

ESTUDO DOS PROCESSOS DE AMACIAMENTO DO LAMINADOR CONTÍNUO DA V&M DO BRASIL¹

Pedro Picorelli Ferraz²
Ricardo Nolasco de Carvalho³
Ronaldo Barbosa⁴

Resumo

A laminação de tubos sem costura possui o segmento de tubos petrolíferos como um de seus principais mercados. A extração de petróleo e gás natural ocorre, em uma significativa parte, em ambientes corrosivos que necessitam a utilização de produtos inoxidáveis, tais como o aço DINX20Cr13. As dificuldades de laminação desse aço, tais como as ondulações que surgem em suas extremidades e que não estão presentes nas laminações de aço-carbono, mostram a necessidade de se obter maior conhecimento sobre seus processos de amaciamento e características metalúrgicas durante o processo de laminação. No presente trabalho os parâmetros do laminador contínuo foram simulados via elementos finitos ou obtidos através de medição direta. Os processos de amaciamento foram modelados matematicamente para o aço DINX20Cr13 e para o Grau B e foi observado que os mecanismos de amaciamento, a cinética de amaciamento e a microestrutura durante o processo de laminação possuem considerável discrepância entre os aços, porém não é a causa do aparecimento das ondulações nas extremidades do tubo. O presente trabalho sugere ainda que no futuro sejam estudadas as diferenças na espessura de parede na seção do laminador contínuo em cada cadeira, pois provavelmente as ondulações possuem origens mecânicas, e não metalúrgicas.

Palavras-chave: Laminação de tubos sem costura; DinX20Cr13; Processos de amaciamento.

A STUDY OF THE SOFTENING PROCESS AT THE CONTINUOUS MILL AT V&M DO BRASIL

Abstract

The seamless pipe rolling presents the oil piping segment as one of its main markets. The oil and natural gas extraction occurs, in great part, in corrosive environments that requires the use of stainless products, such as DINX20Cr13. The rolling problems seem in this steel grade, such as the waves present at the edge of the pipe that are not found on carbon-steel, show the need to achieve a greater knowledge about its softening process e metallurgical features throughout the rolling process. In this study the Conti mill parameters were simulated using finite element or obtained through direct measurement. The softening process were simulated mathematically for the DINX20Cr13 and Grade B and was observed that the softening mechanisms, the softening kinetics and microstructure throughout the Conti mill process present considerable discrepancy between the steel grades, although this is not the reason of the wave appearance on the pipe edges. The present study suggests still that in the future the wall thickness deviation should be studied in each stand of the conti mill, as the waves probably have mechanical causes, and not metallurgical.

Key words: Seamless tube rolling; DinX20Cr13; Softening process.

- 1 Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.*
- 2 Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG, Engenheiro de processo da V&M do Brasil*
- 3 Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG. Engenheiro Sênior da V & M do Brasil*
- 4 Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre, Dr., Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG*

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por petróleo resultou na exploração de poços antes considerados de difícil operação devido às características corrosivas do ambiente onde se situam. Para exploração de tais poços são necessários tubos de aço sem costura de materiais inoxidáveis, tal fato provavelmente aumentará a demanda por tubos desse material nos próximos anos.

A laminação de tubos sem costura de aços inox apresenta grande rejeito de material durante o processo de laminação no laminador contínuo da Vallourec & Mannesmann do Brasil devido a ondulações que surgem nas extremidades do tubo, sendo esse fenômeno não observado em aços-carbono convencionais. O aço inoxidável utilizado na laminação da V&M do Brasil é comprado de um fornecedor externo sendo o rejeito desse material extremamente prejudicial à rentabilidade do produto.

A crescente demanda por tubos sem costura de aços inoxidáveis e o grande rejeito de material na laminação contínua mostram a necessidade da realização de um estudo dos processos de amaciamento presentes no laminador contínuo da Vallourec & Mannesmann do Brasil visando melhor controle do processo. O presente trabalho visa suprir essa necessidade analisando os fenômenos de amaciamento envolvidos na laminação do aço Grau B e DinX20Cr13 e relacionando com o aparecimento de ondulações na extremidade dos tubos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os aços utilizados neste trabalho apresentam a faixa de composição química conforme as normas API 5CT⁽¹⁾ e API 5L⁽²⁾, mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química (%)

Material	Composição (%)	Elementos								
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Ti
13Cr	Mín	0,15	0,25	-	-	0,2	-	12	-	-
	Max	0,22	1	0,02	0,01	1	0,5	14	0,25	0,01
Grau B*	Mín	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max	0,28	1,2	0,03	0,03	-	-	-	-	0,04

*1) A soma do conteúdo de Vanádio e Nióbio não pode exceder 0,03%; *2) A soma do conteúdo de Vanádio, Nióbio e Titânio não pode exceder 0,15%.

O processo analisado aqui é aquele normalmente utilizado para produzir tubos sem costura na bitola $\varnothing 168,3 \times 8,94$ mm e compreende as etapas descritas a seguir. O bloco é aquecido a aproximadamente 1.230°C em forno com soleira rotativa (FB), seguido pela laminação em temperaturas elevadas em três equipamentos: laminador perfurador (LP), laminador redutor de lupas (LR) e laminador contínuo com mandril (LC). Em seguida, através de um leito de resfriamento (Leito I), a lupa é transferida para um forno intermediário (FI) que trabalha a 980°C, processada em um laminador estirador redutor (LE) e resfriado até uma temperatura próxima da ambiente em leito (Leito II).

