

MONITORAMENTO DA TRANSFORMAÇÃO DE FASE INDUZIDA POR DEFORMAÇÃO EM AÇOS PARA GASODUTOS CLASSE API 5L X80 POR MEDIDAS MAGNÉTICAS¹

Alan Almeida²
Fernando Landgraf³
Rodrigo Magnabosco⁴
Hélio Goldenstein⁵

Resumo

O trabalho avaliou o efeito de diferentes graus de deformação plástica na transformação da austenita do microconstituente MA em um aço ARBL API 5L X80. O propósito do trabalho foi compreender melhor o microconstituente MA, explorar a *transformação martensítica induzida por deformação* (SIMT) e a decomposição austenítica por tratamento térmico, com ênfase em seus comportamentos magnéticos. As reduções de área foram através de laminação a frio, de 5% a 20%. O revenimento foi a 300°C/2h e o sub-zero em nitrogênio líquido. A transformação foi acompanhada através de medidas de polarização magnética de saturação, confrontadas com a densidade de massa e dureza. Os resultados obtidos mostram que aumentam a polarização magnética de saturação e o volume, conforme o aumento da deformação plástica, compatível com a transformação induzida por deformação da fase CFC (paramagnética) substituída pela fase ferromagnética CCC ou TCC. Através deste aumento foi possível calcular quanto de austenita havia na amostra como recebida (2%). Através das medidas de densidade de massa, pelo método hidrostático, notou-se dilatação de aproximadamente 0,13% a partir de deformações por volta de 10%. Tomando como equivalente a 4% de dilatação do reticulado durante a transformação $\gamma \rightarrow \alpha'$ M, tem-se 3% de austenita inicial.

Palavras-chave: Polarização magnética; Densidade de massa; API X80, Austenita retida.

EVALUATION OF AUSTENITE TRANSFORMATION FROM MA CONSTITUENT IN GRADE API 5L X80 PIPELINE STEEL UNDER PLASTIC DEFORMATION CONDITION

Abstract

This study evaluated the effect of different degrees of plastic deformation on the transformation of austenite into MA constituent of an HSLA steel plate for pipelines API 5L X80. The purpose was to better understand the MA constituent, explore the strain-induced martensitic transformation (SIMT) and austenitic decomposition by heat treatment with emphasis on their magnetic behavior. The transformation was accompanied by magnetic polarization measurements, compared with the mass density and hardness. Plastic deformation has changed the magnetic polarization and the mass density of the steel sample in a manner consistent with the elimination of metastable retained austenite. The data obtained show the volumetric expansion density of about 0.13%. If 4% is the expansion due to martensitic transformation, the amount of retained austenite of the original material was 3%, meanwhile the volume fraction of retained austenite by VSM resulted in 2.

Key words: Magnetic polarization; Mass density; API X80; Retained austenite.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Mecânico, mestrando da Universidade do Estado de São Paulo, S. Paulo, SP, Brasil.

³ Prof. Livre docente da Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo.

⁴ Prof. Titular do Centro Universitário da FEI, S. B. do Campo, SP, Brasil.

⁵ Prof. Titular da Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo, S. Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de acompanhar a microestrutura e a variação dimensional dos produtos feitos de ferro contendo austenita retida (γ_r), através de medidas indiretas ditas de simples aquisição e contextualizar este aos estudos existentes, são o escopo deste trabalho.

A indústria de petróleo e gás é naturalmente conservadora na seleção de materiais para tubulação, pois os acidentes por desempenho insuficiente costumam resultar em danos desastrosos. Surgido o desafio, a possibilidade de produzir aços mais sofisticados para a indústria nacional vem se realizando gradativamente. Um exemplo são os aços ditos *Alta Resistência Baixa Liga* (ARBL), seus altos valores de limite de escoamento são obtidos por meio do refino do *tamanho de grão* (TG), precipitação, subestrutura de discordâncias, solução sólida e envelhecimento com deformação.⁽¹⁾ Essas propriedades são alcançadas através do controle rigoroso dos elementos de liga e do processo ao qual o material será submetido.

A padronização utilizada em gasodutos provém do American Petroleum Institute (API) que utiliza a especificação 5L,⁽²⁾ qual objetiva detalhar as linhas de transmissão de gás e petróleo.

