

# SIMULAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO DA LAMINAÇÃO A QUENTE DE UM AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO POR TORÇÃO A QUENTE <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 realizadas por simulação física (ensaio de torção a quente). Esta comparação entre modelamento matemático e simulação física, 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; Ensaio de torção.

## GRAIN SIZE PREDICTION OF A HOT ROLLED VANADIUM MICROALLOYED STEEL DETERMINED BY HOT TORSION TESTS

### 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 tested by physical simulation (hot torsion test). Comparison between mathematical modeling and physical simulation 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; Hot torsion test.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc. em Engenharia Metalúrgica - Engenheiro dos Laboratórios da Aços Villares S/A – Usinas Pindamonhangaba e Mogi das Cruzes/SP

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

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento da Aços Villares S/A – Usinas Pindamonhangaba e Mogi das Cruzes/SP

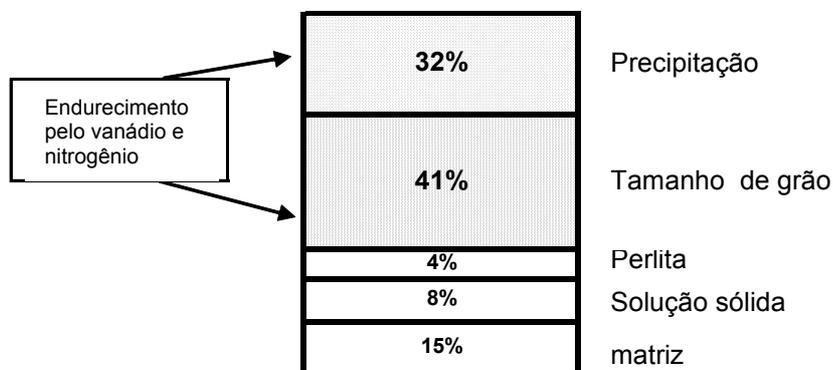
# 1 INTRODUÇÃO

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 (38MnSiV6), através do modelamento matemático com equações da literatura técnica, comparando com dados experimentais de simulação física.

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>

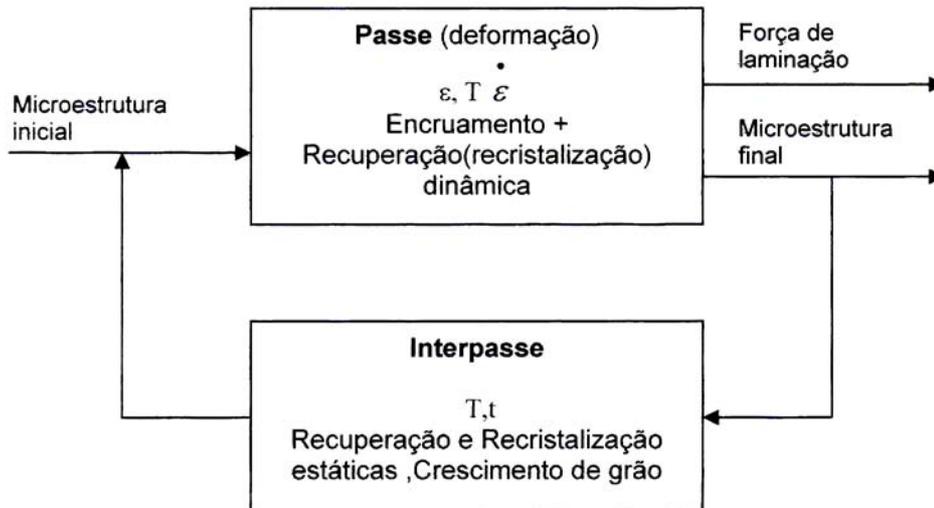


**Figura 1.** Influência do refino de grão e a precipitação no aumento da resistência mecânica dos aços microligados ao vanádio.<sup>(2)</sup>

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.

### 1.1.3 Simulação física do processamento metalúrgico

Para simular as condições experimentais de laminação, são utilizados ensaios de deformação a quente.<sup>(7)</sup> De uma forma geral, a evolução da microestrutura durante o processamento a quente, depende das condições de deformação, as quais podem ser descritas pela:

- Temperatura de deformação ou, para uma seqüência de passes, pela evolução da temperatura com o tempo;
- Taxa de deformação;
- Quantidade de deformação imposta, que para uma seqüência de passes é determinada pelos níveis das deformações sucessivas e pelos tempos de espera entre passes.