Uma caracterização dos principais parâmetros metalúrgicos (deformação, velocidade de deformação e tempo entre passes) foi feita utilizando-se o mesmo método descrito por Pussegoda *et al.*⁽³⁾ O ciclo térmico foi determinado usando registros de pirômetros de processo e medições com pirômetro manual, na entrada e saída de cada equipamento. Também foram simulados os parâmetros metalúrgicos via elementos finitos. A caracterização dos parâmetros foi separada em 0°, 45° e

90°, referente a posição do tubo no laminador contínuo, pois as deformações no fundo do canal são diferentes das deformações na luz da cadeira, e nesse laminador a cada cadeira se inverte a posição, pois o ponto referente ao fundo do canal da primeira cadeira será a luz na cadeira seguinte, de forma a se obter maior homogeneidade de deformação ao longo do processo.

Finalmente, foi desenvolvido um modelo matemático para descrever a evolução da microestrutura destes aços com base em equações selecionadas da literatura⁽⁴⁻¹⁰⁾. Para o aço DINX20Cr13, a literatura é muito escassa, portanto foram utilizadas as equações do aço AISI304 propostas por Dehghan-Manshadi⁽¹¹⁾, com valores ajustados para o DINX20Cr13 conforme as experiências realizadas por Lage⁽¹²⁾. As equações utilizadas permitem, para cada etapa do processo, decidir sobre o mecanismo de amaciamento atuante, calcular sua cinética, o tamanho de grão e a deformação residual.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos Parâmetros Termomecânicos da Linha de Laminação de Tubos sem Costura até o Laminador Contínuo

Visando permitir a comparação entre os diferentes aços e processos de laminação o processo foi caracterizado conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Forma de caracterização do processo do laminador contínuo

Aço	Formato do cilindro
GrauB	Convencional
X20Cr13	Convencional
GrauB	Modificado
X20Cr13	Modificado

As deformações, taxa de deformação, tempo entre passes e temperatura foram obtidas para cada combinação aço, formato de cilindro e posicionamento ao longo da circunferência do laminador contínuo (0°, 45° e 90°). A observação na indústria mostrou que a utilização de cilindros modificados reduziu consideravelmente o surgimento de ondulações no aço DinX20Cr13, sendo esse motivo do estudo dos dois formatos de cilindros.

3.2 Modelamento Matemático Metalúrgico

Utilizando-se os parâmetros listados anteriormente (deformação, taxa de deformação, tempo entre passes e temperatura) e as fórmulas obtidas na literatura,⁽³⁻¹²⁾ foi realizado um modelamento matemático metalúrgico para previsão da microestrutura e processo de amaciamento presente em cada posição de cada cadeira do laminador contínuo.

3.2.1 Amaciamento no aço Grau B cilindro convencional

As Tabelas 3 a 5 mostram o resultado do modelo metalúrgico matemático.

Tabela 3. Modelamento matemático: Grau B, cilindro convencional, 0°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	$\dot{\epsilon}/t$ [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	$t_{0.95}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,43	13,30	0,430	0,29	S	0,02	0,06	1,00	35,4
2	0,43	1103	35	0,46	17,46	0,460	0,23	S	0,02	0,04	1,00	32,3
3	0,4	1096	32	0,04	2,80	0,040	0,17	N	4,51	9,11	0,06	29,6
4	0,39	1089	30	0,22	48,89	0,258	0,27	N	0,06	0,12	0,99	23,6
5	0,37	1082	24	0,05	7,42	0,052	0,19	N	1,70	3,44	0,14	20,0
6-8	1,2	1065	20	0,05	8,43	0,093	0,19	N	1,59	3,22	0,41	16,7

Tabela 4. Modelamento matemático: Grau B, cilindro convencional, 45°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	$\dot{\epsilon}/t$ [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	$t_{0.95}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,45	10,41	0,450	0,28	S	0,03	0,07	1,00	37,5
2	0,43	1103	37	0,32	25,91	0,320	0,25	S	0,01	0,03	1,00	29,5
3	0,4	1096	29	0,12	9,78	0,120	0,20	N	0,24	0,49	0,68	24,5
4	0,39	1089	24	0,08	10,63	0,118	0,20	N	0,51	1,03	0,41	18,9
5	0,37	1082	19	0,11	13,33	0,157	0,19	N	0,15	0,31	0,82	24,5
6-8	1,2	1065	24	0,04	7,31	0,060	0,20	N	4,14	8,37	0,18	19,8

Tabela 5. Modelamento matemático: Grau B, cilindro convencional, 90°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	$\dot{\epsilon}/t$ [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	$t_{0.95}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,67	14,75	0,670	0,30	S	0,02	0,05	1,00	34,6
2	0,43	1103	35	0,14	14,62	0,140	0,22	N	0,20	0,41	0,77	25,5
3	0,4	1096	25	0,13	11,27	0,162	0,20	N	0,15	0,30	0,85	28,3
4	0,39	1089	28	0,07	14,20	0,090	0,22	N	0,95	1,92	0,25	21,0
5	0,37	1082	21	0,09	11,57	0,143	0,20	N	0,31	0,62	0,56	19,0
6-8	1,2	1065	19	0,06	9,02	0,099	0,19	N	0,91	1,84	0,60	19,0

A comparação entre as geratrizes 0°, 45° e 90° most ram algumas diferenças ao longo do processo de laminação. No primeiro passo ocorre recristalização dinâmica nas 3 geratrizes, sendo a deformação superior a deformação crítica e a cinética de amaciamento muito rápida, o que permite que o material se recristalize completamente antes do segundo passo. O tamanho de grão é reduzido consideravelmente, de 100 μm para aproximadamente de 35 μm.

