

# ESTUDO DO EFEITO DA RECUPERAÇÃO E RECRISTALIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MÁGNÉTICAS E MECÂNICAS EM AÇOS ELÉTRICOS<sup>1</sup>

Thomas Seiji Pascoto Nishikawa<sup>2</sup>

Daniel Rodrigues Junior<sup>3</sup>

Fernando José Gomes Landgraf<sup>4</sup>

André Lopes Sereno<sup>5</sup>

Marcelo Ferreira Lucas<sup>6</sup>

## Resumo

Este trabalho compreende um estudo da variação das propriedades magnéticas e mecânicas de aços elétricos devido ao efeito da recuperação para amostras laminadas a frio com 5% e 10% de redução e depois recozidas a temperaturas de 300°C, 400°C e 500°C por diversos tempos. O foco do trabalho foi o comportamento das curvas de parcela recuperada comparando seus comportamentos mecânicos e magnéticos.

**Palavras-chave:** Recuperação; Aços elétricos; Deformação.

## STUDY OF THE EFFECT OF THE RECOVERY AND RECRYSTALLIZATION ON MECHANIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF ELECTRICAL STEELS

### Abstract:

This paper studies the change in magnetic and mechanical properties in electric steels due to recovery for cold rolled samples with 5% and 10% reduction that were then annealed at 300°C, 400°C and 500°C for varying times. The paper focus on the behavior of the recovery portion curves comparing the mechanical and magnetic behavior.

**Key words:** Recovery; Electric steel; Deformation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>2</sup> Engenheiro de materiais. Mestrando em engenharia de materiais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica (Poli), Universidade São Paulo (USP), São Paulo SP.

<sup>3</sup> Mestre em engenharia de materiais. Doutorando em engenharia de materiais. Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Poli, USP, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Doutor em engenharia de materiais (Poli-USP), Professor Doutor. Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Poli, USP, SP, Brasil.

<sup>5</sup> Mestre em engenharia metalúrgica e de materiais (Poli-USP), Desenvolvimento de Qualidade e Produto, Brasmetal Waelholz, São Bernardo do Campo SP, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro metalurgista e de materiais (FEI), Supervisor de SGI e Melhoria Contínua, Brasmetal Waelholz, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Na fabricação de aços elétricos evita-se que haja concentrações elevadas de carbono, pois esse elemento é responsável pelo aumento das perdas como mostrado por Buono e Marra.<sup>(1)</sup> Para isso as bobinas de aço elétrico geralmente passam por tratamento térmico de descarbonetação. No entanto, quando pensamos em aplicações para aços percebemos que conforme reduzimos o teor de carbono existe uma redução das propriedades mecânicas e o aço tende a ficar mais maleável. Esse fato resulta na limitação de usos possíveis para os aços elétricos, e quando pensamos, por exemplo, em motores elétricos é possível ver essa limitação. Temos também o caso dos alternadores automobilísticos que apresentam rendimento baixo, por volta de no máximo 65%.<sup>(2)</sup> Esse rendimento é a capacidade do alternador de transformar o movimento do eixo em energia elétrica (Figura 1).

