

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO AO NIÓBIO EM LAMINAÇÃO CONTROLADA ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO*

Emanuelle Garcia Reis¹
José Herbert Dolabela da Silveira²

Resumo

O trabalho apresenta a previsão das propriedades mecânicas de um aço C-Mn com adição de Nb laminado pelo processo TMCP, utilizando equações matemáticas que correlacionam os parâmetros operacionais de deformação e as temperaturas de processo obtidos em uma simulação laboratorial. Foram considerados os fenômenos metalúrgicos de solubilização, precipitação, recristalização e crescimento de grão. Os resultados finais previstos pela simulação mostraram-se satisfatórios, permitindo uma boa previsibilidade da resistência mecânica do laminado a quente.

Palavras-chave: Laminação controlada; Modelos matemáticos; Propriedades mecânicas.

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF A NIOBIUM STEEL IN CONTROLLED ROLLING THROUGH MATHEMATICAL MODELING

Abstract

This paper presents the prediction of the mechanical properties of a C-Mn steel with addition of Nb rolled by TMCP process, using mathematical equations that correlate the operating parameters of strain and the process temperatures obtained in a laboratory simulation. Metallurgical solubilization phenomena, precipitation, recrystallization and grain growth were considered. The final results were satisfactory, allowing a good predictability of the mechanical strength of the hot rolled.

Keywords: Controlled rolling; Mathematical models; Mechanical properties.

¹ *Engenheira civil, M.Sc, facilitadora de melhoria da laminação de chapas grossas, Gerdau Ouro Branco, MG, Brasil.*

² *Membro da ABM, engenheiro metalurgista, M.Sc, gerente da laminação de chapas grossas, Gerdau Ouro Branco, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação controlada tem por objetivo aumentar a resistência mecânica dos laminados, melhorando a tenacidade sem degradação da soldabilidade. A figura abaixo representa esquematicamente o esquema de deformações e de temperaturas nos passes e as transformações de fases que ocorrem no processo de laminação a quente.