No segundo passo a recristalização dinâmica ocorre nas geratrizes 0° e 45°, referentes ao fundo do canal e a geratriz intermediária entre o fundo do canal e a luz do canal. Na geratriz 90° a deformação não é suficiente para que ocorra a recristalização dinâmica completa. Nesse passo o tamanho de grão não reduz consideravelmente, cerca de 5μm. Durante a laminação o grão cresce, porém devido ao reduzido tempo entre passes esse crescimento pode ser desconsiderado, pois é equivalente a valores em torno de 2 μm a 3 μm.⁽¹³⁾

Na seqüência de passes 3 a 8 as deformações não são suficiente para ultrapassar a deformação crítica em nenhum momento, nem mesmo com a deformação acumulada. O grão é refinado chegando, em sua forma final, em torno de 20μm para todas as geratrizes Os resultados dos passes 3 a 8 já eram esperados, pois são referentes as cadeiras no laminador contínuo que têm como principal função realizar um ajuste fino na espessura da parede (3 e 4), reduzir excentricidade modificando levemente a parede do tubo (5 e 6) e “ovalizar” um pouco o tubo (7 e 8), para que seja possível após o laminador retirar o mandril, o que seria muito complicado em um tubo sem ovalização na qual todos os pontos da lupa estariam em contato com o mandril elevando consideravelmente o atrito.

3.2.2 Amaciamento no aço DinX20Cr13, cilindro convencional

As Tabelas 6 a 8 mostram o resultado do modelo matemático.

Tabela 6. Modelamento matemático: DinX20Cr13, cilindro convencional, 0°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,44	13,61	0,440	0,60	N	0,61	0,46	29,9
2	0,43	1103	30	0,43	16,32	0,670	0,64	S	0,33	0,61	4,9
3	0,4	1096	5	0,05	3,50	0,219	0,52	N	33,74	0,01	4,9
4	0,39	1089	5	0,16	14,32	0,210	0,66	N	3,58	0,06	4,3
5	0,37	1082	4	0,05	7,42	0,201	0,61	N	29,72	0,01	4,3
6-8	1,2	1065	4	0,09	15,17	0,140	0,73	N	11,51	0,06	3,8

Tabela 7. Modelamento matemático: DinX20Cr13, cilindro convencional, 45°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,46	10,64	0,460	0,58	N	0,63	0,44	31,3
2	0,43	1103	31	0,29	23,48	0,547	0,67	N	0,99	0,24	18,1
3	0,4	1096	18	0,13	10,59	0,350	0,61	N	5,06	0,04	16,6
4	0,39	1089	17	0,07	9,30	0,195	0,62	N	14,84	0,01	16,2
5	0,37	1082	16	0,12	14,54	0,189	0,68	N	6,02	0,03	15,2
6-8	1,2	1065	15	0,02	4,01	0,136	0,60	N	192,11	0,00	15,1

Tabela 8. Modelamento matemático: DinX20Cr13, cilindro convencional, 90°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,70	15,41	0,700	0,61	S	0,33	0,69	9,8
2	0,43	1103	10	0,19	19,85	0,404	0,65	N	2,00	0,12	7,6
3	0,4	1096	8	0,09	7,80	0,257	0,58	N	9,98	0,02	7,3
4	0,39	1089	7	0,07	14,20	0,158	0,66	N	12,43	0,02	7,1
5	0,37	1082	7	0,06	7,71	0,129	0,62	N	22,24	0,01	7,0
6-8	1,2	1065	7	0,09	8,97	0,150	0,67	N	14,35	0,04	6,4

Pode-se observar que na primeira cadeira da geratriz 90°, correspondente ao fundo do cilindro, ocorre recristalização dinâmica. A cinética para 50% de amaciamento por recristalização dinâmica nessa geratriz é equivalente a 0,33s, o que permite que o material chegue consideravelmente amaciado na segunda cadeira, pois o tempo entre passes é 0,43s. O tamanho do grão no momento anterior ao segundo passo é 9,8μm. Nas geratrizes 0° e 45°, as condições não são suficientes para que ocorra a recristalização dinâmica no primeiro passo, porém o processo estático reduz o tamanho de grão para em torno de 30μm. A microestrutura no momento anterior ao contato com o cilindro da segunda cadeira é heterogênea, pois apresenta áreas isentas de deformação, com grãos recém nucleados e áreas com grãos alongados e grandes deformações.

No segundo passo ocorre recristalização dinâmica na geratriz 0° devido a deformação acumulada, o que refina o grão para 4,9μm. Na geratriz 45° o grão é maior do que nas outras geratrizes, pois não ocorreu recristalização dinâmica completa, causando uma heterogeneidade na microestrutura. Nos passes seguintes as deformações não são suficientes para atingir a deformação crítica ou gerar uma fração amaciada significativa, portanto também não ocorrem grandes mudanças na microestrutura.