Até o ano de 2010 foi muito pequeno o uso comercial de aços do tipo ARBL API 5L X80 nos gasodutos brasileiros. Uma das razões para sua utilização restrita foi a falta de equipamento de controle de velocidade de resfriamento nas siderúrgicas brasileiras. Esse obstáculo está sendo superado com a introdução de novo maquinário, mas enquanto não havia disponibilidade deste equipamento, a Usiminas fez experimentos de obtenção desse material⁽³⁾ combinando redução do TG por meio das taxas de resfriamento disponíveis na usina, com a adição de teores de nióbio e outros elementos, que promovem o aumento do LE por endurecimento por precipitação de carbonitretos e aumentam a temperabilidade do aço, reduzindo a temperatura Ms, permitindo a retenção de austenita como constituinte MA.

É importante conhecer a quantidade e a estabilidade da austenita retida em um aço para acompanhar sua transformação após certos processos industriais e, assim prever variações dimensionais, ganho de propriedades magnéticas e dureza.

A quantidade de γ_r à temperatura ambiente aumenta como função da temperatura de austenitização, da velocidade de resfriamento e do teor de C.⁽⁴⁾ O constituinte MA,⁽⁵⁾ predominantemente com tamanho inferior a 2 μm , se localiza dentro das colônias de bainita (B) e em contornos de ferrita (α), porque na formação de ferrita e bainita ocorre partição de carbono para a austenita ainda não transformada, algumas regiões enriquecidas não se transformam em B, e no resfriamento acabam por se transformarem em MA.⁽⁶⁾

A austenita retida presente tem potencial para se transformar por tratamento térmico (por exemplo, revenimento e/ou sub-zero), ou, se for metaestável,⁽⁷⁾ mediante a deformação, como a exercida pelo processo UOE.

Há relatos da presença prejudicial de γ_r ,⁽⁸⁾ porém o mesmo trabalho diz ter encontrado relações benéficas plausíveis entre γ_r e conformabilidade. Recentemente, mais trabalhos⁽⁹⁻¹¹⁾ vêm encontrando relações consistentes entre quantidade de γ_r e propriedades mecânicas, propondo que a excelente combinação de resistência e ductilidade devem-se a SIMT e TRIP,⁽¹²⁻¹⁴⁾ devido a presença de γ_r .

Com base na hipótese de que a polarização magnética de saturação segue a lei das misturas e que a austenita dos aços dessa composição química é paramagnética, é possível estimar a fração volumétrica de austenita com base nessa propriedade.^(15,16) De forma similar, a medida da densidade de massa também

permite avaliar a fração de austenita, supondo um valor para a expansão volumétrica na transformação γ/α . Essas técnicas podem vir a ser úteis para a indústria. A presente pesquisa mediu a austenita retida residual do processo, para vários estágios de deformação e após dois tratamentos térmicos, revenimento e sub-zero, utilizando as propriedades magnéticas de polarização magnética e os resultados confrontados com densidade hidrostática e dureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

2.1 Material

O aço estudado microligado ARBL para tubos API 5L X80 tem sua composição apresentada na **Tabela 1**. A composição química desse material foi reconhecida por Gonzalez⁽³⁾ em seu trabalho, assim como as microestruturas que o compõe, sendo: ferrita poligonal (α_p), ferrita quase-poligonal (α_q), ferrita (α) granular refinada, além de colônias de bainita (B) alotriomórfica em forma de banda, acompanhadas de ilhas de constituinte MA.

Tabela 1. Composição química do aço classe API 5L X80 produzido pela USIMINAS. Elementos e abaixo sua quantidade em porcentagem peso. CE é a quantidade de carbono equivalente, TG é o tamanho de grão, LE e LR, são os limites de escoamento e resistência, respectivamente

Fe	C	Si	Mn	Nb + Ti + V		Cr	CE	LE (MPa)
97,277	0,068	0,193	1,830	0,104		0,189	0,197	562
Co	Al	P	S	Cu	Ni	Mo	TG (μ m)	LR (MPa)
0,019	0,024	0,019	0,003	0,012	0,017	0,245	5,1	722

2.2 Processo

O aço teve a solidificação realizada através de lingotamento contínuo, de onde foram obtidas placas grossas que foram reaquecidas (1.250°C/ 250 min) e laminadas TMCR até a espessura de 19 mm.