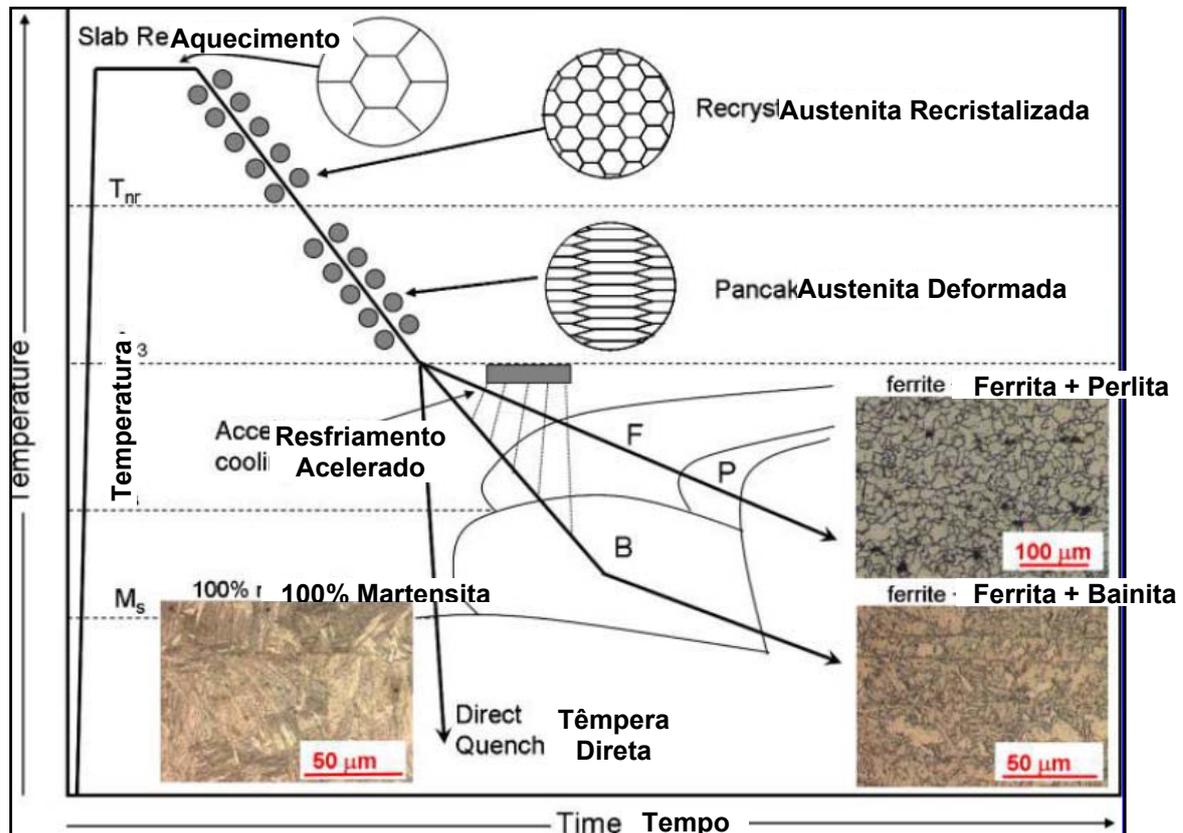


Figura 1: Desenho esquemático do processo de laminação controlada [1].

Os principais parâmetros de controle no processo durante a laminação a quente são:

- temperatura de aquecimento,
- temperatura de início da fase de acabamento,
- temperatura de fim da fase de acabamento,
- redução na fase de esboçamento,
- redução na fase de acabamento.

Os aços utilizados no processo de laminação controlada tem microligantes em sua composição química com a intenção de promover o endurecimento da microestrutura em sua plenitude através do controle do refino de grão, da transformação de fases, da precipitação dos carbonitretos, da solução sólida e em conjunto com a laminação, do encruamento [2,3].

Para melhor aproveitar todos estes mecanismos de endurecimento, três temperaturas importantes devem ser consideradas, previamente, para definir as variáveis que devem ser seguidas na laminação:

- temperatura de solubilização
- temperatura de não recristalização: TNR
- temperatura da transformação austenita-ferrita: Ar3

No processo de laminação a quente, a fase de acabamento deve sempre ser realizada abaixo da TNR, para que não ocorra a recristalização dos grãos austeníticos, gerando a “driving force” para a transformação austenita-ferrita e com isto aumenta-se o parâmetro Sv (pontos para nucleação da ferrita) [3].

As curvas abaixo representam o fenômeno de recristalização “clássica” em um processo onde as temperaturas de deformação ocorrem abaixo da TNR, sempre com o passe subsequente em uma temperatura mais baixa que no anterior.

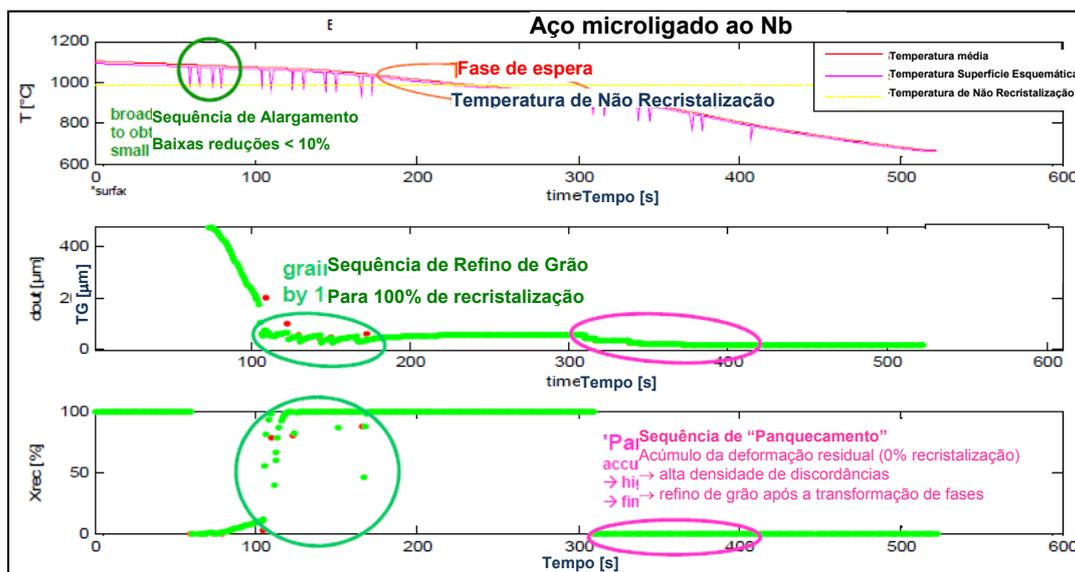


Figura 2: Ocorrência de recristalização e refino de grãos no processo de laminação [4].