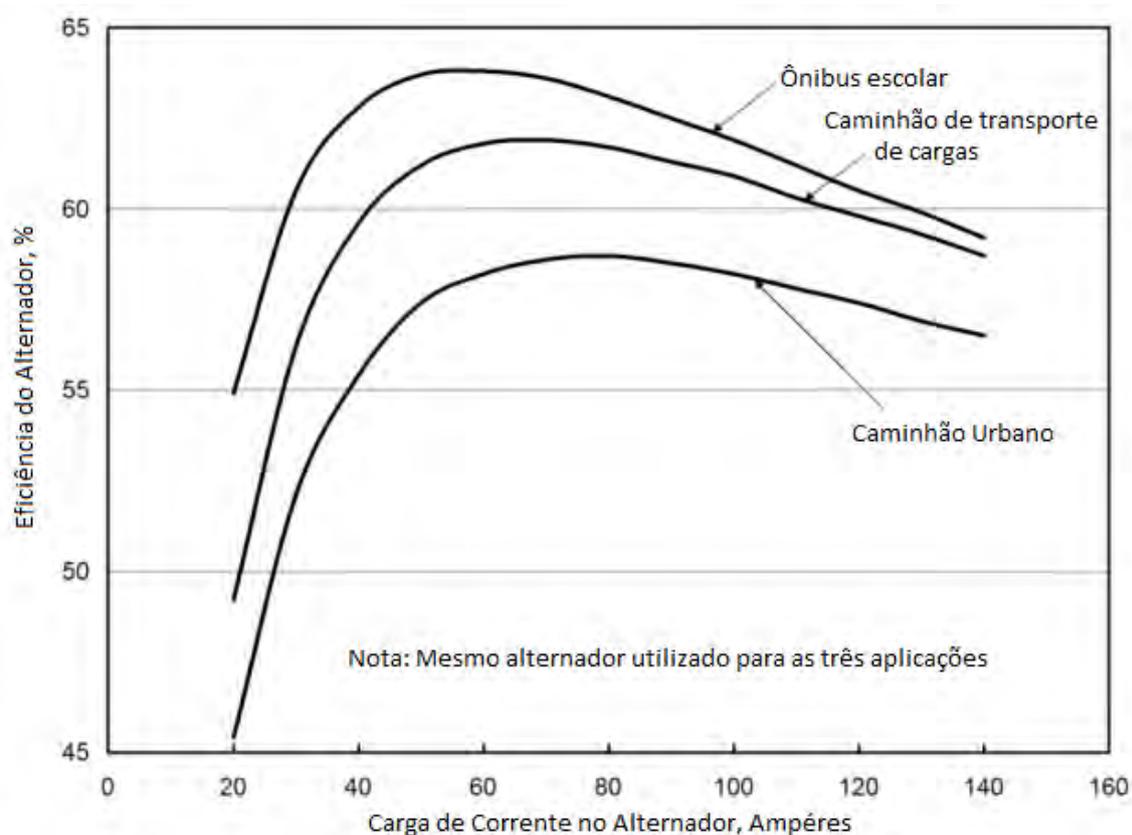


Figura 1. Variação da eficiência do alternador em função da aplicação e da corrente aplicada.

Esse baixo rendimento ocorre devido à diversos fatores dentre eles vale ressaltar que durante o processo de fabricação os estatores sofrem deformação a frio o que será um dos fatores que resulta em um aumento das perdas. Além disso, o processo de fabricação dos estatores exige valores de limite de escoamento e de resistência mínimos para a utilização desses aços nessa indústria.

Pode-se prover melhora das propriedades mecânicas fornecendo-se pequena quantidade de deformação plástica. No entanto, mesmo pequenas deformações (inferiores a 10%) causam considerável deterioração das propriedades magnéticas apresentadas pelo material.<sup>(2)</sup> Motivados pela necessidade de produção de aços com boas propriedades mecânicas e magnéticas, estudos foram conduzidos para avaliar o efeito do tratamento térmico de recuperação sobre essas características.

O fenômeno da recuperação consiste da diminuição da energia acumulada resultante da deformação do material,<sup>(3)</sup> esse evento ocorre com recozimento em temperaturas acima de 300°C para aços em geral. Essa diminuição de energia se dá em razão da reorganização e aniquilação dos átomos contidos nas estruturas de discordâncias contidas no material.<sup>(4)</sup>

Tradicionalmente, a recuperação é estudada visando entender seu efeito nas propriedades mecânicas. Por esse motivo a fração recuperada geralmente é calculada em função da variação do limite de escoamento do material<sup>(1)</sup> No entanto, Martinez-de-Guerenu, Arizti e Gutierrez<sup>(5)</sup> propõe calcular a fração recuperada pela variação do valor do campo coercivo em relação aos valores do campo coercivo do material recristalizado e deformado sem tratamento térmico em aços elétricos. Dessa forma, o presente trabalho visa a produção de novos dados que permitam a avaliação da evolução das magnéticas após tratamento térmico de recuperação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

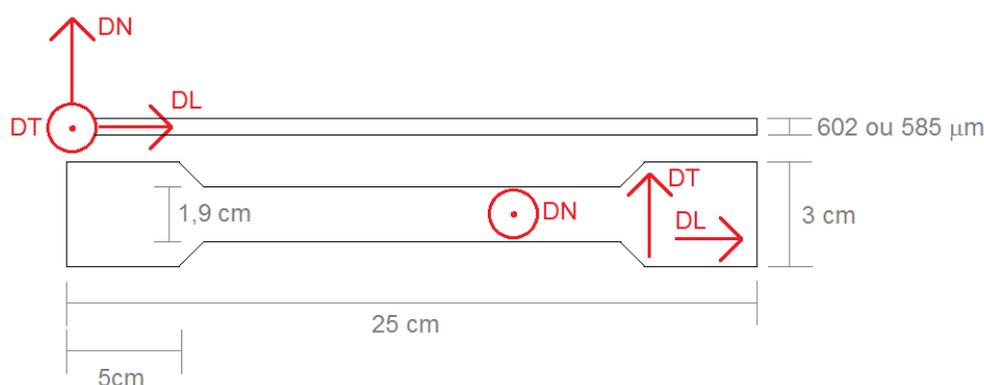
### 2.1 Material Utilizado

O material de partida para a realização desse trabalho foi extraído de uma única bobina de aço elétrico de grão não orientado, gentilmente cedido pela Brasmetal Waelzholz. A composição química do material é dada pela Tabela 1. O material, como recebido, passou por laminação a frio sofrendo reduções de 5% e 10% (*skin pass*) o que equivale a deformações reais de 2,9 e 5,8% respectivamente, além disso, ele apresenta densidade 7.781 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 1.** Composição química do material sob estudo

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni
0,0028	0,51	0,034	0,0048	0,773	0,255	0,007	0,021	0,003

A bobina foi cortada com o uso de guilhotina para a extração de dois tipos de corpos de prova. Foram produzidas chapas em forma de tiras com dimensões 30x3 cm com o comprimento paralelo à direção de laminação. Dessas chapas foram extraídos corpos de prova para a medida das propriedades magnéticas e ensaios mecânicos. Este último grupo ainda foi submetido a corte por puncionamento para dar origem a amostras semelhantes à descrita esquematicamente pela Figura 2.