A impossibilidade, e muitas vezes a inconveniência, de se reproduzir fielmente em laboratório um processo de fabricação, levou ao estabelecimento da prática da simulação física. Nesta prática, utilizam-se corpos de prova de dimensões reduzidas, sobre os quais se impõem ciclos térmicos, mecânicos ou termomecânicos, que procuram reproduzir fielmente os parâmetros de processamento. O equipamento onde se realiza a simulação deve ser capaz de variar esses parâmetros, de modo a abranger uma larga faixa de valores. Um aspecto importante da simulação é o registro simultâneo da resposta do material e a associação desse comportamento aos parâmetros impostos. Também, a microestrutura do material deve ser examinada após a simulação.

## 2 MATERIAIS E METODOS

O material utilizado para a realização deste trabalho foi o aço microligado ao vanádio 38MnSiV5, cuja composição química encontra-se no Quadro 1.

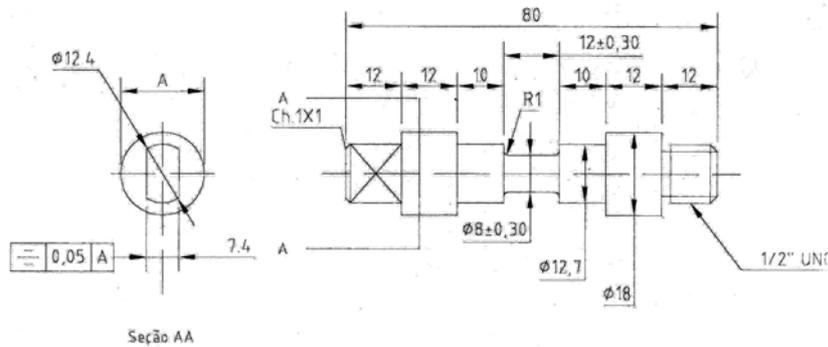
**Quadro 1.** Composição química do aço utilizado (%em peso).

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: Aços Villares.

Durante a laminação, foram coletados os parâmetros para inserir na planilha: diâmetro de trabalho do cilindro, temperatura, rotação do cilindro e tempo de interpasse. A simulação física foi realizada em uma máquina de torção a quente horizontal com um servo motor elétrico de 6 KVA. As amostras são aquecidas por um forno de radiação infravermelho de 6 KW acoplado à máquina. A deformação e a taxa de deformação são calculadas a partir de medidas do ângulo de rotação

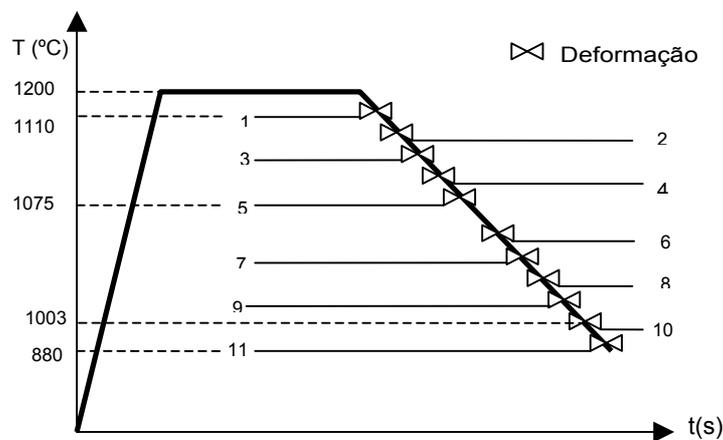
através de um transdutor de rotação e a aquisição de dados é realizada por um computador interligado. A Figura 3 mostra a geometria dos corpos de prova utilizados. A parte central, região útil, de menor diâmetro, consiste na região de deformação.



Fonte: Laboratório Termomec da UFSCar.

**Figura 3.** Desenho do corpo de prova utilizado para o ensaio de torção.

De acordo com o esquema da figura 4 e o relatório da máquina mostrado na Figura 5, foi realizado um ensaio com patamar de aquecimento de 1.200°C durante 600 s para austenitizar o material e realizadas 11 torções e resfriado ao ar calmo conforme parâmetros da laminação.