O processo TMCR consiste em aplicação de calor e deformação simultaneamente para alterar a forma e refinar os grãos até se atingir as propriedades desejadas na chapa, assim, aperfeiçoam-se as propriedades mecânicas do material com o controle da recristalização, crescimento de grão e precipitados sobre a microestrutura. O mesmo processo compreendeu forno entre 1.170 ~ 1.250°C para solubilização, a laminação de desbaste ocorreu entre 1.100 ~ 1.050°C, na região de recristalização da γ . A laminação de acabamento é abaixo da *temperatura de não recristalização* (T_{nr}), inicia-se em 740 ~ 710°C encerrando-se entre 690 ~ 680°C, resfriando até a temperatura ambiente. Após o resfriamento, a chapa seria conformada em tubo através do processo reconhecido como UOE.

2.3 Métodos Experimentais

O aço foi doado pela siderúrgica USIMINAS já como chapa de 1.500 x 500 x 19 mm. Desta chapa extraiu-se uma tira de 500 x 30 x 18,7 mm, a qual foi laminada em um duo-reversível a frio 5%, 10%, 15% e 20% de redução de área na FEI –SBC, e que após cada redução, foram extraídas algumas amostras para os testes de dureza, densidade hidrostática e polarização magnética. Dois tratamentos térmicos foram feitos, um revenimento a 300°C/ 2h e outro sub-zero, com o intuito de acompanhar a

transformação da γ_r e comparar com o estado como recebido e com cada deformação.

2.3.1 Extração das amostras

Foram retirados cubos de cada amostra através de corte por disco abrasivo e, destes, foram retirados por corte com disco diamantado agulhas de 1 x 1 x 5 mm e cilindros de dimensões 10 x 10 mm usinados em torno, para analisar a *polarização magnética* (J) e a densidade mássica, respectivamente, para cada estado de encruamento/ tratamento e comparar com o estado como recebido, conforme resume-se na **Tabela 2**. Os cilindros foram usinados no Departamento de Engenharia dos Materiais da Escola Politécnica da USP. Foi visado o centro da chapa na extração das amostras e as agulhas tiveram seu comprimento paralelo à direção de laminação da chapa.

Tabela 2. Forma, dimensões e métodos utilizados para medir a polarização e densidade das amostras de aço API X80

Amostra	Agulhas	Cilindros
Dimensões (mm)	1 x 1 x 5	10 x 10
Método	MAV	Densidade

2.3.2 Dureza

Para as medições de dureza à penetração foi usada a escala Vickers, mediu-se a dureza externa da chapa, assim como recebida, usando-se o durômetro Otto Wolpert-Werke do laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, com massa de 10 kg. Além disso, fôra realizado um perfil através da microdureza, de superfície à superfície, para todas as amostras, em busca de um gradiente de deformação, feito com o microdurômetro eletromecânico do departamento, marca ZWICK & CO com massa de 300 gramas e penetrador piramidal, após feita a preparação metalográfica das amostras.⁽¹⁷⁾ O perfil contou com 18 endentações de superfície a superfície, repetidas oito vezes, para se ter uma dureza média ao longo da espessura de cada amostra. A dureza foi obtida multiplicando uma constante pela carga usada, divididos pelas diagonais médias ao quadrado.

2.3.3 Densidade hidrostática

Para o cálculo da densidade de massa usou-se o método hidrostático, necessitando de uma balança analítica de incerteza mínima de $\pm 0,0001$ g., e o kit de densidade OHAUS. O procedimento começou com limpeza das amostras e porta amostra com álcool, para depois medir a massa seca e em seguida imersa em água, o que é conseguido imergindo o material suspenso por um fio porta amostra (com massa tarada pela balança) amarrado em um dispositivo ligado ao prato da balança, são necessária três repetições, no mínimo, de cada medida. A densidade será calculada conforme a **Equação 1**, onde m_s é o valor medido da massa seca, m_{im} é o valor da massa imersa e ρ_{H_2O} é a densidade da água na temperatura do ensaio. As amostras medidas foram os cilindros, estes têm dimensões típicas de 10 x 10 mm e massa típica de 6,3g. Cada medida foi repetida no mínimo seis vezes.

$$\rho_{amostra} = [m_s / (m_s - m_{im})] * \rho_{H_2O} \dots \text{(Eq. 1)}$$

2.3.4 Polarização magnética

A técnica de polarização magnética foi realizada por meio de curvas de magnetização medidas por *Magnetômetro de amostra vibrante* (MAV).

A medida da curva de magnetização em MAV foi feita no Laboratório de Materiais Magnéticos do Instituto de Física da USP, em um instrumento modelo 4500, com eletroímã Walker modelo HR8. A bobina sonda de efeito Hall ligada a um gaussímetro Lakeshore modelo 450 enviam dados para o computador.

