

<sup>3</sup> *Professor Doutor –Depto Engenharia Metalúrgica e Materiais- Escola Politécnica– USP - São Paulo*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalurgista, Supervisor de Desenvolvimento- Gerdau Aços Especiais Brasil - SP*

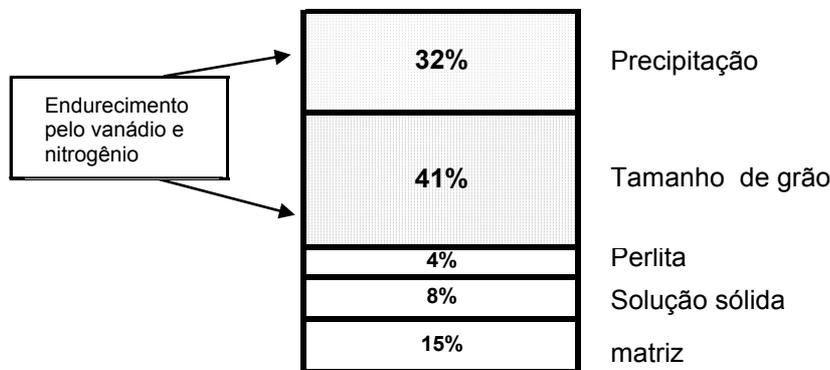
# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo, analisar o comportamento dos parâmetros de processo na evolução do tamanho de grão na laminação a quente de barras de aço médio carbono microligado ao Vanádio(38MnSiV5), através do modelamento matemático com equações da literatura técnica, comparando com amostras retiradas do processo de laminação.

A importância de se controlar o tamanho de grão em um aço, está no fato deste influenciar significativamente as propriedades mecânicas e resposta ao tratamento térmico dos aços.<sup>(1)</sup>

## 1.1 Revisão da Literatura

O papel dos microligantes é de contribuir com dois mecanismos de endurecimento: Refino de grão e endurecimento por precipitação. A Figura 1 mostra a participação dos mecanismos de endurecimento de um aço microligado.<sup>(2)</sup>

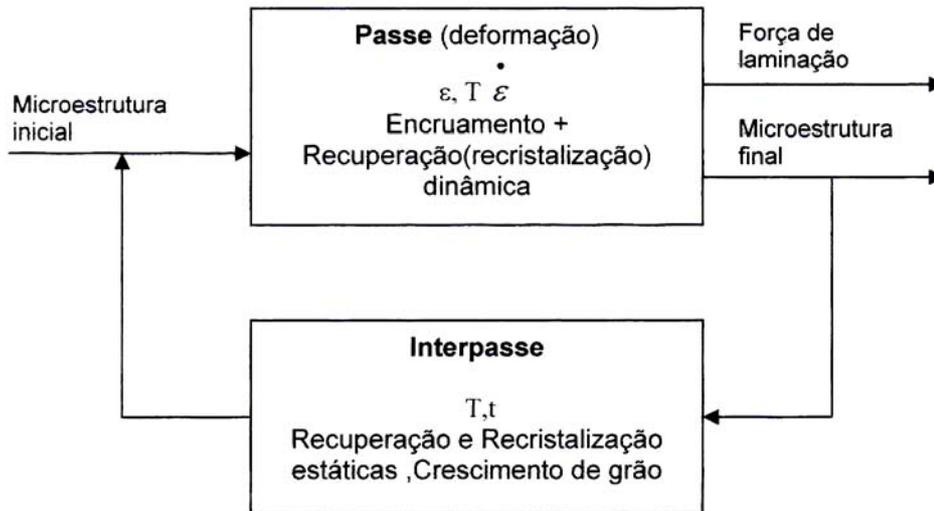


**Figura 1.** Influência do refino de grão e a precipitação no aumento da resistência mecânica dos aços microligados ao vanádio.<sup>(2)</sup>

No início da laminação a quente, todo microligante está em solução sólida na austenita. O mecanismo de refino de grão nos aços ocorre por precipitação de finas partículas de carbonitretos que interagem com os contornos de grãos, à medida que cai a temperatura de laminação.<sup>(3,4)</sup>