3.2.3 Comparação do amaciamento dos aços Grau B e DINX20Cr13 utilizando cilindro convencional

A principal diferença observada durante o processo de laminação do laminador contínuo entre os dois aços se refere ao processo de amaciamento e microestrutura dos dois primeiros passes do laminador.

No primeiro passo do Grau B ocorre recristalização dinâmica nas três geratrizes e a microestrutura apresentada no passo seguinte apresenta grande homogeneidade. No primeiro passo do DINX20Cr13 apenas o fundo do canal apresenta recristalização dinâmica, o que acarreta em grande heterogeneidade da microestrutura do passo seguinte.

No segundo passe do Grau B ocorre recristalização dinâmica no fundo do canal e no ponto intermediário. Na lateral do canal a deformação crítica não é ultrapassada. Apesar dos diferentes tipos de amaciamento nesse passe a microestrutura final não apresenta grande divergência, com tamanho de grão próximo de 30 μ m. No segundo passe do DINX20Cr13 ocorre recristalização dinâmica apenas no fundo do canal, fato que permite que a heterogeneidade da microestrutura se mantenha na geratriz 45 $^{\circ}$, que é sempre o ponto intermediário entre o fundo do canal e a lateral.

O fato de o aço DINX20Cr13 apresentar ondulações nas extremidades do tubo e o Grau B não apresentar as mesmas ondulações laminado em condições semelhantes sugere que alguma característica metalúrgica do DINX20Cr13 seja responsável pela ondulação. Como os processos de amaciamento apresentados nas primeiras cadeiras do DINX20Cr13 geram uma microestrutura heterogênea, fato que não ocorre no Grau B, é possível que esse fenômeno seja responsável pelas ondulações, fato que necessita comprovação.

3.2.4 Amaciamento no aço DINX20Cr13, cilindro modificado

Após a modificação realizada no cilindro do laminador contínuo as ondulações desapareceram no aço DINX20Cr13. Foi necessário estudar o processo de amaciamento com o cilindro modificado no aço DINX20Cr13 para se comprovar a hipótese de que os diferentes processos de amaciamento geram heterogeneidade na microestrutura e, conseqüentemente, seriam responsáveis pelo aparecimento de ondulações. As Tabelas 9 a 11 mostram os resultados obtidos.

Tabela 9. Modelamento matemático: DinX20Cr13, cilindro modificado, 0 $^{\circ}$

Passe	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μ m]	ϵ	ϵ/t [s $^{-1}$]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μ m]
1	0,54	1110	100	0,42	12,99	0,420	0,60	N	0,66	0,42	33,4
2	0,43	1103	33	0,42	15,94	0,662	0,63	S	0,33	0,60	5,6
3-4	0,79	1096	6	0,31	21,72	0,477	0,68	N	1,02	0,41	2,2
5	0,37	1082	2	0,14	20,77	0,323	0,71	N	4,12	0,05	2,0
6-8	1,2	1065	2	0,02	3,32	0,153	0,58	N	207,97	0,00	2,0

Tabela 10. Modelamento matemático: DinX20Cr13, cilindro modificado, 45 $^{\circ}$

Passe	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μ m]	ϵ	ϵ/t [s $^{-1}$]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μ m]
1	0,54	1110	100	0,45	10,41	0,450	0,58	N	0,66	0,43	33,0
2	0,43	1103	33	0,29	23,48	0,548	0,67	N	0,99	0,24	19,1
3	0,4	1096	19	0,12	9,78	0,340	0,60	N	5,90	0,04	17,7
4	0,39	1089	18	0,07	9,30	0,186	0,62	N	14,84	0,01	17,3
5	0,37	1082	17	0,12	14,54	0,189	0,68	N	6,02	0,03	16,2
6-8	1,2	1065	16	0,05	4,89	0,166	0,62	N	44,71	0,01	15,8

Tabela 11. Modelamento matemático: DinX20Cr13, cilindro modificado, 90 $^{\circ}$

Passe	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μ m]	ϵ	ϵ/t [s $^{-1}$]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μ m]
1	0,54	1110	100	0,62	13,65	0,620	0,60	S	0,36	0,66	11,6
2	0,43	1103	12	0,16	16,71	0,368	0,64	N	2,79	0,08	9,8
3	0,4	1096	10	0,17	14,74	0,316	0,64	N	2,94	0,07	8,4
4	0,39	1089	8	0,03	6,09	0,187	0,58	N	63,22	0,00	8,3
5	0,37	1082	8	0,12	15,42	0,150	0,68	N	5,88	0,03	7,8
6-8	1,2	1065	8	0,06	9,72	0,176	0,68	N	25,49	0,02	7,5

Pode-se observar que na primeira cadeira a geratriz 90 $^{\circ}$, correspondente ao fundo do cilindro da primeira cadeira, ocorre recristalização dinâmica. A cinética para 50% de amaciamento por recristalização dinâmica nessa geratriz é equivalente a 0,36s, o que permite que o material chegue consideravelmente amaciado na segunda cadeira, pois o tempo entre passes é 0,43 s. O tamanho do grão no momento anterior ao segundo passe é 9,0 μ m. Nas geratrizes 0 $^{\circ}$ e 45 $^{\circ}$, as condições

não são suficientes para que ocorra a recristalização dinâmica, portanto não ocorre assim uma redução no tamanho de grão semelhante a da geratriz 90°, o tamanho de grão nas geratrizes 0° e 45° é cerca de 30µm. A microestrutura no momento anterior ao contato com o cilindro da segunda cadeira é heterogênea, apresenta área com grãos recristalizados e isentos de deslocamentos com tamanho próximo de 9,0µm e áreas com grãos alongados pela deformação e presença de deslocamentos que apresentam grãos com medidas em torno de 30µm.