Foi feito um teste a quente num laminador piloto, utilizando condições diferentes de temperatura de espera, temperatura de acabamento e taxas de resfriamento. Foram mantidas as deformações e a temperatura de aquecimento.

2 MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO

As equações utilizadas nas simulações estão descritas na Tabela 1 [5-7].

As temperaturas de não recristalização e de transformação austenita ferrita são calculadas através das equações 1 e 2. As principais deformações que ocorrem durante a laminação são determinadas pelas equações 3, 4, 5 e 6.

Os tempos para que ocorra 50% de recristalização estática ou metadinâmica são calculados pelas equações 7 e 8 respectivamente.

Os tamanhos de grão estáticos ou metadinâmicos são dados pelas equações 9 e 10 e crescimento dos grãos austeníticos é dados pela equação 11. O tamanho de grão ferrítico na ausência de deformação retida é dado pela equação 12 e quando existe deformação retida na austenita é dada pela equação 13.

Os valores de limites de escoamento e resistência são calculados pelas equações 14 e 15, e a contribuição da precipitação ao ar é dada pela equação 16 e com resfriamento acelerado pela equação 17.

Se $\varepsilon_a < \varepsilon_p$ ocorre o fenômeno da recristalização estática e são utilizadas as equações 7 e 9 para determinar o tamanho de grão (d_{RX}). Se $\varepsilon_a > \varepsilon_p$ ocorre o fenômeno da recristalização dinâmica e são utilizadas as equações 8 e 10 para determinar o tamanho de grão (d_{RX}).

Tabela 1: Equações usadas na simulação [5-7]

Variável	Equação
T _{nr}	$T_{nr} = 897 + 464.C + (6445.Nb - 644.\sqrt{Nb}) + (732.V - 230.\sqrt{V}) + 890.Ti + 363.Al - 357.Si$ (1)
Ar3	$Ar3 = 910 - 310.C - 80.Mn - 20.Cu - 15.Cr - 55.Ni - 80.Mo + 0,35.(t - 8)$ (2)
ϵ_p ; ϵ_c	$\epsilon_p = \left(\frac{1 + 20.[Nb]}{1,78} \right) \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot d_0^{0,5} \cdot \left[\dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{375000}{R.T} \right) \right]^{0,17}$ (3)
ϵ_c / ϵ_p	$\epsilon_c / \epsilon_p = 0,8 - 13.Nb_{eff} + 112.(Nb_{eff})^2$ (4)
	$Nb_{eff} = [Nb] - \frac{[Mn]}{120} + \frac{[Si]}{94}$ (5)
ϵ_a	$\epsilon_{a_{i+1}} = \epsilon_{i+1} + (1 - X_i) \cdot \epsilon_i$ (6)
$t_{0,5}$	$t_{0,5}^{SRX} = (-5,24 + 550.[Nb]) \cdot 10^{-18} \cdot \epsilon^{(-4+77.[Nb])} \cdot d_0^2 \cdot \exp\left(\frac{330000}{R.T} \right)$ (7)
	$t_{0,5}^{MDRX} = 4,42 \cdot 10^{-7} \cdot \dot{\epsilon}^{-0,59} \cdot \exp\left(\frac{153000}{R.T} \right)$ (8)
d_{RX}	$d_{SRX} = 1,1 \cdot \epsilon^{-0,67} \cdot d_0^{0,67}$ para $T > 950^\circ C$ (9)
	$d^{MDRX} = 1370 \cdot \dot{\epsilon}^{-0,13} \cdot \exp\left(\frac{-45000}{R.T} \right)$ (10)
d after t_{ip}	$d^{4,5} = d_0^{4,5} + 4,1 \cdot 10^{23} \cdot t_{ip} \cdot \exp\left(\frac{-435000}{R.T} \right)$ (11)
d_α	$d_\alpha^0 = 2,5 + 3,0 \cdot \dot{T}^{-1/2} + 20 \cdot \left[1 - \exp(-1,5 \cdot 10^{-2} \cdot d_\gamma) \right]$ (12)
	$d_\alpha = d_\alpha^0 \cdot (1 - 0,45 \cdot \sqrt{\epsilon_r})$ (13)
LE	$LE = 62,6 + 26,1.[Mn] + 60,2.[Si] + 759.[P] + 212,9.[Cu] + 3286.[N] + \sigma_p + 19,7 \cdot d_\alpha^{-0,5}$ (14)
LR	$LR = 164,9 + 634,7.[C] + 53,6.[Mn] + 99,7.[Si] + 6519.[P] + 4726.[N] + 33394.[N] + \sigma_p + 11 \cdot d_\alpha^{-0,5}$ (15)
σ_p	$\sigma_{p-RA} = 2500 \text{ MPa}/\%Nb$ (16)