### 1.1.1 Modelo para a evolução microestrutural durante a recristalização a quente

As principais vantagens do modelamento matemático na indústria são:<sup>(5)</sup> redução de número de experiências na produção; avaliação de modificação de equipamentos, previsão de variáveis que não podem ser medidas e avaliação de sinergismo entre parâmetros, controle baseado em um modelo matemático e Pesquisa de baixo custo. Os princípios e parâmetros de suas principais variáveis são mostrados na Figura 2:



**Figura 2.** Parâmetros principais do modelamento matemático e processamento mecânico a quente.<sup>(5)</sup>

### 1.1.2 Cinética da recristalização estática e crescimento de grão

A dependência da fração recristalizada ( $X$ ) no tempo de ( $t$ ) durante a recristalização segue a lei de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK) que para o aço deste trabalho tem a forma da equação(1):

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

Onde  $n$  é constante e para aços microligados o valor de  $n=1,7$  será adotado.

Roberts et al.<sup>(6)</sup> sugere a seguinte equação para tempo de 50% de recristalização ( $t_{0,5}$ ) para um aço Ti-V .equação(2)

$$t_{0,5} = 5.10^{-18} (\varepsilon - 0,058)^{-3,5} D_0^2 \exp\left(\frac{280000}{RT}\right) \quad (2)$$

Onde  $D_0$  está em  $\mu\text{m}$  e  $R = 8,134 \text{ J(K.mol)}$

Para Aços Ti-V, o estudo experimental da influência de  $D_0$ ,  $\varepsilon$  e  $T$  para o tamanho de grão recristalizado leva a seguinte relação<sup>(6)</sup>: equação(3)

$$D_{rec} = 4,3 + 195,7.D_0^{0,15} .\varepsilon^{-0,57} \left[ \exp\left(\frac{350000}{RT}\right) \right]^{-0,11} \quad (3)$$

Uma descrição correta do crescimento de grão austenítico, é um ingrediente essencial para um modelo realista de evolução microestrutural. Para aços microligados ao Ti-V, a taxa de crescimento de grão após o término da recristalização estática foi observada ser muito lenta, como esperado. Roberts et al.<sup>(6)</sup> sugeriu uma equação (4) para o crescimento:

$$D^2 = D_{rec}^2 + K_1 t \quad (4)$$

Onde,  $k_1$  em  $\mu\text{m.s}^{-1}$  e  $T$  em graus Kelvin.

O tempo necessário para a recristalização completa ( $X > 0,9$ ) entre dois passes é avaliado pelas equações 1 e 2 juntamente com os tamanhos de grão recristalizados correspondentes [equação (3)]. Assim, o crescimento de tamanho de grão é avaliado no final de cada recristalização sendo computado no próximo passe pela equação(4). Desta forma, o tamanho de grão é calculado e tomado como  $D_0$  para o passe subsequente, e este procedimento passa por um *loop (recálculo)* de N-1 vezes.

O tamanho de grão austenítico em  $Ar_3$ , o qual é calculado pela planilha de evolução microestrutural, pode ser usada para determinar o tamanho de grão ferrítico correspondente. Para os aços ao Ti-V a expressão empírica<sup>(6)</sup> utilizada é:

$$D_\alpha = 3,75 + 0,18D_\gamma + 1,4\left(\frac{dT}{dt}\right)^{-1/2} \quad (5)$$

Onde  $dT/dt$  é taxa de resfriamento médio.

## 2 MATERIAIS E METODOS

No processo de laminação são realizados passes que podem ser do tipo caixa(box) ou diamante no laminador trio de desbaste e passes tipo oval, falso-redondo e redondo sucessivos nas cadeiras de laminação de acabamento formadas por duas cadeiras duo e duas cadeiras trio . Abaixo o fluxograma de processo (Figura 3).



Fonte: Gerdau

Figura 3. Fluxograma de laminação de tarugos.