No segundo passe, ocorre recristalização dinâmica na geratriz 0°, que representa nesse passe o fundo do canal. O tamanho de grão é reduzido para 5,6µm após o primeiro passe. Na geratriz 45° a deformação não é suficiente para atingir a deformação crítica, sendo essa a região onde são encontrados os maiores grãos, em torno de 20µm, o que gera heterogeneidade na microestrutura do material, conforme também ocorre no aço DINX20Cr13 com cilindro convencional. Nos passes seguintes as deformações são inferiores a deformação crítica, e a fração amaciada não são significativas a ponto de gerar grandes mudanças na microestrutura.

3.2.5 Comparação do amaciamento para o laminador contínuo com cilindros convencionais e modificados utilizando o aço DINX20Cr13

Comparando-se o processo de amaciamento no laminador contínuo com cilindro convencional e com cilindro modificado para o aço DINX20Cr13 observa-se que o mecanismo de amaciamento, a cinética do amaciamento e a microestrutura não apresentam nenhuma diferença significativa. Os dois processos são extremamente semelhantes quanto ao processo de amaciamento. Portanto rejeita-se a hipótese de que os diferentes mecanismos de amaciamento apresentados no aço Grau B e DINX20Cr13 são responsáveis pelo surgimento das ondulações do DINX20Cr13.

3.3 Comparação entre a Cinética de Amaciamento do Aço AISI304 e DinX20Cr13

Apesar de restrita literatura referente ao aço DINX20Cr13, algumas comparações podem ser realizadas conforme dados encontrados por Lage.⁽¹²⁾ É possível observar nas Figuras 1 e 2 as curvas de amaciamento para ensaios de dupla torção realizados a 1.100°C.

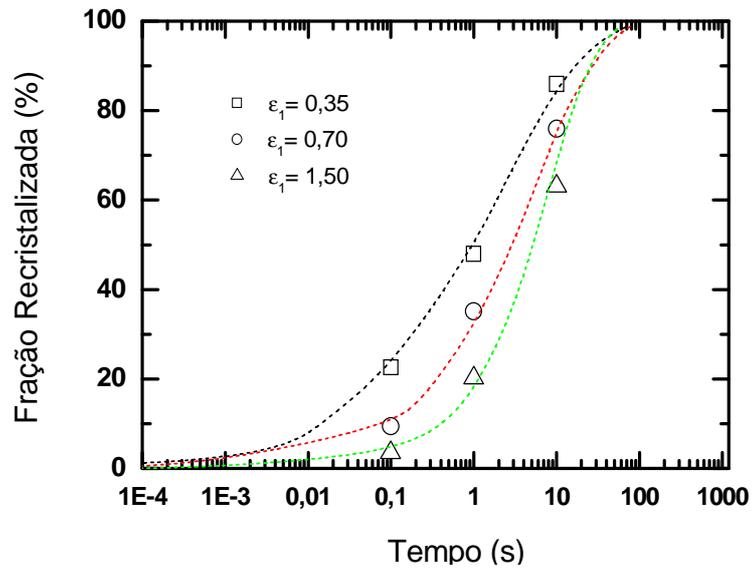


Figura 1. Resultados dos ensaios de dupla torção a 1100°C com taxa de deformação de 1s⁻¹.⁽¹⁰⁾

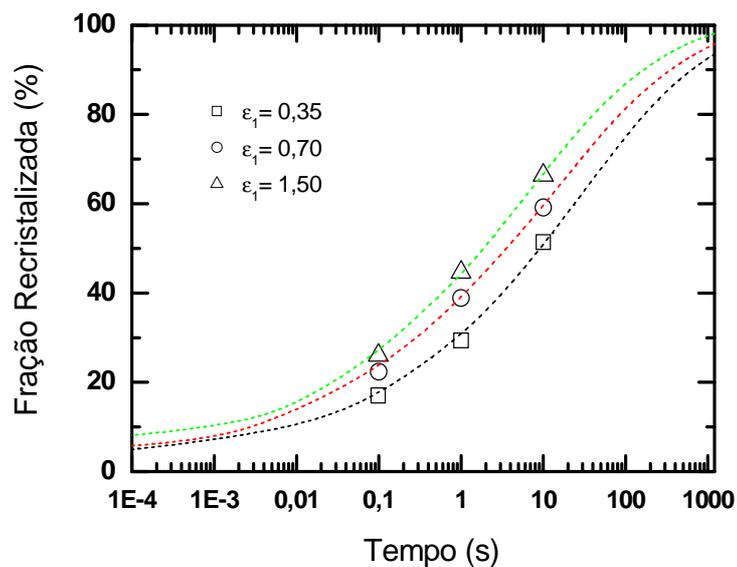


Figura 2. Resultados dos ensaios de dupla torção a 1100°C com taxa de deformação de 10s⁻¹.⁽¹⁰⁾

Comparando os dados obtidos nos ensaios de torção⁽¹²⁾ com as curvas de amaciamento para o AISI304 e o Grau B a 1100°C, ε igual a 0,7, $\dot{\epsilon}$ igual a 10s⁻¹ pode-se obter o gráfico mostrado na Figura 3.