Legenda:

- C, Mn, Si, P, Ni, N, Nb, Ti, Al, Si, Mo, Cu= elementos químicos do laminado [%]
- T_{nr}= Temperatura de não recristalização [°C]
- Ar3= Temperatura de transformação austenita ferrita [°C]
- T= temperatura no passe [°C]
- ϵ_p = deformação de pico
- ϵ_c = deformação crítica
- ϵ_a = deformação acumulada
-
- $\dot{\epsilon}$ = taxa de deformação [s⁻¹]
- R= constante dos gases [KJ/mol.K]

Legenda:

- t_{ip} = tempo entre passes [s]
- $t_{0,5}$ = tempo para 50% de recristalização (SRX= recristalização estática e MDRX= recristalização metadinâmica) [s]
- d_{RX} = tamanho de grão recristalizado (SRX= recristalização estática e MDRX= recristalização metadinâmica) [μm]
- d after t_{ip} = tamanho de grão em crescimento [μm]
- d_0 = tamanho de grão austenítico no passe [μm]
- d_α^0 = tamanho final ferrítico na ausência de deformação [μm]
- d_α = tamanho de grão ferrítico final [μm]
- LE= limite de escoamento [MPa]
- LR= limite de resistência [MPa]
- σ_p = contribuição da precipitação [MPa]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da simulação foi realizado com um aço com 0,17% de C, 1,45% de Mn e 0,022% de Nb. A laminação ocorreu em um laminador laboratorial com medição digital de temperatura nos passes através de pirômetro de contato.

O corpo de prova tinha uma espessura inicial de 100 mm e foi laminado até uma espessura final de 25 mm. Os corpos de prova foram aquecido em forno do tipo mufla à 1.160°C e a temperatura de início de laminação foi 1.100°C.

A laminação controlada ocorreu com 50mm de espessura de espera e a temperatura de espera variou de 960°C a 770°C. A temperatura de acabamento variou de 900°C a 700°C.

Os corpos de prova que sofreram resfriamento acelerado tiveram uma temperatura de início de resfriamento de 780°C a 680°C, temperatura final de resfriamento de 500°C e taxas de resfriamento de 19 C/s a 26°C/s.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do modelo matemático e resultados reais do processo de laminação controlada encontrados estão mostrados nas tabelas 2.

Tabela 2: Resultados do modelo microestrutural e microestruturas para os corpos de prova.