**Figura 2.** Corpo de prova para o ensaio de tração.

Após o corte e preparação das amostras, elas foram encaminhadas (juntamente com os corpos de prova para ensaio de tração) para o recozimento. Essa etapa tem como objetivo a produção de amostras com diferentes tempos e temperaturas de recozimento de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 2. Assim foram produzidas para cada conjunto de parâmetros (tempo, temperatura e deformação) quinze chapas e três corpos de prova para tração.

**Tabela 2.** Parâmetros do tratamento térmico de recuperação  
*Temperatura (°C)*

<i>Tempo (minutos)</i>	300	400	500	700
30	X	x	X	x
60	X	x	X	x
90	X	x	X	

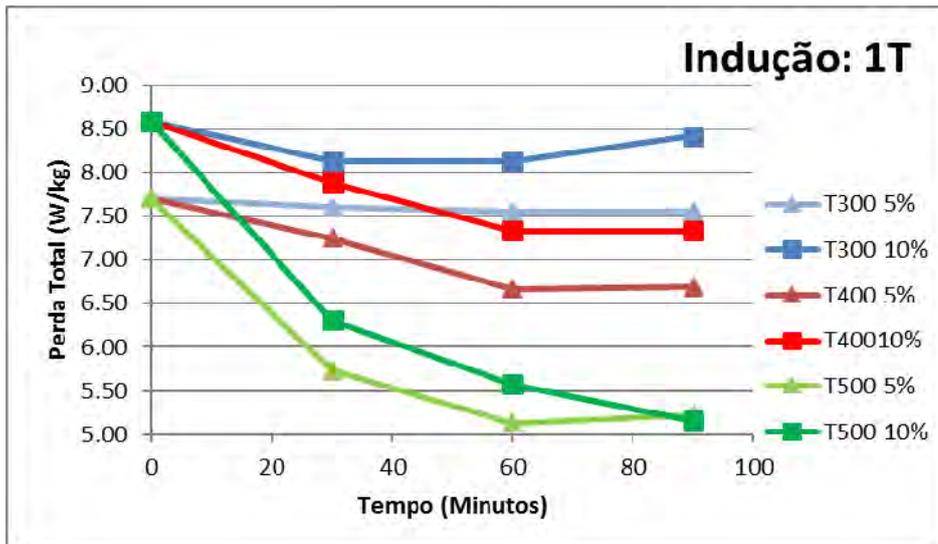
A caracterização magnética ocorreu por meio de um ensaio que determina a perda total em lâmina solteira. Usou-se o equipamento SOKEN (localizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT) e a magnetização se deu paralela à direção de magnetização e com frequência de excitação 60 Hz, foram medidas essas perdas para duas saturações 1T e 1,5T. Para avaliar a homogeneidade dessa propriedade ao longo do corpo de prova, foram tomadas cinco medidas em regiões distintas para cada corpo de prova.

Quanto às medidas mecânicas, as amostras sofreram ensaio de tração realizados na Brasmetal Waelholz para os quais foram obtidos os valores de limite de escoamento para as medidas de parcela recuperada mecânica, para a obtenção dessa medida foram realizados três ensaios para cada tempo/temperatura/deformação diferentes.

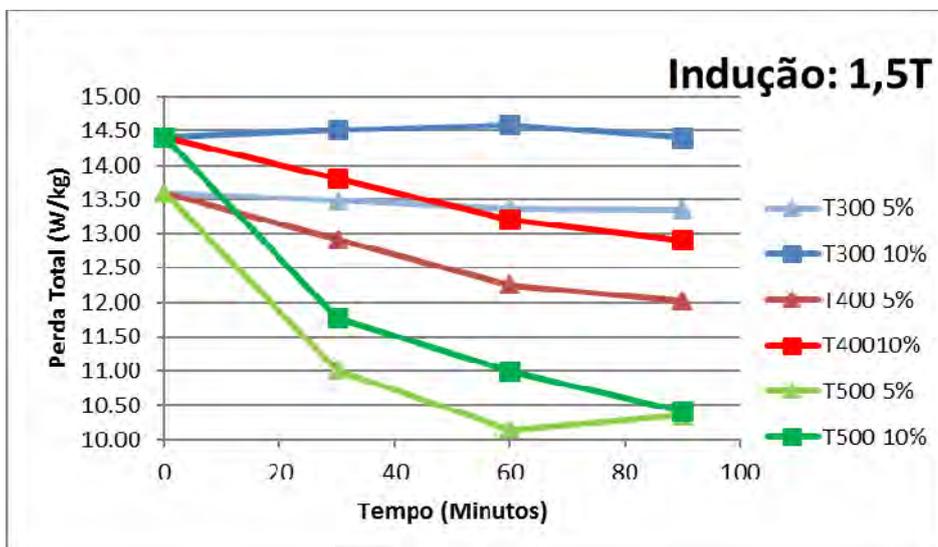
Finalmente observou-se a microestrutura das amostras para determinar se houve recristalização essa observação é muito importante pois devemos ter uma amostra completamente recristalizada. Essa necessidade se dá devido ao uso das medidas obtidas para essa amostra para a sua utilização na formula de parcela recuperada do material. Para garantir isso realizou-se metalografia utilizando microscopia óptica nas amostras tratadas a 700°C para 5% e 10% de redução, amostras essas que sofreram polimento e ataque químico de modo a possibilitar a observação da microestrutura do material.