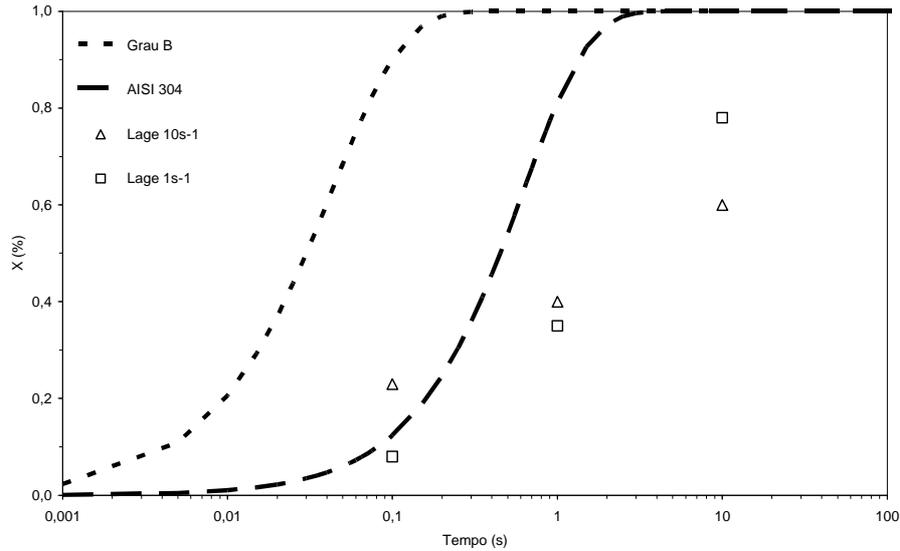


Figura 3. Comparação das curvas de amaciamento do AISI304, Grau B e DinX20Cr13.

A cinética de amaciamento do AISI304 está mais próxima do DINX20Cr13 do que do Grau B, porém são necessários alguns ajustes para aproximar o AISI304 dos resultados encontrados experimentalmente do DINX20Cr13. As equações usadas do AISI304 apresentam uma cinética de recristalização mais rápida do que a do DINX20Cr13, o que pode influenciar nos pontos de ocorrência de recristalização dinâmica e no tamanho de grão. Para uma análise mais detalhada seriam necessários mais pontos para minimizar o erro do DINX20Cr13, mas apenas para uma primeira abordagem é possível ajustar as equações do AISI304 com os dados disponíveis. Pode-se considerar, para o ajuste do modelo do AISI304:

$$t_{50SRX} = 3,7 \times 10^{-8} * \epsilon^{-1,5} * Z^{-0,42} \exp\left(\frac{375000}{RT}\right) \quad (1)$$

$$X = 1 - \exp\left(-0,693 * \frac{t_{ep}}{t_{0,5}}\right)^{0,5} \quad (2)$$

Onde 0,5 é o coeficiente de Avrami modificado para ajuste do modelo.

Aplicando-se as equações 1 e 2 pode-se obter um modelo mais próximo a realidade do DINX20Cr13, como mostra a Figura 4.

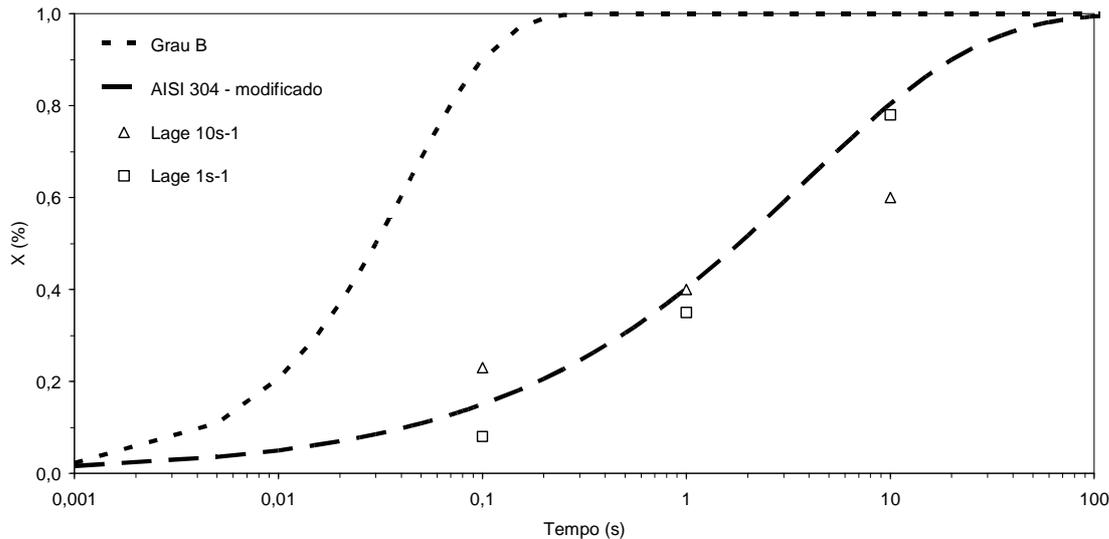


Figura 4. Comparação das curvas de amaciamento do AISI304 modificado, Grau B e DinX20Cr13

Aplicando-se o modelo modificado para o DINX20Cr13 com cilindro convencional e modificado pode-se obter uma aproximação para o modelo do AISI304 mais condizente com a realidade do DINX20Cr13. Os resultados para o DINX20Cr13 cilindro convencional são mostrados nas Tabelas 12 à 14.