Para obtenção desses dados foram medidas trinta e quatro agulhas extraídas das amostras nos estados como-recebida, deformada em 4 condições, duas revenidas 300°C/ 2 h e duas tratadas sub-zero a -196°C. O instrumento mede a magnetização específica, a partir da qual se calcula a polarização magnética.

A porcentagem de austenita retida pode ser estimada com base no valor da polarização magnética segundo a **Equação 2**:

$$\% \gamma = 100 * (1 - J_s / J_{s \text{ máx}}) \dots (\text{Eq. 2})$$

Onde J_s é o valor da polarização magnética de cada amostra com fases não magnéticas, como a austenita retida, e o $J_{s \text{ máx}}$ é o valor medido na condição que se supõe ter eliminado a austenita retida em função da transformação $\gamma_r \rightarrow \alpha M$.

2.3.5 Tratamentos térmicos

O revenimento e sub-zero devem transformar a austenita em seus produtos, aumentando o valor de polarização. Através da **Equação 2** será possível determinar a sua quantidade inicial.

2.3.5.1 Revenimento

A literatura prevê que a austenita retida seja totalmente transformada por tratamento térmico de revenimento a 300°C/ 2 h. O revenimento foi realizado em um forno Mufla a 300°C /2 h, com o propósito de transformar a austenita presente como constituinte MA, obtendo os maiores valores de J para então, determinar a quantidade de γ_r no X80 na condição como-recebido.

2.3.5.2 Sub-zero

Este tratamento foi feito em nitrogênio líquido, a - 196°C por 3 horas, com o intuito de ultrapassar a temperatura M_f desse aço, assim transformando a γ_r presente e, portanto, obtendo maiores valores de J do que na condição como-recebido.

3 RESULTADOS

As amostras foram identificadas com números, o primeiro pertinente ao conjunto de amostras (79), seguido da redução de área sofrida (0, 5, 10 etc). As letras quantificam as amostras.

3.1 Dureza

A dureza na superfície superior da amostra como-recebida é ligeiramente maior que a do centro da chapa. Isso pode ser explicado pela observação feita em *microscópio*

óptico (MO), que próximo às superfícies a estrutura de grãos de ferrita têm discreta redução no TG em relação ao centro da amostra. A dureza superficial do X80 como-recebido é por volta de 230 HV, enquanto no centro é por volta de 220 HV. A **Tabela 3**

mostra o perfil de dureza médio obtido de superfície a superfície.

Tabela 3. Dureza média de todas as amostras, de superfície à superfície.

Espessura (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Média
Amostra																			
79-0 (HV)	230	227	217	213	213	216	218	224	220	220	214	218	216	213	217	227	224	229	220
79-5 (HV)	246	244	241	244	238	237	233	235	238	240	237	238	237	238	240	243	242	246	240
79-10 (HV)	255	252	254	260	260	251	250	246	246	247	248	246	251	249	247	247	244	248	250
79-15 (HV)	276	275	274	273	267	270	270	262	265	259	258	257	259	257	263	260	273	275	266
79-20 (HV)	277	275	275	271	270	265	264	265	275	270	271	271	270	270	275	272	270	276	271

3.2 Densidade Hidrostática

Para o cálculo da densidade usaram-se os cilindros de 10 x 10 mm, mediram-se os valores de massa seca, massa imersa e os resultados finais apresentam-se na **Tabela 4**. O maior desvio foi de 0,1%.

Tabela 4. Densidades mássicas das amostras

Densidades usando as médias	$\rho_a 79-10 = 7,8398$	g/cm^3 .
$\rho_a 79-0 = 7,8500$	g/cm^3 .	$\rho_a 79-15 = 7,8399$
$\rho_a 79-5 = 7,8455$	g/cm^3 .	$\rho_a 79-20 = 7,8401$
	g/cm^3 .	

3.3 Polarização Magnética

3.3.1 Resultados obtidos com mav do IFUSP

A curva de magnetização (**Figura 1**), mostra que os valores de $+J_s$ e $-J_s$, representados pelas extremidades da curva, aumentam conforme aumenta-se a deformação. Têm-se dois valores de J, um positivo e outro negativo, daí a média, e se devem a polarização em duas direções distintas de aplicação do campo externo (H_{ext}) ao qual a agulha foi exposta. O número 79 tem função de identificação do conjunto neste trabalho, seguido do número que indica a redução de área sofrida pela amostra, as letras indicam quantas agulhas foram medidas.