**Figura 4.** Esquema do ensaio realizado.

Diâmetro Externo do Corpo de prova (mm):	8.05					
Comprimento do Corpo de prova (mm):	12.15					
Material do Corpo de prova:	38MnSiV5					
Identificação do Corpo de prova:	4N					
Tipo do Forno:	Infravermelho					
Tipo de Sonda:	Termopar tipo K					
Tempo de espera até a Têmpera (s):	0					
Tempo de Têmpera (s):	0					
Disparo do Digitalizador:	Encoder					
Planilha do Ensaio:						
Tipo	Temperatura Inicial oC	Temperatura Final oC	Tempo s	Taxa Aquec./Resfr. oC/min	Deformação %	Taxa Deformação 1/s
Rampa	1200.0	1200.0	X	120.0	X	X
Patamar	1200.0	1200.0	600.0	X	X	X
Rampa	1200.0	1110.0	X	60.0	X	X
Patamar	1110.0	1110.0	2.0	X	X	X
Rampa	1110.0	1075.0	X	20.3	X	X
Ensaio	1110.0	X	3.0	X	10.00	1.47
Ensaio	1110.0	X	18.0	X	16.00	1.77
Ensaio	1110.0	X	16.0	X	37.00	1.67
Ensaio	1110.0	X	15.0	X	17.00	1.45
Ensaio	1110.0	X	13.0	X	21.00	1.12
Patamar	1075.0	1075.0	43.0	X	X	X
Rampa	1075.0	1003.0	X	50.0	X	X
Ensaio	1075.0	X	2.0	X	33.00	2.62
Ensaio	1075.0	X	17.0	X	17.00	1.88
Ensaio	1075.0	X	21.0	X	31.00	2.03
Ensaio	1075.0	X	20.0	X	27.00	1.90
Ensaio	1075.0	X	25.0	X	29.00	2.37
Patamar	1003.0	1003.0	2.0	X	X	X
Rampa	1003.0	870.0	X	240.0	X	X
Patamar	870.0	870.0	5.0	X	X	X
Ensaio	870.0	X	2.0	X	27.00	2.23

Fonte: Relatório gerado em ensaio no laboratório Termomec da UFSCar.

**Figura 5.** Relatório do programa de ensaio de torção a quente.

Utilizando uma planilha de cálculos, inseriram-se os dados coletados experimentalmente na laminação para acompanhar a evolução do tamanho de grão austenítico conforme Quadro 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 do ensaio de torção, 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.<sup>(8)</sup>

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.

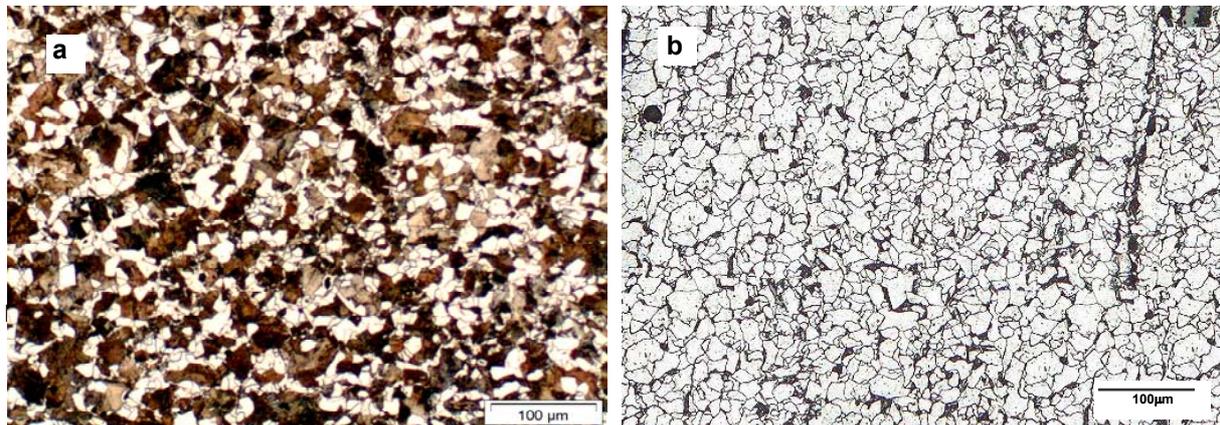
### 3 RESULTADOS

Utilizando-se a planilha de cálculos do quadro 2 para a evolução do tamanho de grão austenítico e predição do ferrítico, considerou-se os dados de tamanho de grão inicial de 400 $\mu\text{m}$  e área inicial de tarugo de 34225mm<sup>2</sup>. Assim, se obteve 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  $\mu\text{m}$ .