Tabela 12. Modelamento matemático ajustado: DinX20Cr13, cilindro convencional, 0°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0,5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,44	13,61	0,440	0,60	N	2,81	0,26	54,6
2	0,43	1103	55	0,43	16,32	0,755	0,64	S	0,33	0,61	8,7
3	0,4	1096	9	0,05	3,50	0,219	0,52	N	156,05	0,03	8,1
4	0,39	1089	8	0,16	14,32	0,208	0,66	N	16,57	0,10	6,6
5	0,37	1082	7	0,05	7,42	0,194	0,61	N	137,44	0,04	6,1
6-8	1,2	1065	6	0,09	15,17	0,138	0,73	N	53,23	0,10	5,0

Tabela 13. Modelamento matemático ajustado: DinX20Cr13, cilindro convencional, 45°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0,5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,46	10,64	0,460	0,58	N	2,92	0,26	55,2
2	0,43	1103	55	0,29	23,48	0,631	0,67	N	4,58	0,19	36,2
3	0,4	1096	36	0,13	10,59	0,365	0,61	N	23,39	0,09	30,2
4	0,39	1089	30	0,07	9,30	0,189	0,62	N	68,65	0,05	27,2
5	0,37	1082	27	0,12	14,54	0,186	0,68	N	27,86	0,08	23,2
6-8	1,2	1065	23	0,02	4,01	0,131	0,60	N	888,51	0,03	22,1

Tabela 14. Modelamento matemático ajustado: DinX20Cr13, cilindro convencional, 90°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0,5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,70	15,41	0,700	0,61	S	0,33	0,69	9,8
2	0,43	1103	10	0,19	19,85	0,404	0,65	N	9,27	0,14	7,3
3	0,4	1096	7	0,09	7,80	0,254	0,58	N	46,17	0,06	6,4
4	0,39	1089	6	0,07	14,20	0,154	0,66	N	57,47	0,06	5,7
5	0,37	1082	6	0,06	7,71	0,126	0,62	N	102,87	0,04	5,3
6-8	1,2	1065	5	0,09	8,97	0,148	0,67	N	66,37	0,09	4,4

Comparando o modelo matemático ajustado do AISI304 com o modelo AISI304 normal pode-se observar grandes diferenças relativas a cinética do amaciamento e ao tamanho de grão. Para o modelo ajustado, no primeiro passo nas geratrizes 0° e 45° a cinética do amaciamento é mais demorada do que o tempo entre passos, o que gera um grão mais grosseiro e aumenta a

heterogeneidade da microestrutura, pois na geratriz 90° ocorre recristalização e grande refino do grão.

Após o segundo passe o modelo ajustado não prevê grandes diferenças do modelo normal, com exceção ao tamanho do grão na geratriz 45°, que no modelo ajustado se situa entre 20 μm a 30 μm, e no modelo normal entre 10 μm a 20 μm.

As Tabelas 15 a 17 mostram os resultados do modelo ajustado para o aço DinX20Cr13 cilindro modificado.

Tabela 15. Modelamento matemático ajustado: DinX20Cr13, cilindro modificado, 0°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,42	12,99	0,420	0,60	N	3,08	0,25	56,0
2	0,43	1103	56	0,42	15,94	0,734	0,63	S	0,33	0,60	9,2
3-4	0,79	1096	9	0,31	21,72	0,477	0,68	N	4,70	0,25	5,3
5	0,37	1082	5	0,14	20,77	0,373	0,71	N	19,04	0,09	4,4
6-8	1,2	1065	4	0,02	3,32	0,147	0,58	N	961,84	0,02	4,2

Tabela 16. Modelamento matemático ajustado: DinX20Cr13, cilindro modificado, 45°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,45	10,41	0,450	0,58	N	3,04	0,25	55,9
2	0,43	1103	56	0,29	23,48	0,626	0,67	N	4,58	0,19	36,6
3	0,4	1096	37	0,12	9,78	0,355	0,60	N	27,28	0,08	31,0
4	0,39	1089	31	0,07	9,30	0,180	0,62	N	68,65	0,05	27,9
5	0,37	1082	28	0,12	14,54	0,186	0,68	N	27,86	0,08	23,8
6-8	1,2	1065	24	0,05	4,89	0,161	0,62	N	206,81	0,05	21,4