### 3 RESULTADOS

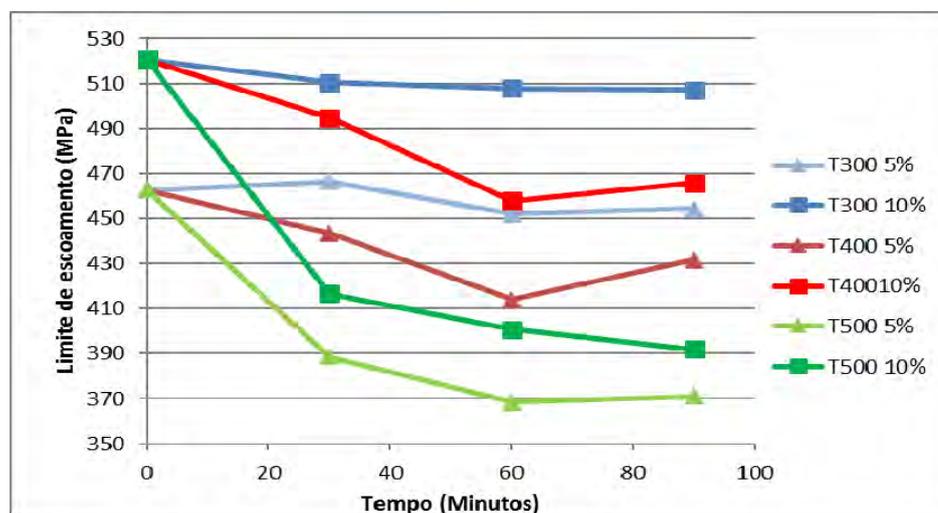
Pelos ensaios realizados foram obtidos os seguintes valores de perdas totais e limite de escoamento para as chapas para as induções máximas de 1T e 1,5T.



**Figura 3.** Gráfico dos valores de perdas totais medidos pelo tempo de recozimento para diversas temperaturas e reduções para indução de 1 tesla.



**Figura 4.** Gráfico dos valores de perdas totais medidos pelo tempo de recozimento para diversas temperaturas e reduções para indução de 1,5 tesla.



**Figura 5.** Gráfico dos valores de limite de escoamento medidos pelo tempo de recozimento para diversas temperaturas e reduções.

Para as amostras tratadas a 700°C obteve-se as seguintes medidas de perdas e de limite de escoamento.

**Tabela 3.** Propriedades do material tratado a 700°C

		<i>Perdas Totais 1T</i>	<i>Perdas Totais 1,5T</i>	<i>Limite de escoamento</i>
5%	700°C - 30 min	4,3 W/kg	8,9 W/kg	295 MPa
	700°C - 60 min	3,6 W/kg	8,1 W/kg	294 Mpa
10%	700°C - 30 min	2,8 W/kg	6,7 W/kg	243 Mpa
	700°C - 60 min	3,0 W/kg	7,2 W/kg	250 Mpa

Tendo em mãos os valores medidos pelo ensaio Soken e pelo ensaio de tração foram tirados os valores de desvio padrão de cada medida (Tabela 4).

**Tabela 4.** Valores calculados do desvio padrão para as medidas magnéticas e mecânicas

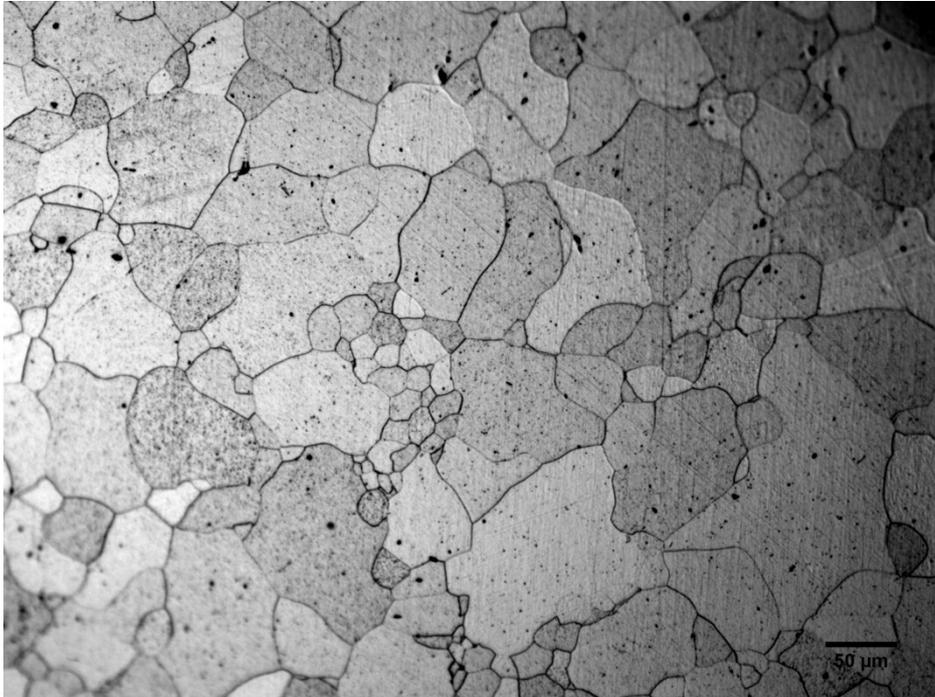
		5%			10%		
		Perda Total		Limite de Escoamento	Perda Total		Limite de Escoamento
		1T	1,5T		1T	1,5T	
<b>Sem Recozimento</b>		0.0691	0.1188	3.2146	0.0691	0.1188	6.4291
<b>300°C</b>	30min	0.1032	0.1888	2.0817	0.0526	0.1888	1.5275
	60min	0.0723	0.1205	4.3589	0.0723	0.1205	4.5092
	90min	0.0439	0.0618	6.6583	0.0439	0.0618	3.6056
<b>400°C</b>	30min	0.0822	0.1882	1.1547	0.0822	0.1882	6.4291
	60min	0.0811	0.2051	2.6458	0.0811	0.2051	11.2694
	90min	0.0698	0.1503	1.5275	0.0698	0.1503	3.7859
<b>500°C</b>	30min	0.0889	0.1101	5.0332	0.0889	0.1101	5.7735
	60min	0.1493	0.1955	2.0817	0.1493	0.1955	0.5774
	90min	0.1172	0.1665	2.6458	0.1172	0.1665	2.6458
<b>700°C</b>	30min	0.2332	0.3651	18.8237	0.2332	0.3651	2.6458
	60min	0.4059	0.7515	8.4853	0.4059	0.7515	4.5826