**Quadro 2.** Planilha de cálculos.

	LAMINAÇÃO DE DESBASTE					LAMINAÇÃO DE ACABAMENTO					
	TRIO					DUO	TRIO		TRIO		DUO
Passo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Diâmetro de trabalho do cilindro (mm)	431,8	431,8	454,8	457,8	474,8	438,5	424,3	461,9	445,3	474,9	438,6
Redução (%)	8,6	10,5	17,7	14,1	16,9	24,7	13,5	23,4	21,2	22,5	20,9
A - Área de saída (mm <sup>2</sup> )	31274	28000	23052	19802	16457	12393	10716	8212	6471	5017	3970
$\epsilon$ - Deformação	0,10	0,16	0,37	0,17	0,21	0,33	0,17	0,31	0,27	0,29	0,27
Temperatura de saída (°C)	1106	1097	1090	1084	1079	1072	1059	1036	1015	1003	880
n - Rotação (rpm)	400	400	400	400	400	600	600	600	600	600	600
Vp - Velocidade Periférica (m/s)	1,05	0,86	0,54	0,68	0,59	0,56	0,99	0,62	0,66	0,66	0,66
$\dot{\epsilon}$ - Taxa de deformação (s <sup>-1</sup> )	1,47	1,77	1,67	1,45	1,12	2,62	1,88	2,03	1,90	2,37	2,23
Tempo médio entre passes (s)	15	18	16	15	13	43	17	21	20	25	30
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 <sub>0,5</sub> - 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 <sub>0,95</sub> - 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 <sub>0,05</sub> - 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>gr</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

Na Figura 6a temos os Grãos “ferríticos–perlíticos” do corpo de prova de ensaio de torção após 11 deformações e resfriadas ao ar com o tamanho de grão médio de 16 µm +/- 1. Na Figura 6b temos os grãos da amostra temperada após 11 deformações do ensaio de torção com o tamanho de grão médio de 14µm+/- 1.

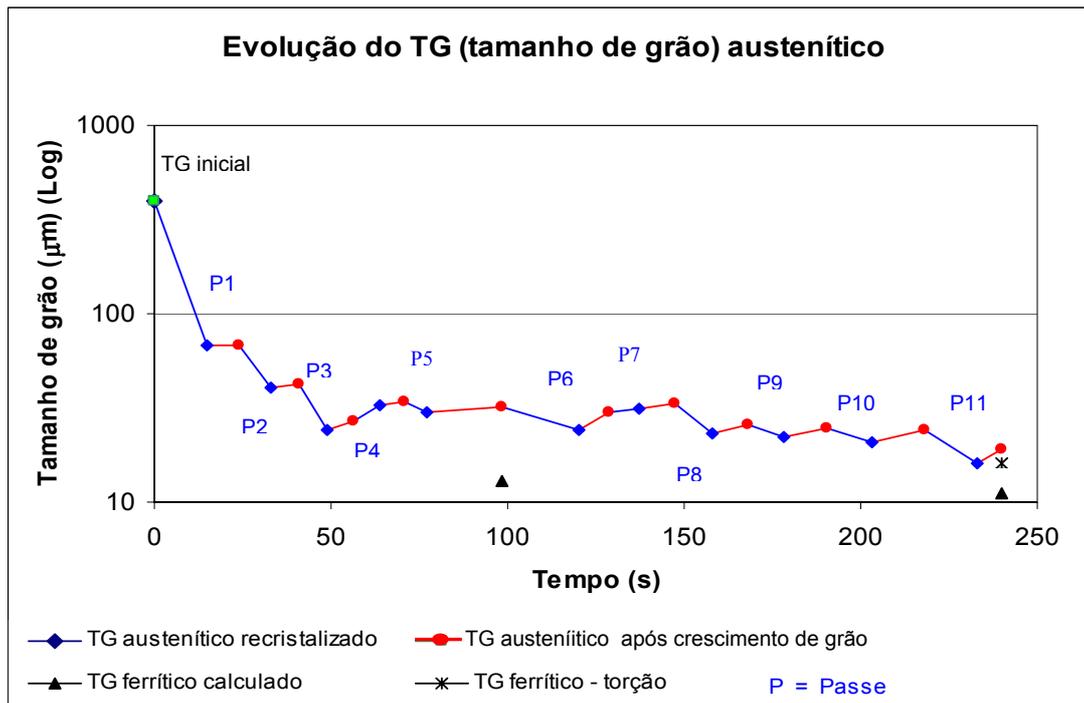


**Figura 6.** a) Amostra resfriada ao ar calmo. Ataque: Nital 5%. b) Amostra temperada. Ataque: Picral.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Evolução do Tamanho de Grão

Na Figura 7 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 do ensaio de torção.



Fonte : Gráfico gerado pela planilha de cálculos em excel.