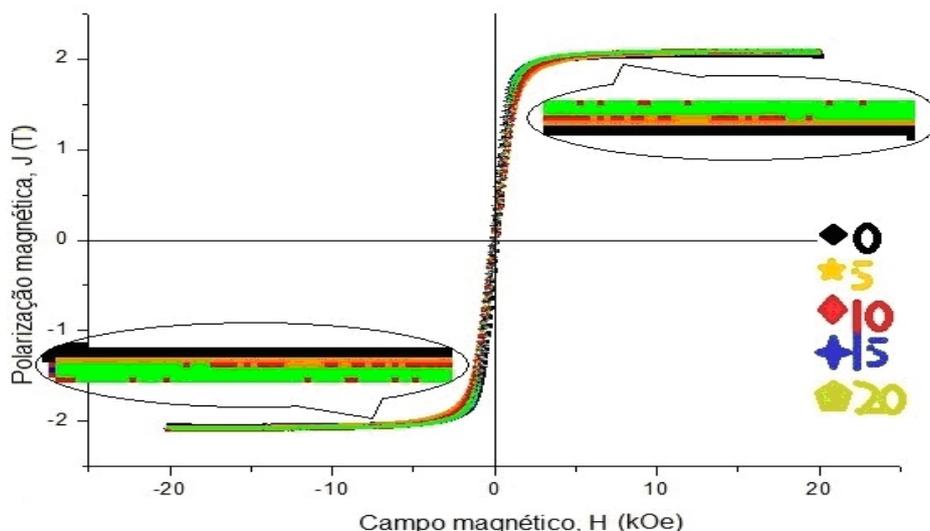


Figura 1. Curvas de magnetização, onde os números indicam a redução de área sofrida pelas amostras.

A Tabela 5 apresenta os dois maiores valores de J_s obtidos do MAV do Instituto de Física da USP, para cada agulha de cada amostra deformada.

Tabela 5. Polarização magnética a 18 kOe para as agulhas medidas no IF – USP

Polarização	0a	0b	0c	0d	0e	0f	Média	Desvio
(+ J_s) [T]	2,044	2,050	2,029	2,034	2,034	2,034	2,044	0,010
(- J_s) [T]	2,040	2,045	2,046	2,057	2,056	2,056		
Amostra	5a	5b	5c	5d	5e	5f		
(+ J_s) [T]	2,069	2,075	2,075	2,061	2,052	2,049	2,069	0,010
(- J_s) [T]	2,065	2,073	2,084	2,071	2,077	2,076		
Amostra	10a	10b	10c	10d	10e	10f		
(+ J_s) [T]	2,096	2,104	2,054	2,052	2,061	2,062	2,079	0,020
(- J_s) [T]	2,092	2,099	2,069	2,065	2,100	2,096		
Amostra	15a	15b	15c	15d	15e	15f		
(+ J_s) [T]	2,098	2,098	2,068	2,027	2,077	2,077	2,081	0,022
(- J_s) [T]	2,089	2,092	2,091	2,061	2,101	2,098		
Amostra	20a	20b	20c	20d	20e	20f		
(+ J_s) [T]	2,087	2,106	2,053	2,044	2,086	2,096	2,088	0,021
(- J_s) [T]	2,081	2,096	2,098	2,084	2,113	2,108		

3.4 Tratamentos Térmicos

3.4.1 Revenimento

As amostras revenidas do X80 e ensaiadas na presente pesquisa, têm sua polarização magnética conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Polarização magnética a 18 kOe das agulhas revenidas, medidas no MAV do IFUSP

IFUSP	REV. A	REV. B	Média	Desvio
J (T)	2,056	2,078	2,089	0,028
(-) J (T)	2,099	2,122		

3.4.2 Sub-zero

Uma amostra do X80 como recebido (79-0) e uma 15% deformada, após 3 horas imersas em nitrogênio líquido, tiveram agulhas (1 x 1 x 5 mm) extraídas e medidas suas polarizações magnéticas no MAV do IFUSP, conforme pode ser visto na **Tabela 7**. A última linha apresenta os resultados destas mesmas amostras sem o tratamento sub-zero para comparação.

Tabela 7. Polarização magnética do X80 após tratamento a -196°C / 3h nas condições como recebido (79-0) e 15% deformado

IFUSP	79-0	79-15
J (T)	2,022	2,063
(-) J (T)	-2,042	-2,103
Média	2,032	2,083
Sem sub-zero	2,044	2,081

4 DISCUSSÃO

4.1 Comparação Entre Polarização Magnética e Densidade

Como pode ser visto na **Figura 2**, a polarização magnética cresce com a deformação plástica e a densidade diminui. A maior mudança se dá até 10% de deformação. Essa variação confirma a hipótese de que a deformação plástica promove a transformação da austenita retida do MA, não magnética, em martensita magnética.