Como pode-se ver pela Tabela 4, temos que os valores calculados de desvio padrão obtidos pelas medidas são consideravelmente baixos comparados com os valores médios calculados. Por esse motivo foi escolhido não inseri-los nas curvas de modo a não poluir as curvas.

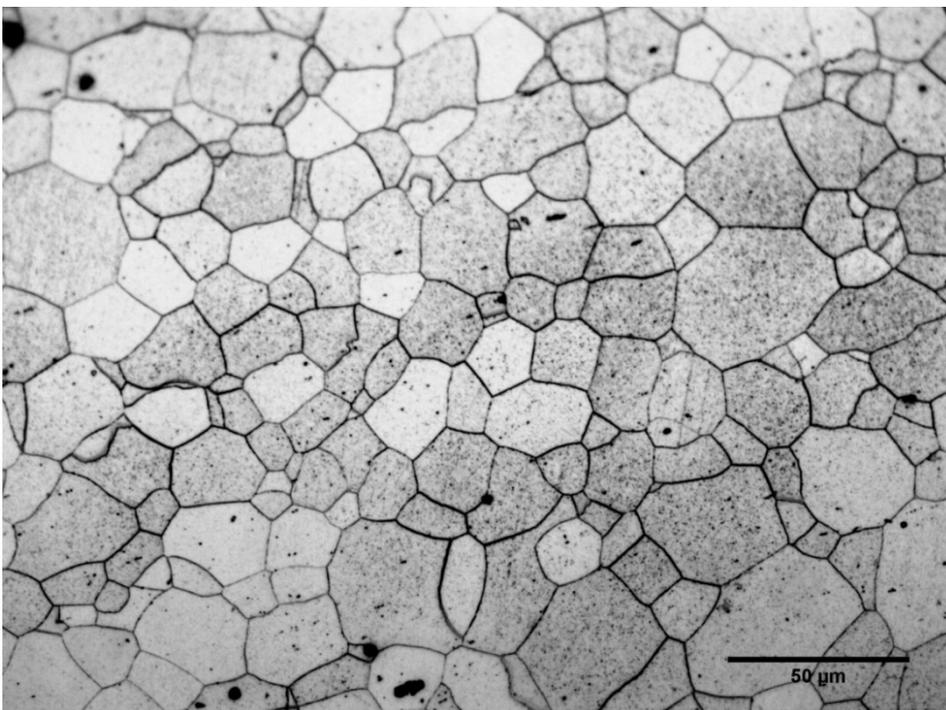
Tradicionalmente a recuperação é medida como tendo base a variação de alguma propriedade mensurável do material a ser estudado, com isso é possível obter um parâmetro do que ocorre no material a partir da fração recuperada.

Para as amostras realizou-se metalografias para observar se houve ou não variação na microestrutura em relação à microestrutura do material como recebido. As amostras foram lixadas e polidas e em seguida atacadas com solução de Nital 5% para que os contornos de grão fossem revelados. Calculando os tamanhos de grão pelo método do intercepto obteve-se valores de tamanho de grão de em média 14µm para as amostras sem recozimento e para as amostras tratadas à 300, 400 e 500°C com desvio padrão variando em torno de 1,5 µm, para as amostras tratadas à 700°C observa-se para as amostras tratadas à 30 minutos recristalização parcial para a amostra laminada com 5% de redução. Para as amostras tratadas à 700°C com 60 minutos para ambas as reduções e para a amostra tratadas à 700°C por