Tabela 17. Modelamento matemático ajustado: DinX20Cr13, cilindro modificado, 90°

Passo	t_{ep} [s]	T [°C]	d_i [μm]	ϵ	ϵ/t [s ⁻¹]	ϵ_a	ϵ_c	$\epsilon > \epsilon_c$	$t_{0.5}$ [s]	X	d_f [μm]
1	0,54	1110	100	0,62	13,65	0,620	0,60	S	0,36	0,66	11,6
2	0,43	1103	12	0,16	16,71	0,368	0,64	N	12,89	0,12	9,1
3	0,4	1096	9	0,17	14,74	0,311	0,64	N	13,61	0,11	7,2
4	0,39	1089	7	0,03	6,09	0,181	0,58	N	292,38	0,02	6,8
5	0,37	1082	7	0,12	15,42	0,149	0,68	N	27,18	0,08	5,8
6-8	1,2	1065	6	0,06	9,72	0,171	0,68	N	117,89	0,07	5,1

Comparando o modelo matemático ajustado do AISI304 com o modelo AISI304 normal para o cilindro modificado do DINX20Cr13 podem-se observar resultados semelhantes ao do cilindro convencional. Para o modelo ajustado, no primeiro passe nas geratrizes 0° e 45° a cinética do amaciamento é mais demorada do que o tempo entre passes, o que gera um grão mais grosseiro e aumenta a heterogeneidade da microestrutura, pois na geratriz 90° ocorre recristalização e grande refino do grão.

Após o segundo passe o modelo ajustado não prevê grandes diferenças do modelo normal, com exceção ao tamanho do grão na geratriz 45°, que no modelo ajustado se situa entre 20 μm a 30 μm, e no modelo normal entre 10 μm a 20 μm.

Mesmo ajustando-se o modelo não é possível achar alguma relação entre o mecanismo de amaciamento, a cinética de amaciamento e a microestrutura e o aparecimento de ondulações no DINX20Cr13. Os modelos com cilindro convencional e com cilindro modificado são praticamente idênticos, porém na produção industrial as ondulações aparecem com o cilindro convencional e não estão presentes nas laminações com cilindro modificado.

4 CONCLUSÕES

A caracterização do laminador contínuo mostrou diferença significativa entre a laminação do aço Grau B e do aço DINX20Cr13. O modelo AISI304 mostrou-se limitado, sendo necessário que fosse realizado uma correção com base em experiência do DINX20Cr13. Para maior confiabilidade do modelo é necessário que sejam realizados mais testes, para se obter uma maior base de dados do amaciamento do DINX20Cr13 em diferentes condições;

As ondulações presentes no aço DINX20Cr13 não possuem relação com o mecanismo de amaciamento, com a cinética de amaciamento ou com a microestrutura. A origem das ondulações é provavelmente relacionada a geometria durante o processo de laminação, tal como ocorre na laminação de planos.

REFERÊNCIAS

- 1 API 5 CT. *Specification for Casing and Tubing* –, 8th Edition, ISO 11960:2004, Petroleum and Natural Gas industries, Steel pipes for use as casing or tubing for wells, **American Petroleum Institute**. July 2005.
- 2 API 5 L. *Specification for Line Pipe* –, 43rd Edition, **American Petroleum Institute**. March 2004.
- 3 PUSSEGODA, L. N.; BARBOSA, R.; YUE, S.; JONAS, J. J.; HUNT, P. J. Laboratory simulation of seamless-tube rolling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 25, n. 1, p. 69-90, 1991.
- 4 MACCAGNO, T. M.; JONAS, J. J.; HODGSON, P. D. Spreadsheet modelling of grain size evolution during rod rolling. **ISIJ International**, v. 36, n. 6, p. 720-728, 1996.
- 5 SIWECKI, T. Modelling of microstructure evolution during recrystallization controlled rolling. **ISIJ International**, v. 32, n. 3, p. 368-376, 1992.
- 6 Sellars, C. M. & Beynon, J. H. (1985). Microstructural development during hot rolling of titanium microalloyed steels. In *High Strength Low Alloy Steels, Proceedings of an International Conference* (pp. 142-150). Wollongong, Aust.
- 7 SELLARS, C. M. Modeling microstructural development during hot rolling. **Materials Science and Technology**, v. 6, p. 1072-1081, 1990.
- 8 BEYNON, J. H.; SELLARS, C. M. Modelling microstructure and its effects during multipass hot rolling. **ISIJ International**, v. 32, n. 3, p. 359-367, 1992.
- 9 SICILIANO, F. J.; JONAS, J. J. Mathematical modeling of the hot strip rolling of microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31A, n. 2, p. 511-530, 2000.
- 10 URANGA, P.; FERNANDEZ, A. I.; LOPEZ, B.; RODRIGUEZ-IBABE, J. M. Transition between static and metadynamic recrystallization kinetics in coarse Nb microalloyed austenite. **Materials Science and Engineering A**, v. 345, n. 1-2, p. 319-327, 2003.
- 11 DEHGHAN-MANSHADI, A., BARNETT, M. R., HODGSON, P. D., Recrystallization in AISI304 austenitic stainless steel during and after hot deformation,. **Materials Science and Engineering A**, v. 485, p. 664-672, 2007.
- 12 LAGE, M. G., Microestrutura e deformação a quente de um aço DINX20Cr13 na laminação de tubos sem costura. 2008. (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- 13 HODGSON, P. D., GIBBS, R. K. A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels. **ISIJ International**, v.32, p. 1329-1338, 1992.