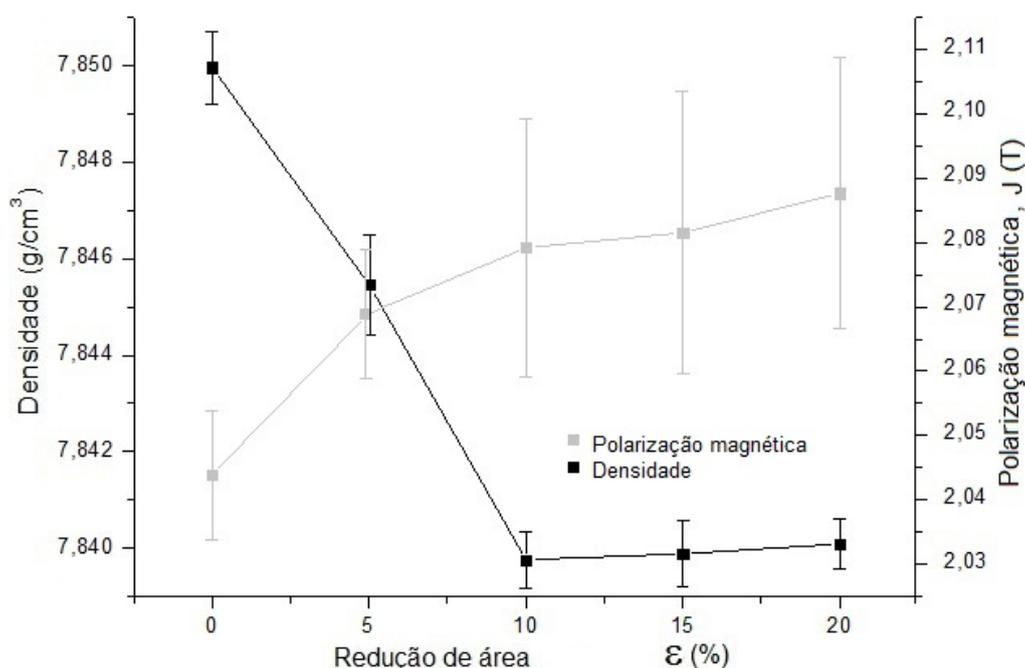


Figura 2. Densidade e polarização magnética de saturação em função da deformação.

A **Figura 2** também indica a diminuição dos valores de densidade conforme a austenita se transforma, a explicação disso é por causa das diferenças no fator de empacotamento das fases envolvidas. A austenita CFC possui fator 0,74 enquanto a

fase nova possui o valor de 0,68, esse menor valor implica em menos átomos por célula unitária. As medidas de densidade hidrostática indicam dilatação de 0,13%. Supondo que a expansão da transformação martensítica seja de 4%, a seguinte relação é válida: $0,13 = 0,04 \cdot 3,25$. Ou seja, a medida de densidade indica que a quantidade de austenita retida no aço como recebido seja de 3,2%.

Na série de medidas feitas na presente pesquisa, o menor valor de polarização magnética de saturação (J_s) encontrado foi do material como recebido, sendo 2,044 T. O maior foi 2,089 para a amostra revenida, seguida da amostra 79-20, com 2,088 T. Substituindo este valor na mesma equação, temos:

$$\% \gamma = 100 \cdot (1 - J_s / J_{s \text{ máx}}) = 100 \cdot (1 - 2,044 / 2,088) = 2,1\%$$

Ambos os casos mostraram aumento da saturação, compatível com a decomposição da austenita não magnética para uma fase magnética. Deste modo, é possível supor que a deformação plástica do processo UOE seja suficiente para provocar transformação de fase, pelo menos junto às superfícies interna e externa, onde a deformação é maior.

4.2 Deformação e Dureza

O maior refino de grão visto nas superfícies deve-se a maior energia armazenada durante a deformação de acabamento (abaixo de T_{nr} e acima de Ar_3), proporcionando uma recristalização de mais núcleos por volume de material nessas regiões, o que limita o crescimento do TG. O refino do TG ferrítico se deve ao aumento da velocidade de resfriamento a partir do campo austenítico, criando condições para ocorrência de ferrita acicular (α_w) e bainita (B), microestruturas que reduzem o TG ferrítico.