AMOSTRA A																										
Eq.	Passe	d ₀ (μm)	T (°C)	de/dt ε ⁰	t _{ep} (s)	ε	ε _a	ε _p	ε _c	RD ?	t _{0,5} (s)	t _{0,05} (s)	t _{0,95} (s)	t _{ps} (s)	PPT ?	X	d _{rec}		d após t _{ep}		d _f (μm)	Tx. (°C/s)	d ⁰ _α (μm)	d _α (μm)		
																	RMD	RE	RMD	RE						
A	1	150,0	1.100	4,8	35,5	0,12	0,12	0,97	0,62	N	73	5,4	315,4	0	N	28,6%	21,0	129,9	80,4	100,9	100,9					
	2	100,9	1.080	6,4	11,0	0,18	0,26	0,90	0,58	N	9	0,6	36,8	0	N	59,1%	19,1	59,3	26,3	46,3	46,3					
	3	46,3	1.060	7,9	11,5	0,21	0,32	0,69	0,45	N	2	0,1	7,5	0	N	99,0%	15,4	30,7	28,2	34,2	34,2					
	4	34,2	960	11,2	127,5	0,32	0,32	1,01	0,65	N	11	0,8	45,7	0	N	100,0%	12,0	25,0	34,9	36,4	36,4					
	5	36,4	940	12,8	11,5	0,30	0,30	1,18	0,76	N	24	1,8	103,0	0	N	28,4%	10,5	27,3	20,6	23,8	23,8					
	6	23,8	900	13,7	67,0	0,26	0,47	1,19	0,77	N	11	0,0	0,0	8	S	0,0%	9,6	15,2	23,8	23,8	23,8	AR				
	7	23,8	900	13,9	-	0,20	0,67	1,20	0,77	N	5	0,0	0,0	10	S	0,0%	0,5	12,0	23,8	23,8	23,8	1,5	10,9	6,9		
AMOSTRA B																										
Eq.	Passe	d ₀ (μm)	T (°C)	de/dt ε ⁰	t _{ep} (s)	ε	ε _a	ε _p	ε _c	RD ?	t _{0,5} (s)	t _{0,05} (s)	t _{0,95} (s)	t _{ps} (s)	PPT ?	X	d _{rec}		d após t _{ep}		d _f (μm)	Tx. (°C/s)	d ⁰ _α (μm)	d _α (μm)		
																	RMD	RE	RMD	RE						
B	1	150,0	1.100	4,8	35,5	0,12	0,12	0,97	0,62	N	73	5,4	315,4	0	N	28,6%	21,0	129,9	80,4	100,9	100,9	80,4	100,9			
	2	100,9	1.080	7,7	11,0	0,25	0,34	0,93	0,60	N	5	0,4	20,7	0	N	79,7%	18,6	50,2	17,9	41,2	41,2					
	3	41,2	1.060	9,6	11,5	0,29	0,35	0,67	0,43	N	1	0,1	4,8	0	N	99,9%	12,6	26,6	22,0	28,6	28,6					
	4	28,6	860	9,8	247,5	0,22	0,22	1,56	1,00	N	294	0,0	0,0	9	S	0,0%	8,4	28,3	28,6	28,6	28,6					
	5	28,6	850	11,2	11,5	0,23	0,45	1,69	1,09	N	80	0,0	0,0	8	S	0,0%	7,7	17,7	28,6	28,6	28,6					
	6	28,6	830	11,3	67,0	0,18	0,64	1,92	1,24	N	69	0,0	0,0	10	S	0,0%	7,0	14,1	28,6	28,6	28,6					
	7	28,6	805	11,8	14,3	0,16	0,80	2,27	1,46	N	94	0,0	0,0	11	S	0,0%	6,5	12,1	28,6	28,6	28,6	AR				
	8	28,6	800	11,9	-	0,14	0,93	2,35	1,51	N	78	0,0	0,0	13	S	0,0%	0,3	10,9	28,6	28,6	-	1,5	11,9	6,7		
AMOSTRA C																										
Eq.	Passe	d ₀ (μm)	T (°C)	de/dt ε ⁰	t _{ep} (s)	ε	ε _a	ε _p	ε _c	RD ?	t _{0,5} (s)	t _{0,05} (s)	t _{0,95} (s)	t _{ps} (s)	PPT ?	X	d _{rec}		d após t _{ep}		d _f (μm)	Tx. (°C/s)	d ⁰ _α (μm)	d _α (μm)		