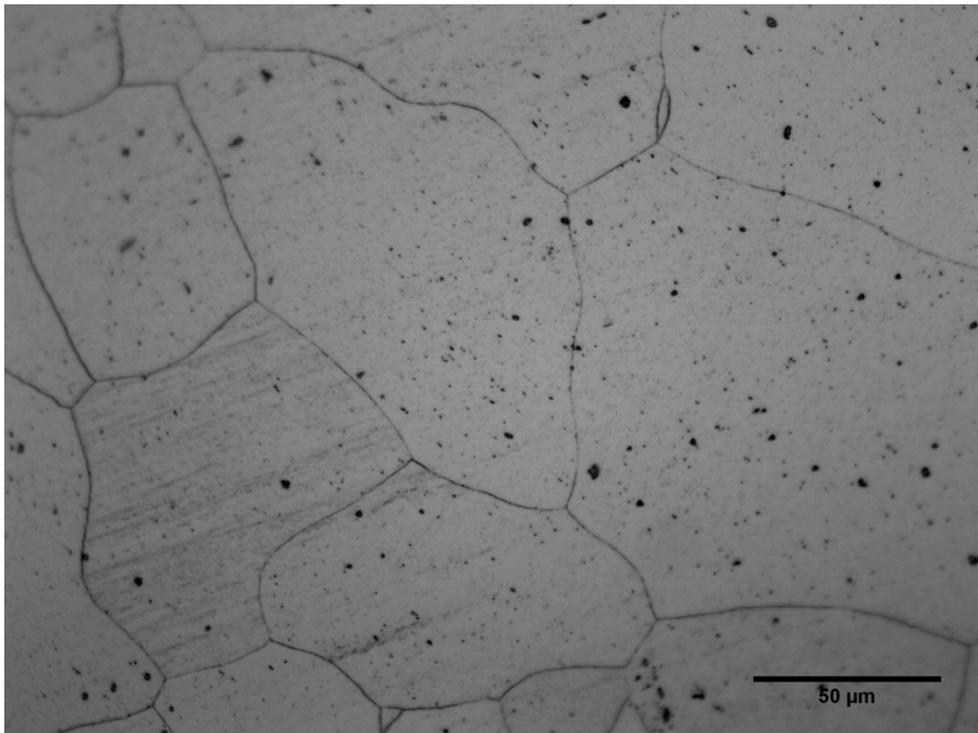
30 minutos com 10% de redução obtivemos tamanho de grão de  $42\mu\text{m}$  para a amostra com 5% de redução e tamanho de grão  $59\mu\text{m}$ , as amostras apresentaram desvio padrão por volta de  $4\mu\text{m}$ .



**Figura 6.** Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de  $700^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos com aumento de 200x



**Figura 7.** Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de  $500^{\circ}\text{C}$  por 60 minutos com aumento de 500x



**Figura 8.** Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 700°C por 60 minutos com aumento de 500x

Martinez-de-Guerenu, Arizti e Gutierrez<sup>(5)</sup> propõe calcular a fração recuperada pela variação do valor do campo coercivo em aços elétricos sabendo que o mesmo será proporcional a variação do limite de escoamento do material visto que a densidade de discordâncias será a mesma para ambos. Com essa relação foi estabelecida a Equação 1.

$$R = \frac{H_{c0} - H_c(T,t)}{H_{c0} - H_{cf}} \quad (1)$$

Para a qual R é a fração recuperada,  $H_c(T,t)$  é o campo coercivo para o material deformado recozido a uma temperatura e tempo específico, e  $H_{c0}$  é o campo coercivo do material deformado sem nenhum recozimento e é o campo coercivo do material completamente recristalizado. Utilizando o conceito análogo foi desenvolvido **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para contabilizar a porcentagem recuperada. Neste caso, porém generalizando para qualquer propriedade afetada pelo recozimento e não apenas campo coercivo.

$$R = \frac{P_0 - P(T,t)}{P_0 - P_f} \quad (2)$$

Onde P é a medida para um determinado tempo e temperatura e R' é a fração recuperada obtida a partir dessa propriedade. Neste estudo foram usadas perdas magnéticas totais (para frequência de 60 Hz) e limite de escoamento. Por meio da aplicação da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foram obtidos os gráficos das Figuras 9, 10 e 11.

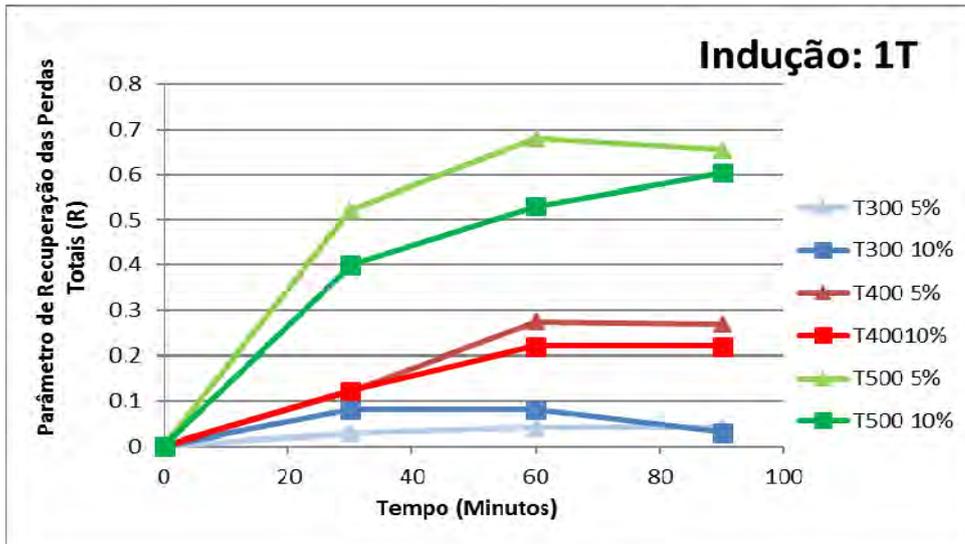


Figura 9. Gráfico dos valores de fração recuperada pelo tempo para diversas temperaturas e reduções para indução de 1 tesla.