Para a laminação de uma barra redonda de aproximadamente 71 mm de diâmetro, são realizados em um laminador de desbaste trio de 5 a 7 passes ( tipo diamante ou caixa) e mais 6 passes variando entre ovais, falsos-redondos e redondos em cadeiras de laminação de acabamento, formadas por trios e duos (Figura 4).

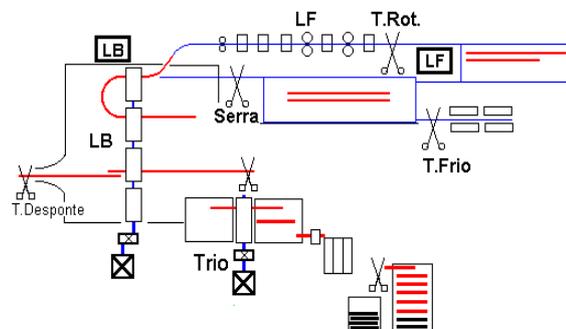


Figura 4. Lay-out do laminador trio no primeiro passe de desbaste (Trio) e Passes 6 e 11 nas cadeiras acabadoras trio-duo-duo-trio (LB).

O material utilizado para a realização deste trabalho foi um aço microligado ao vanádio - 38MnSiV5, cuja composição química encontra-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço utilizado (%em peso).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	V	N
0,37	0,59	1,39	0,13	0,10	0,02	0,016	0,004	0,09	0,0141

Fonte: Gerdau.

A coleta de amostras no processo de laminação é uma etapa que é limitada pelo lay-out dos laminadores e pontos disponíveis para o uso do oxicorte no leito. Para o estudo foram coletadas amostras em três etapas conforme Quadro 1.

**Quadro 1.** Esquema de amostragem.

	Amostragem 1	Amostragem 2	Amostragem 3
<b>Etapa</b>	Saída do forno	Saída do desbaste	Saída acabamento
<b>Passe</b>	-	5°	11°
<b>Bitola</b>	185 x 185 mm	123 x 133 mm	Ø 71 mm
<b>Comprimento</b>	150mm	150mm	150mm
<b>Quantidade</b>	6	6	6

Fonte: Gerdau

Os parâmetros de processo coletados foram: Diâmetro de trabalho do cilindro, Temperatura Rotação do cilindro e Tempo de interpasse.

Utilizando uma planilha de cálculos (Excel), inseriu-se os dados coletados experimentalmente na laminação para acompanhar a evolução do tamanho de grão austenítico conforme Tabela 2.

Para cada passe a planilha calcula sucessivamente o tempo para 50% de recristalização  $t_{0,5}$  equação(2), tempo para completar a recristalização  $t_{0,95}$ , fração recristalizada X equação(1), tamanho de grão recristalizado  $D_{rec}$  equação(3), tempo de crescimento de grão (diferença entre tempo de interpasse e  $t_{0,95}$ ), tamanho de grão após o crescimento equação(4) e tamanho de grão ferrítico equação(5).

Para se observar a microestrutura das amostras retiradas na laminação, procedeu-se da seguinte forma: utilizando-se um microscópio ótico Olympus PME3 com captura de imagens DP12, as amostras foram cortadas ao meio (perpendicular) e foram embutidas, lixadas e polidas com alumina (1  $\mu\text{m}$  a 0,3  $\mu\text{m}$ ) e atacadas com um reagente de Nital (5%) durante 30 s.

A determinação do diâmetro médio dos grãos foi realizada na superfície do corpo de prova, de acordo com a norma ASTM E112 – método do intercepto linear (Heyn), visto que a deformação máxima de um ensaio de torção se dá nesta posição.

### 3 RESULTADOS

Utilizando-se a planilha de cálculos da Tabela 2 para a evolução do tamanho de grão austenítico e predição do ferrítico, consideraram-se os dados de tamanho de grão inicial de 400  $\mu\text{m}$  e área inicial de tarugo de 34.225  $\text{mm}^2$ . Assim, obteve-se através das equações pertinentes aos 11 passes, o tamanho de grão austenítico após o crescimento calculado final de 18,95  $\mu\text{m}$  e o tamanho de grão ferrítico calculado de 11,4  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 2.** Planilha de cálculos (Excel).