																	RMD	RE	RMD	RE						
C	1	150,0	1.100	4,8	35,5	0,12	0,12	0,97	0,62	N	73	5,4	315,4	0	N	28,6%	21,0	129,9	80,4	100,9	100,9					
	2	100,9	1.080	7,7	11,0	0,25	0,34	0,93	0,60	N	5	0,4	20,7	0	N	79,7%	18,6	50,2	17,9	41,2	41,2					
	3	41,2	1.060	9,6	11,5	0,29	0,35	0,67	0,43	N	1	0,1	4,8	0	N	99,9%	12,6	26,6	21,8	28,6	28,6					
	4	28,6	858	9,8	247,5	0,22	0,22	1,57	1,01	N	311	0,0	0,0	9	S	0,0%	8,1	28,3	28,6	28,6	28,6					
	5	28,6	836	11,2	11,5	0,23	0,45	1,84	1,19	N	125	0,0	0,0	8	S	0,0%	7,4	17,7	28,6	28,6	28,6					
	6	28,6	826	11,3	67,0	0,18	0,64	1,97	1,27	N	78	0,0	0,0	10	S	0,0%	6,8	14,1	28,6	28,6	28,6					
	7	28,6	800	11,8	14,3	0,16	0,80	2,34	1,51	N	112	0,0	0,0	11	S	0,0%	6,4	12,1	28,6	28,6	28,6					
	8	28,6	800	11,9	-	0,14	0,93	2,35	1,51	N	77	0,0	0,0	13	S	0,0%	0,3	10,9	28,6	28,6	28,6	26,2	10,1	5,68		
AMOSTRA D																										
Eq.	Passe	d ₀ (μm)	T (°C)	de/dt ε ⁰	t _{ep} (s)	ε	ε _a	ε _p	ε _c	RD ?	t _{0,5} (s)	t _{0,05} (s)	t _{0,95} (s)	t _{ps} (s)	PPT ?	X	d _{rec}		d após t _{ep}		d _f (μm)	Tx. (°C/s)	d ⁰ _α (μm)	d _α (μm)		
																	RMD	RE	RMD	RE						
D	1	150,0	1.106	4,8	35,5	0,12	0,12	0,94	0,61	N	64	4,8	278,1	0	N	31,8%	21,2	129,9	74,4	98,0	98,0					
	2	98,0	1.080	8,1	11,5	0,27	0,36	0,93	0,60	N	4	0,3	17,1	0	N	86,7%	18,5	47,3	17,0	40,9	40,9					
	3	40,9	1.060	10,0	12,3	0,30	0,35	0,68	0,44	N	1	0,1	4,8	0	N	100,0%	10,5	26,7	15,7	27,1	27,1					
	4	27,1	765	8,0	487,8	0,15	0,15	2,72	1,75	N	16.604	0,0	0,0	16	S	0,0%	5,6	27,1	27,1	27,1	27,1					
	5	27,1	757	9,1	13,3	0,16	0,31	2,95	1,90	N	4.153	0,0	0,0	15	S	0,0%	5,2	22,0	27,1	27,1	27,1					
	6	27,1	747	9,6	13,6	0,15	0,46	3,20	2,06	N	2.494	0,0	0,0	17	S	0,0%	4,9	17,0	27,1	27,1	27,1					
	7	27,1	737	9,8	13,7	0,13	0,58	3,46	2,22	N	2.072	0,0	0,0	20	S	0,0%	4,7	14,4	27,1	27,1	27,1					
	8	27,1	729	10,0	68,8	0,11	0,70	3,68	2,37	N	1.886	0,0	0,0	23	S	0,0%	4,2	12,8	27,1	27,1	27,1					
	9	27,1	702	10,3	13,9	0,10	0,80	4,58	2,95	N	4.098	0,0	0,0	30	S	0,0%	3,9	11,6	27,1	27,1	27,1					
	10	27,1	700	10,1	-	0,09	0,89	4,64	2,98	N	3.470	0,0	0,0	35	S	0,0%	0,2	10,8	27,1	27,1	27,1	19,0	9,9	5,67		