Para o gráfico da dureza em função da espessura (**Figura 3**) se confirma às observações de GONZALEZ³, ou seja, há pequena diferença de dureza entre as superfícies.

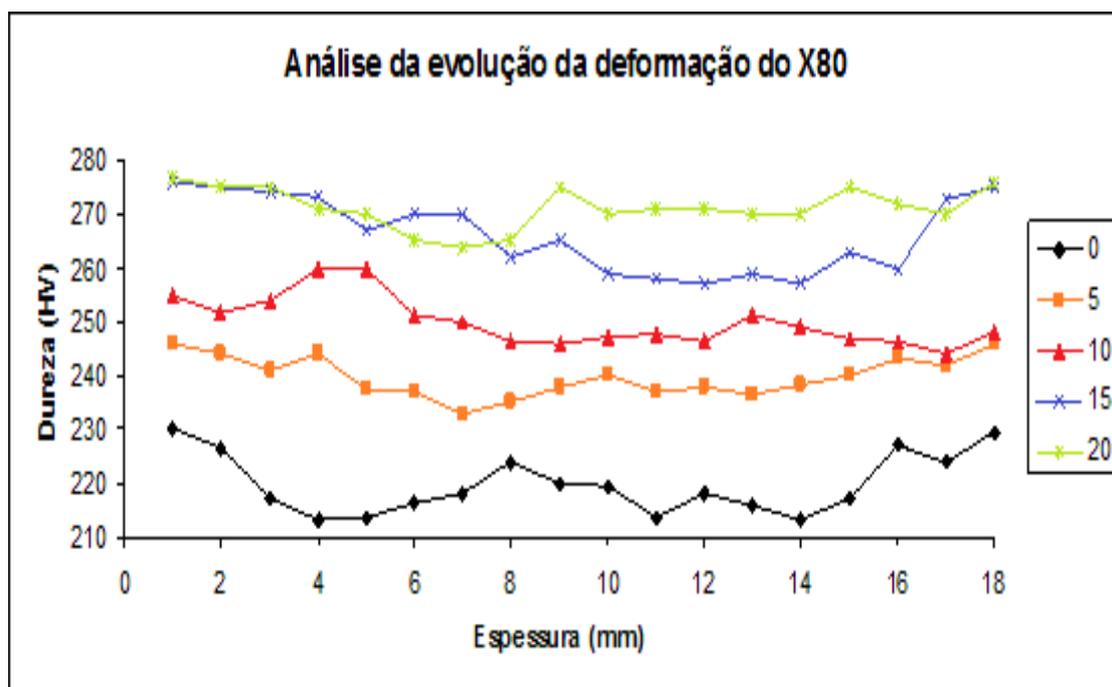


Figura 3. Análise da mudança de dureza sofrida pelo X80 devido às deformações sofridas na laminação que chegou até 20% em redução de área.

Deformações plásticas crescentes produziram encruamento, como era de se esperar, mas sem acentuar a diferença entre superfície e centro. Portanto, não se pode dizer que a laminação a frio gerou um gradiente de dureza no material e, com isso, pode-se supor que a deformação foi homogênea ao longo da espessura. Os resultados não permitem discriminar a contribuição do encruamento do eventual aumento de dureza causado pela transformação induzida por deformação.

4.3 Tratamentos Térmicos

Não houve alteração na polarização magnética destas amostras (sub-zero), a transformação martensítica não ocorreu na amostra como recebida, isso poderia ser explicado pela forte estabilização da austenita no constituinte MA, já que é sabido que quanto menos austenita retida houver mais difícil é sua transformação. O revenimento leva a decomposição da austenita em produtos de transformação dependentes de difusão, provavelmente bainita a 300°C. Outro fator pode ser que com a precipitação de carbonetos, a redução do teor de C na austenita elevou a temperatura Ms, permitindo a formação de martensita “fresca” no resfriamento pós-revenimento.

5 CONCLUSÃO

A deformação plástica entre 5% e 20% alterou a saturação magnética e a densidade mássica da amostra de aço API X80 de forma compatível com a eliminação da austenita retida metaestável.

Pela variação encontrada tanto na saturação magnética quanto na densidade, não pode se afirmar que a deformação elimina totalmente a austenita retida, mas a transformação martensítica induzida por deformação é capaz de transformar essa fase paramagnética em ferromagnética, resultando em aumento das dimensões do material e de sua polarização magnética.