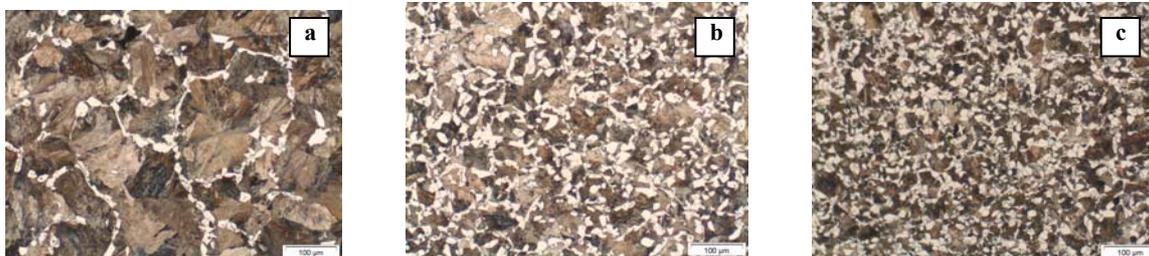
	LAMINAÇÃO DE DESBASTE					LAMINAÇÃO DE ACABAMENTO						
	TRIO					DUO	TRIO		TRIO		DUO	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Passes	431,8	431,8	454,8	457,8	474,8	438,5	424,3	461,9	445,3	474,9	438,6	
Diâmetro de trabalho do cilindro (mm)	8,6	10,5	17,7	14,1	16,9	24,7	13,5	23,4	21,2	22,5	20,9	
Redução (%)	31274	28000	23052	19802	16457	12393	10716	8212	6471	5017	3970	
A - Área de saída (mm <sup>2</sup> )	0,10	0,16	0,37	0,17	0,21	0,33	0,17	0,31	0,27	0,29	0,27	
s - Deformação	1106	1097	1090	1084	1079	1072	1059	1036	1015	1003	880	
Temperatura de saída (°C)	400	400	400	400	400	600	600	600	600	600	600	
n - Rotação (rpm)	1,05	0,86	0,54	0,68	0,59	0,56	0,99	0,62	0,66	0,66	0,66	
Vp - Velocidade Periférica (m/s)	1,47	1,77	1,67	1,45	1,12	2,62	1,88	2,03	1,90	2,37	2,23	
ε - Taxa de deformação (s <sup>-1</sup> )	15	18	16	15	13	43	17	21	20	25	30	
Tempo médio entre passes (s)	Z - Parâmetro Zener- Holloman (s <sup>-1</sup> )	8,3084E+11	1,2004E+12	1,3000E+12	1,2761E+12	1,0870E+12	2,9409E+12	2,7656E+12	4,8818E+12	7,2829E+12	1,1930E+13	2,5430E+14
t 0,5 - tempo para 50% de recristalização		3,40	0,03	0,40	0,27	0,04	1,00	0,11	0,16	0,14	3,30	
t 0,95 - tempo para 90% de recristalização		7,15	0,06	0,83	0,56	0,08	2,11	0,23	0,34	0,30	6,93	
t 0,05 - tempo para 5% de recristalização		0,919	0,007	0,107	0,072	0,010	0,271	0,029	0,044	0,039	0,890	
X - Fração recristalizada		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
D <sub>rec</sub> - Tam. grão austenítico recristalizado (µm)	65,10	40,02	24,24	32,38	30,18	24,02	31,27	23,00	22,25	20,93	16,04	
Tempo crescimento grão austenítico (s)	15,00	10,85	15,94	14,17	12,44	42,92	14,89	20,77	19,66	24,70	23,07	
Fator k para crescim. Grão austenítico	8,20	7,96	7,78	7,62	7,49	7,32	7,00	6,45	5,97	5,70	3,40	
D <sub>cg</sub> <sup>2</sup> - Tam.grão austenítico após crescimento(µm)	66,03	41,78	26,69	34,10	31,76	29,86	33,12	25,77	24,79	24,10	18,95	
D <sub>α</sub> - Tam.grão ferrítico-Roberts(µm)						13,01					11,04	
Tipo de estrutura	REC	REC	REC	REC	REC	REC	REC	REC	REC	REC	REC	