* Contribuição técnica ao 52° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Pode-se perceber na Tabela 2 que a medida que a taxa de resfriamento aumenta as microestruturas tornam-se mais refinadas. O tamanho de grão passa de 7 μm para 6 μm . Na fase de desbaste as equações utilizadas mostram que houve recristalização e que na fase de acabamento houve precipitação. Isso demonstra que as equações utilizadas representam bem os fenômenos metalúrgicos quando ocorre resfriamento ao ar e no resfriamento acelerado.

A tabela 3 e Figura 3 mostram os resultados das propriedades mecânicas reais e calculadas pelas equações de previsão.

Tabela 3: Resultados das propriedades mecânicas reais e calculadas pelas equações de previsão.

Amostra	Limite de Escoamento [Mpa]		Diferença [%]	Limite de Resistência [Mpa]		Diferença [%]
	Calculado	Real		Calculado	Real	
A	444	428	3,7%	604	580	4,1%
B	447	472	-5,4%	606	592	2,3%
C	468	614	-31%	618	870	-41%
D	468	542	-16%	618	685	-11%

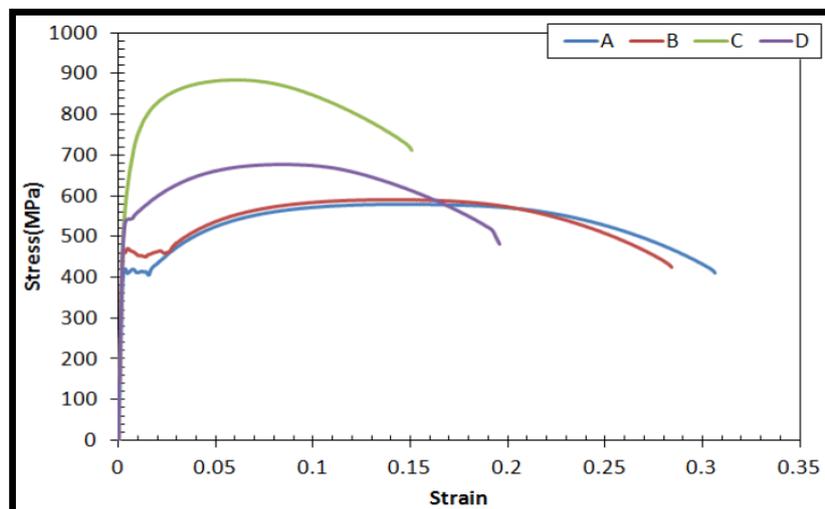


Figura 3: Resultados dos ensaios de tração.

A diferença média encontrada entre os valores de limite de escoamento e limite de resistência está consistente para uma primeira abordagem para a previsibilidade das propriedades mecânicas.

Houve um aumento dos limites reais de escoamento e resistência nas amostras C e D que sofreram resfriamento acelerado.

Percebe-se que a diferença é maior para os casos onde a taxa de resfriamento é maior. Isto poderia ser explicado pelo efeito da precipitação e também pela formação de uma microestrutura martensítica e acicular, onde as equações de previsão utilizadas não tem precisão adequada.

4 CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido neste trabalho fornece uma previsão adequada dos valores de limite de escoamento e limite de resistência para laminação controlada com resfriamento ao ar. Para o processo de laminação controlada com resfriamento

acelerado o modelo necessita de um ajuste na contribuição da precipitação e da transformação de fases.

Além disso, o modelo, ainda que muito simplificado, fornece uma orientação quanto aos mecanismos de amaciamento envolvidos ao longo do processo termomecânico. Entretanto, quando ocorre a precipitação e a presença de microestruturas aciculares, adaptações precisam ser feitas nas equações.

Agradecimentos

Agradecemos ao Antônio Augusto Gorni pelos valiosos ensinamentos adquiridos durante o curso sobre laminação controlada e modelos matemáticos ministrado com o apoio da ABM.

REFERÊNCIA

- 1 S. Vervynckt, K. Verbeken, B. Lopez and J. J. Jonas, Modern HSLA steels and role of non-recrystallisation temperature, International Materials Reviews 2012, vol. 57, nº 4
- 2 Anthony J. DeArdo; Future Challenges and Opportunities for Steel and Steel Research, Steel Forum 2009
- 3 Gorni A.A., Modelos Matemáticos para a Laminação de Produtos Planos, Curso ABM, 2012
- 4 Treinamento SVAI, England, 2012
- 5 REIS E.G., Dissertação de Mestrado, Modelo Matemático para Previsão das Propriedades Mecânicas na Laminação de Perfis Estruturais, UFMG – 2007
- 6 6- Pietrzyk, Cser e Lenard, Mathematical And Physical Simulation Of The Properties Of Hot Rolled Products, Elsevier Science, 1999
- 7 Hodson, P. D. & GIBBS, R. K., A Mathematical Model to Predict Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels. ISIJ International, 32:12, December 1992, 1329-1338