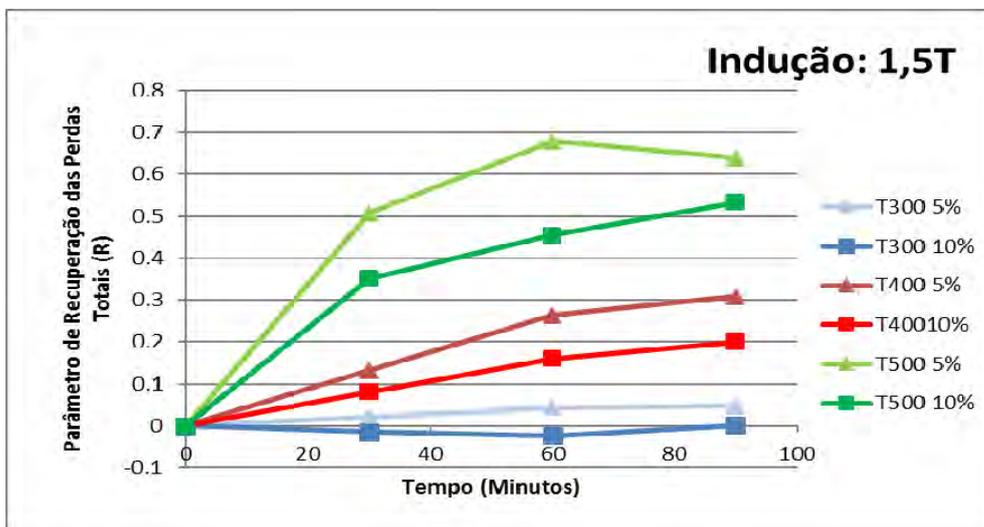


Figura 10. Gráfico dos valores de fração recuperada pelo tempo para diversas temperaturas e reduções para indução de 1,5 tesla.

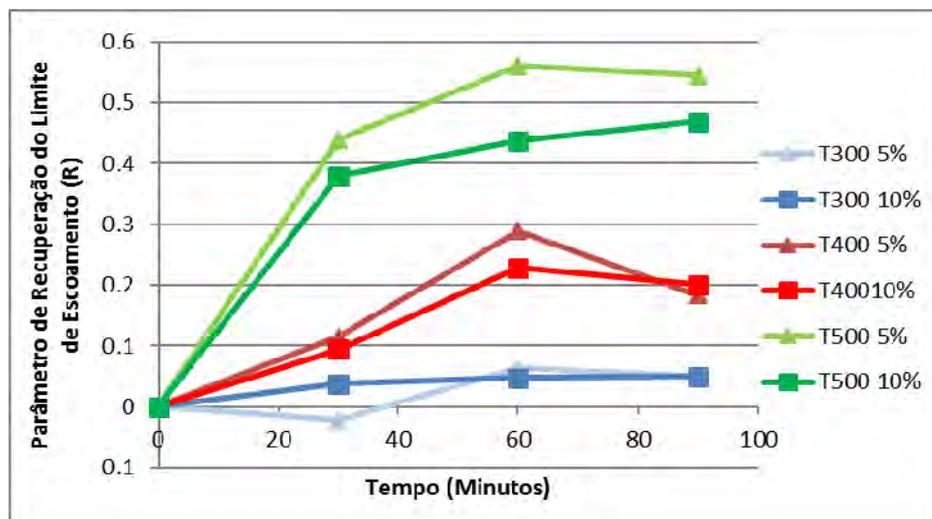


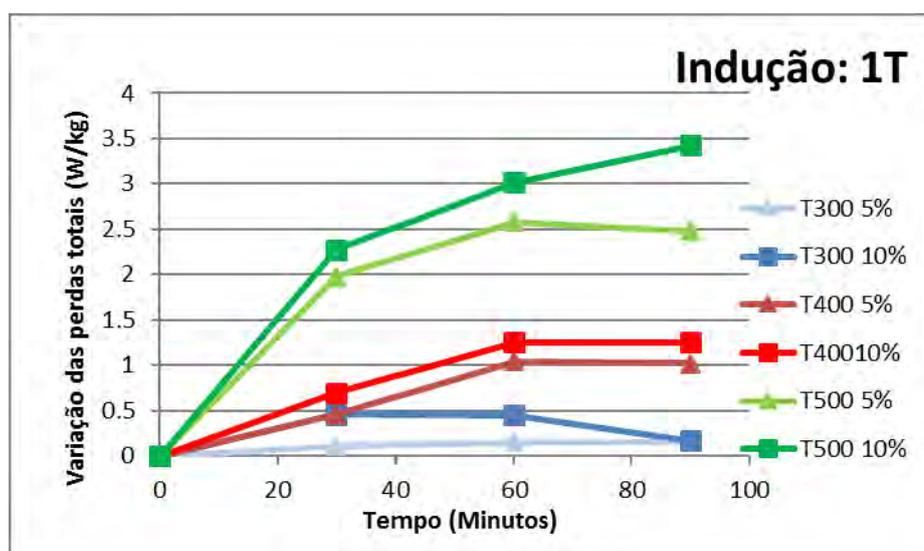
Figura 11. Gráfico dos valores de fração recuperada pelo tempo para diversas temperaturas e reduções para limite de escoamento.