A fração volumétrica das fases não magnéticas em um aço pode ser quantificada através de medidas magnéticas, como se reconheceu através das medidas feitas e contextualizadas em relação à literatura.

O método de densidade hidrostática é sensível ao procedimento, mas foi capaz de confirmar expansão volumétrica de aproximadamente 0,13%. A quantidade de inicial de austenita medida pelo método hidrostático foi de 3,2%, enquanto pelo método de polarização magnética foi de 2,1%. O método hidrostático dependeu da suposição de 4% de expansão devido à transformação.

Não foi constatado um gradiente de dureza devido à deformação a frio.

Agradecimentos

Aos colaboradores Bruno Antunes, Rubens, Ramon, Sérgio Romero, Israel, Danilo, a todos do Departamento de Metalurgia e Materiais da USP e IPT que participaram diretamente e indiretamente deste.

A. A. Capes pelo financiamento ao estudo.

H. G. e F. J. G. L. agradecem ao CNPq.

6 REFERÊNCIAS

- 1 Instituto Nacional dos Distribuidores de Aço. Disponível em: www.inda.org.br acesso 28 jul 2011.
- 2 American Petroleum Institute. Disponível em: <http://www.api.org>. Acesso em 15 jul 2011.
- 3 GONZALEZ, R. M. F. Estudo da transformação durante o resfriamento contínuo e da microestrutura do aço microligado X80 utilizado na construção de tubos para transporte de gás natural e petróleo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 158, 2008.
- 4 HARRIS, W. J.; COHEN, M. Stabilization of the austenite-martensite transformation. *Metals Technology*, p. 447-470, 1948.
- 5 SILVA, M. C. Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas de J-R para avaliação da tenacidade a fratura. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 96, 2004.
- 6 GORNI, A. A.; BRANCHINI, O. A produção de chapas de aço bifásico. *Máquinas e metais*, 1989.
- 7 COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P. R. Aços e ligas especiais. *Eletrometal*. São Paulo, p. 305 – 307, 1988.
- 8 MATSUMURA, O; et al. Effect os retained austenite on formability of high strength sheet steels(Caderno – Effects of γ_r on formability of high strength sheet steels. *ISIJ Internacional*, v. 32, n.10, p. 1110-1116, 1992.
- 9 HUANG, H.; MATSUMURA, O. e FURUKAWA, T. Retained austenite in low carbon, manganese steel after intercritical heat treatment. *Material Science and Technology*, v.10, p. 621-626,1994.
- 10 HAIDEMENOPOULOS, G. e PAPANIMITRIOU, K. Retained austenite and mechanical properties in bainite transformed low alloy steels. *Steel Research* 66, n. 10, p. 433-438, 1995.
- 11 ANNIBAL, E. G.; et al. Desenvolvimentos recentes em aços trip aplicáveis na indústria automobilística: Uma revisão. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Paper CRE05-CM02, p. 6, 2005.
- 12 WASILKOWSKA, A.; et al. Microstructure and texture changes in a low-alloyed TRIP aided steel induced by small plastic deformation. *ISIJ Internacional*, v. 46, n. 2, p. 302 – 309. 2006.
- 13 SHERIF, M. Y.; et al. Stability of retained austenite in TRIP – assisted steels. *Materials Science and Technology*, v. 20, n. 3, p. 319 – 322. 2004.
- 14 WASILKOWSKA, A.; et al. Microstructure and tensile behaviour of cold – rolled TRIP - aided steels. 11th International scientific conference. *Achievements in mechanical & materials engineering*. p. 601 – 606. 2002.
- 15 BERTI NETO, H., LANDGRAF, F.J.G., FUKUHARA, M., TSCHIPTSCHIN, A.P., GOLDENSTEIN, H., "Comportamento magnético do aço ABNT 4340 temperado e revenido." In: *60^o Congresso Anual da ABM*, Belo Horizonte, Anais do 60. Congresso Anual da ABM, São Paulo, 005, pp. 1696-1706, 2005.
- 16 AJUS, C.; TAVARES, S. S. M.; Silva, M. R.; CORTE, R. R. A. Magnetic properties and retained austenite quantification in SAE 4340 steel. *Revista Matéria (Rio J.)* v. 14, n. 3, Rio de Janeiro, 2009.
- 17 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens Current edition approved July 1, 2007. Published September 2007. Originally approved in 1921. Last previous edition approved in 2001 as E 3 – 01.