**Tabela 3.** Tamanhos de grãos ferrítico-perlíticos (µm).

	Tarugo	Barra	Barra final 71 mm
Passes	-	5°	11°
Tamanho de grão (µm)	400	20	14
Desvio padrão(µm)	± 20	± 2	± 1
Figura	5a	5b	5c

Fonte: Gerdau

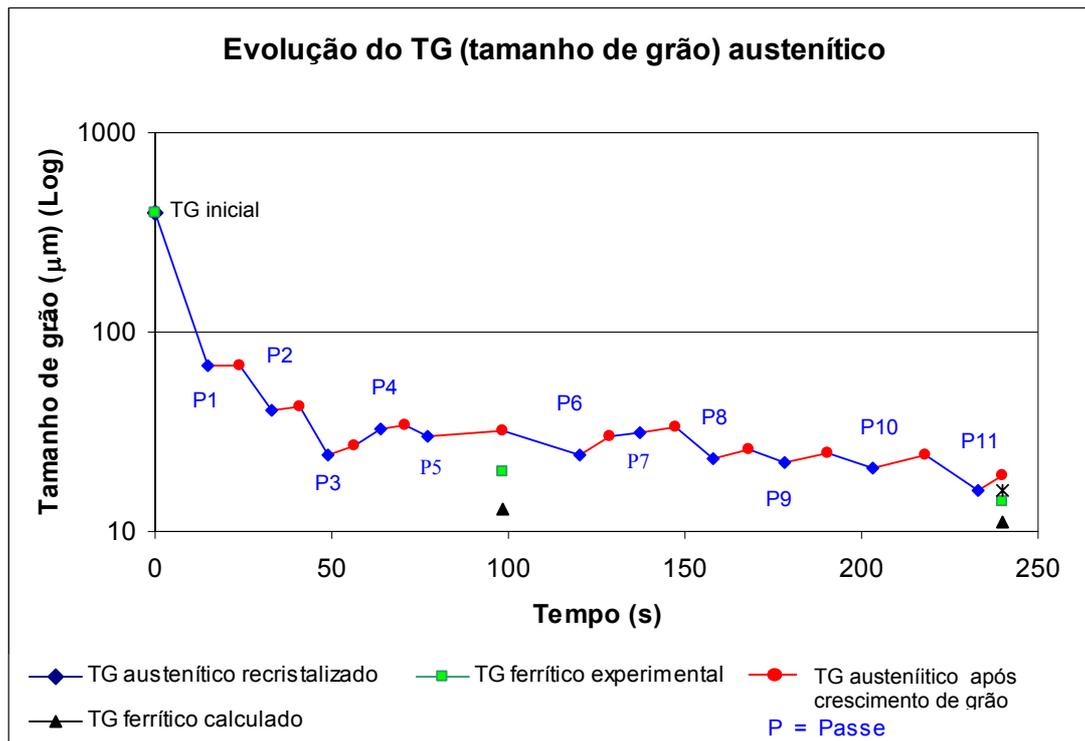
Na Tabela 3 são apresentados os tamanhos de grão e as respectivas microestruturas da Figura 5.



**Figura 5.** Grãos médios do tarugo (400µm), barra(20µm) e barra final (20µm). Ataque : Nital 5%

## 4 DISCUSSÃO

Na Figura 6 estão colocados no mesmo gráfico, a evolução do tamanho de grão austenítico recristalizado, tamanho de grão após crescimento, e tamanho de grão ferrítico previstos através do modelo matemático de Roberts et al.<sup>(6)</sup> para o aço microligado ao vanádio e os valores experimentais provenientes da laminação.



Fonte : Gráfico gerado pela planilha de cálculos em excel.