## 4 DISCUSSÃO

A partir dessas curvas é possível observar que conforme a temperatura e o tempo do tratamento térmico são aumentados, de modo geral, verifica-se uma queda nas perdas totais das amostras medidas conforme visto pela literatura.<sup>(6)</sup> Observa-se também que as curvas do material com 5% de redução sempre se encontram menores do que a do material com 10% de redução com exceção para as amostras tratadas a 500°C por 90 minutos, para o qual para ambas as reduções verifica-se basicamente o mesmo valor de perdas. Observando a variação do limite de escoamento pode-se observar um comportamento análogo ao das perdas, com valores decrescentes com o aumento da temperatura e tempo dos tratamentos térmicos.

Em relação aos tratamentos térmicos pode-se observar que pelas metalografias as amostras não apresentaram mudança em suas microestruturas, apresentando mesmo tamanho de grão para as amostras com tratamentos térmicos de 300, 400 e 500°C. E para as amostras com tratamento térmico de 700°C que tanto para as amostras com 5% como para as de 10% de redução elas apresentaram recristalização completa, o que nos permitiu empregar obter um valor para as propriedades nos estados completamente recristalizados para utilizar no cálculo da parcela recuperada.

A partir das curvas de parcela de recuperação temos que para ambas as induções, em geral as curvas do material com 5% de redução encontram-se sobre a curva do material com 10% de redução isto se observa para todos os tratamentos térmicos. Isso implica no fato de que menores deformações irão tornar o material mais sensível à recuperação, já que a energia interna presente devido às discordâncias é menor e as energias para o desancoramento das mesmas também serão menores. No entanto quanto menores forem as reduções, mesmo com parâmetros de recuperação maiores o valor absoluto será menor, como observado pelas curvas. Mesmo o parâmetro de recuperação calculado pelas perdas sendo maior para as amostras com 5% de redução, temos que quando medidas as perdas totais absolutas, as variações absolutas são menores como mostrado pela Figura 12.



**Figura 12.** Variação das perdas totais em relação à medida deformada em função dos tratamentos térmicos realizados para indução de 1T.

## 5 CONCLUSÃO

Primeiramente pode-se observar que para os tratamentos térmicos realizados abaixo de 500°C não houve mudança na microestrutura vista por microscopia óptica, o que implica em que os fenômenos que estão ocorrendo no material devido ao processo de recuperação.

Observando-se as curvas e os valores obtidos das perdas totais, campo e limite de escoamento para os diversos tratamentos térmicos realizados, é possível concluir que o comportamento das propriedades magnéticas e das propriedades mecânicas medidas diferem quanto ao parâmetro de recuperação. Para o limite de escoamento é possível chegar em no máximo 60% de recuperação enquanto para as perdas passamos de 70% de recuperação para os mesmos tratamentos térmicos, para campo magnético temos que, o mesmo chega a até 80% de recuperação.

Observa-se também que para deformações maiores o aumento da indução diminui o efeito da recuperação nas perdas. Além disso, é possível observar o efeito de que para deformações maiores a parcela recuperada tende a diminuir, mas a variação absoluta da propriedade medida tende a aumentar, pois o valor da propriedade do estado deformado tende a aumentar com o aumento da deformação.

Outro fator que vale ser ressaltado é que a 500°C já é possível verificar um bom descolamento entre as curvas dos parâmetros de recuperação medidos pelas perdas totais e pelo limite de escoamento, havendo pelo menos 10% de diferença entre eles.

## Agradecimentos

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT; e Brasmetal Waelzholtz S.A.

## REFERENCIAS

- 1 Marra, Kleiner M, e Vicente T Buono. “VARIAÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS DURANTE ENVELHECIMENTO.” *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, 2006: 36-39.
- 2 M. Bradfield, “Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs.” 2008.
- 3 J. T. Michalak, H. W. Paxton, “Some Recovery Characteristics of Zone Melted Iron” *AIME Metallurgical Transactions* 221,1961
- 4 SABLİK, M. Modeling plastic deformation effects in steel on hysteresis loops with the same maximum flux density. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 40, n. 5, p. 1-8, 2004.
- 5 A. Martinez-de-Guerenu, F. Arizti, I. Gutierrez. “Recovery during annealing in a cold rolled low carbon steel.Part II: Modelling the kinetics” 2004 *Acta Materiali*
- 6 F.J.G. Landgraf, M. Emura “Loss and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations” *J. Magn. Mater.* vol. 242, pp. 152-156, 2002.