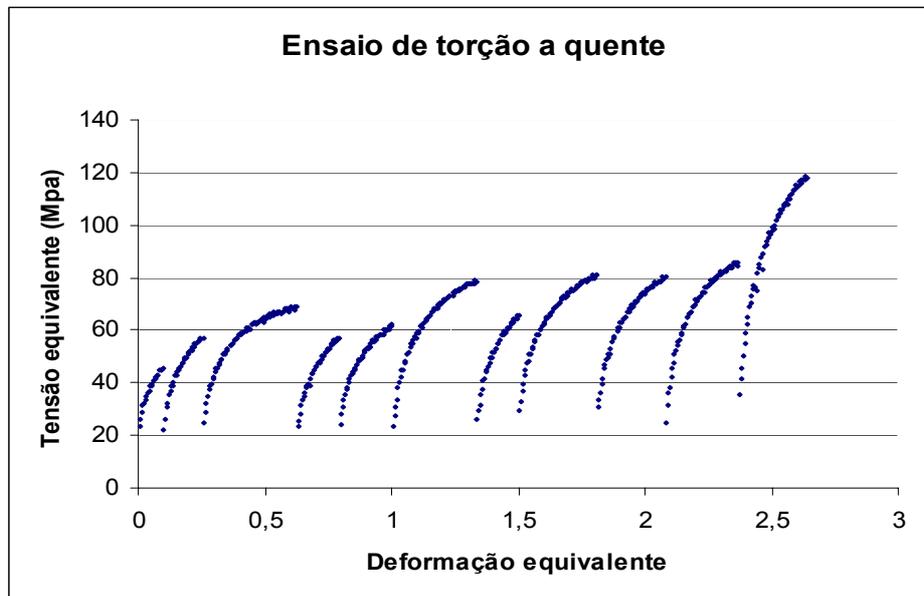
**Figura 7.** Gráfico logarítmico da evolução dos tamanhos de grãos.

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 µm, estes são reduzidos a 65 µm para uma taxa de deformação de  $1,47s^{-1}$ . 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 µm para 18 µm. 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.

#### 4.2 Curva de Escoamento Plástico – Ensaio de Torção

A Figura 8 mostra as curvas de escoamento plástico obtidas no ensaio de torção, onde se observa que em todos os passes a tensão aumenta continuamente com a deformação, indicando a predominância do encruamento durante a deformação. A tensão no recarregamento é significativamente menor do que a tensão de descarregamento do passe anterior, indicando o amaciamento estático do material nos intervalos de passes. Pode-se confirmar esta hipótese analisando a evolução da taxa de encruamento em função da tensão aplicada nas curvas. Quando a deformação atinge o valor crítico para o início da recristalização dinâmica, a taxa de encruamento cai abruptamente, tornando-se zero no pico de tensões.<sup>(8)</sup> Não ocorrendo a recristalização dinâmica, o material termina cada etapa do material

encruado, podendo restaurar estaticamente no intervalo entre passes, inicialmente com a recuperação, e posteriormente com a incubação a recristalização estática.



Fonte: Gráfico gerado pelo ensaio de torção em excel.

**Figura 8.** Curvas de tensão versus deformação equivalentes.

## 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 ( $11,4 \mu\text{m}$ ) com o tamanho de grão obtido pelo ensaio de torção ( $14\mu\text{m}$ ) para uma velocidade de esfriamento de  $0,13 \text{ }^\circ\text{C/s}$  é considerada aceitável para a aplicação do material;
- b) Foi verificada a recristalização estática em todos os passes seguidos por crescimento de grãos. Esta recristalização estática foi responsável pelo controle dos refinamentos de grãos;
- c) O uso em conjunto de técnicas de simulação física com modelagem matemática, permitiu prever um tamanho de grão final ferrítico aproximado e aceitável para as condições existentes do presente estudo.

## Agradecimentos

À empresa Aços Villares, especialmente aos departamentos: TCM, Pesquisa e Desenvolvimento, Laboratórios Metalúrgicos de Mogi e Pinda, Engenharia de Produto e Processo de Mogi.

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

Ao Prof Dr. Oscar Balancin da UFSCar pela realização dos ensaios.

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.
- 7 BALANCIN O. JORGE JR, A.M. influência da microestrutura no comportamento plástico de aços austeníticos deformados em altas temperaturas através de ensaios de torção. II Workshop sobre textura e relações de orientação: Deformação Plástica, Recristalização e crescimento de grão. São Paulo, 2003. p.163-175
- 8 REGONE, W. Modelagem de evolução dos tamanhos de grãos austeníticos originais durante seqüências de deformações a quente. 1997. 113p . Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.