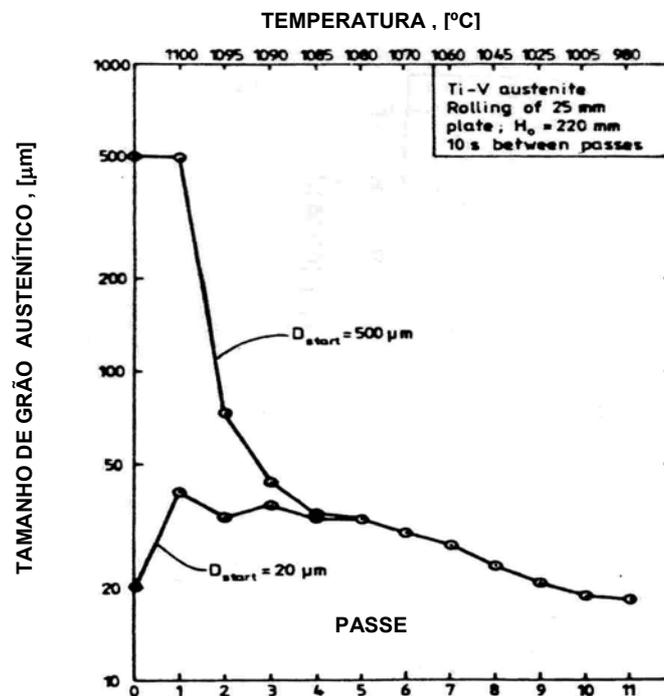
**Figura 6.** Gráfico logarítmico da evolução dos tamanhos de grãos.

As evoluções do tamanho dos grãos em função do tempo, resultantes das equações de Roberts et al.<sup>(6)</sup>, indicam que inicialmente se tem uma grande redução nos tamanhos dos grãos austeníticos. Partindo-se inicialmente de grãos com tamanho médio de 400  $\mu\text{m}$ , estes são reduzidos a 65  $\mu\text{m}$  para uma taxa de deformação de  $1,47\text{s}^{-1}$ . Nos passes subseqüentes, a redução é menor comparando-se com o primeiro passe, mesmo para taxas de deformação superiores a taxa empregada no primeiro passe. São necessários mais 10 passes nas condições e parâmetros atuais para reduzir o grão austenítico de 65  $\mu\text{m}$  para 18  $\mu\text{m}$ . O crescimento de grão após a recristalização estática, indica mais uma barreira para o refino dos grãos. Em todos os passes, temos a recristalização estática seguida por crescimento de grão, porém os pontos entre os passes 3 e 4 e entre os passes 6 e 7, indicam um tamanho de grão recristalizado maior que o tamanho de grão crescido. Após simulações na planilha, verifica-se que este tamanho de grão maior é oriundo de baixas deformações nos passes 4 e 7.

As evoluções do tamanho dos grãos em função do tempo, resultantes das equações, indicam que inicialmente se tem uma grande redução nos tamanhos dos grãos austeníticos. De fato, partindo-se inicialmente de grãos com tamanho médio de 400 $\mu\text{m}$ , estes são reduzidos a 65 $\mu\text{m}$  para uma taxa de deformação de  $1,47\text{s}^{-1}$ . Nos passes subseqüentes, a redução é menor comparando-se com o primeiro passe, mesmo para taxas de deformação superiores a taxa empregada no primeiro passe. São necessários mais 10 passes nas condições e parâmetros atuais (parâmetros coletados no processo) para reduzir o grão austenítico de 65 para 18  $\mu\text{m}$ . O crescimento de grão após a recristalização estática, indica mais uma barreira para o refino dos grãos.

Em todos os passes, temos a recristalização estática seguida por crescimento de grão, porém os pontos entre os passes 3 e 4 e entre os passes 6 e 7, indicam um tamanho de grão recristalizado maior que o tamanho de grão crescido. No Quadro 3,

nota-se um aumento atípico dos tamanhos de grãos recristalizados no passe 4 (32,84 $\mu\text{m}$ ) e no passe 7 (31,02  $\mu\text{m}$ ) em relação aos tamanhos de grãos após o crescimento de grão no passe 3 (26,69  $\mu\text{m}$ ) e no passe 6 (29,86  $\mu\text{m}$ ) respectivamente. Simulando na planilha de cálculos um aumento de deformação ( $\epsilon$ ) nos passes 4 e 7, para um valor igual ao passe anterior (0,37 e 0,33 respectivamente), tem-se o aumento da taxa de deformação( $\dot{\epsilon}$ ) com a queda do tempo de recristalização para 50%( $t_{0,5}$ ) e um conseqüente refino dos grãos recristalizados. Isto é realizado sem alterar o tamanho de grão final e mostra que anomalia detectada nos passes de laminação é em função da baixa deformação. Na Figura 7 temos um modelo de evolução estrutural de um aço microligado que demonstra uma grande redução do tamanho de grão no primeiro passe. Nota-se, que quando o tamanho de grão inicial é pequeno, ocorre um aumento do tamanho de grão no segundo passe, porém sem alterar o tamanho de grão austenítico final.



**Figura 7.** Evolução do tamanho de grão austenítico para diferentes tamanhos de grãos iniciais.<sup>(6)</sup>

Simulando-se na planilha de cálculos, valores de tamanhos de grãos iniciais entre 20 e 500  $\mu\text{m}$ , confirmou-se matematicamente que o tamanho de grão ferrítico final não foi afetado.

## 5 CONCLUSÃO

- a) A evolução microestrutural do tamanho de grão austenítico/ferrítico nos aços Ti-V pode ser descrita através de um modelo matemático, no presente trabalho o modelo de Roberts et al<sup>6</sup>, visto que a aproximação do tamanho de grão calculado(11 $\mu$ m) com o tamanho de grão ferrítico experimental laminado (14 $\mu$ m) para uma velocidade de esfriamento de 0,13 °C/s é considerada aceitável para a aplicação do material.
- b) Conforme encontrado em literatura e comprovado através do modelamento matemático, o tamanho de grão austenítico inicial após o aquecimento do tarugo não tem efeito significativo sobre o tamanho de grão ferrítico final.
- c) As sucessivas (e pequenas) deformações e taxas de deformação nos interpasses em conjunto com a elevada temperatura de acabamento não propiciam o refinamento de grão austenítico/ ferrítico. A baixa velocidade de esfriamento (ao ar) propicia a continuidade do crescimento de grão ferrítico.
- d) A seqüência de deformações imposta foi realizada na região de encruamento e recuperação dinâmica, sem ocorrer o início da recristalização dinâmica.

## Agradecimentos

À empresa Gerdau Aços Especiais Brasil.

Ao meu orientador Prof Dr. Ronald Lesley Plaut da Poli-USP.

Agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 GLADMAN,T;PICKERING,F.B. Grain Coarsening of austenite. Journal of the Iron and Steel Institute. June 1967, p.653
- 2 KORCHYNSKY,M. Advanced Metallic structural materials and a new role for microalloyed steels. Materials Science Forum, 2005 Vols 500-501, pag 471-479 Transtech publications, Switzerland
- 3 BENGOCHEA,R.; LÓPEZ B. ; GUTIERREZ I. Effect of retained strain on the microstructural evolution during the austenite to ferrite transformation. Materials Science Forum, 1998 Vols 284-286, pag 201, Transtech publications, Switzerland
- 4 Prado,E.L. Produtos não planos de aço. Aplicações e especificações In : CURSO LAMINAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE PRODUTOS NÃO PLANOS DE AÇO, 2006, São Paulo: ABM. p. 2 a 15.
- 5 SICILIANO JUNIOR, F. Recuperação e recristalização durante a deformação a quente. II Workshop sobre textura e relações de orientação: Deformação Plástica, Recristalização e crescimento de grão. São Paulo, 2003. p.144-147
- 6 ROBERTS,W. et al. Prediction of microstructure development during recrystallization hot rolling of Ti-V steels. HSLA Steels, Technology and Applications; Philadelphia, Pa ; U.S.A ; 3-6 Oct. 1983. p. 67-84.