

Thomas Seiji Pascoto Nishikawa

# Efeito da Recuperação nas Propriedades Magnéticas e Mecânicas de Aços Elétricos

Tese apresentada para a  
obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de  
Materiais pela Escola  
Politécnica da Universidade  
de São Paulo

**São Paulo**

**2012**

Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais da  
Escola Politécnica da USP

Thomas Seiji Pascoto Nishikawa

# Efeito da Recuperação nas Propriedades Magnéticas e Mecânicas de Aços Elétricos

Tese apresentada para a  
obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de  
Materiais pela Escola  
Politécnica da Universidade  
de São Paulo

Orientador: Fernando José  
Gomes Landgraf

**São Paulo**

**2012**

If you wish to make an apple pie from scratch,  
you must first invent the universe

Carl Sagan

## **Agradecimentos**

Após meus cinco anos de Poli percebi que tenho que agradecer a um monte de pessoas, pessoas essas que marcaram minha vida acadêmica e me ajudaram a me tornar o profissional que eu almejo ser um dia.

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, que sempre acreditaram na minha capacidade e me motivaram em tempos difíceis. Segundo, agradeço meus colegas, Alan, grande Arthur, Caso, Dalti, Fernando e Lucas Narcizo, Felipe, Landi, Cacá, com menção honrosa para toda a galerinha do terceiro e quinto ano, aos quais sempre carregarei junto comigo com as melhores lembranças dos melhores anos da minha vida. Agradeço também meu caro colega, Caio Liberato, pelas ótimas horas de convívio.

Agradeço meu orientador Fernando Landgraf por tudo o que ele me permitiu realizar e por tudo que ele me agregou. Agradeço meus colegas do laboratório de propriedades magnéticas Daniel, João, Adriano e Alan. Tenho que agradecer a todos os Mestres e grandes mentes que me orientaram ao longo desses cinco sofridos anos. Agradeço a oportunidade de ter conseguido aprender na sobra de grandes homens que agora se aposentam para um merecido descanso.

Agradeço à Brasmetal por ter ajudado tão prontamente com o trabalho realizado, agradeço também ao pessoal do IPT. Agradeço também ao pessoal do laboratório de transformações de fase por providenciar um ambiente de trabalho.

Finalmente agradeço ao destino por ter me permitido fazer parte de tudo o que ocorreu, conhecer todas essas pessoas incríveis e vivenciar todas as situações que se passaram.

## **Resumo**

Este trabalho visa estudar o efeito do processo de recuperação para diversos tratamentos térmicos realizados para amostras de aço elétrico laminado a frio com 5 e 10% de redução, observando a variação das propriedades magnéticas e mecânicas, em especial, as perdas totais, o campo necessário para atingir as induções de 1 e 1,5 T e o limite de escoamento.

## **Abstract**

This work aims to study the effect of the recovery process using several heat treatments on samples of cold rolled electrical steel with reductions of 5 and 10%, observing the variations on the magnetic and mechanic properties, in special total losses, the magnetic field necessary to reach 1 and 1,5T inductions and the yield strength.

## Sumário

1	Introdução .....	10
2	Revisão Bibliográfica .....	13
2.1	Propriedades Magnéticas .....	15
2.1.1	Ferromagnetismo.....	15
2.3.1	Efeito nas propriedades magnéticas.....	26
2.3.2	Efeito na recristalização.....	28
3	Materiais e Métodos .....	29
3.1	Material Utilizado.....	29
3.2	Tratamentos Térmicos .....	30
3.3	Medidas Magnéticas .....	31
3.4	Medidas Mecânicas .....	32
3.5	Parâmetro de recuperação .....	33
3.6	Metalografia .....	34
4	Resultados .....	35
4.1	Medidas magnéticas .....	35
4.2	Medidas Mecânicas .....	37
4.3	Parâmetro de recuperação .....	38
4.4	Metalografia .....	39
5	Discussão .....	45
6	Conclusões.....	55
7	Bibliografia.....	56

## Lista de Figuras

Figura 1: Investimentos da indústria automotiva.....	11
Figura 2: Aumento da energia produzida por fontes eólicas [4].....	11
Figura 3: Variação da eficiência do alternador em função da aplicação e da corrente aplicada [5] .....	12
Figura 4: Efeito do teor de silício nas propriedades magnéticas [6].....	13
Figura 5: Efeito do teor de alumínio nas perdas magnéticas e na temperatura de recozimento [7] .....	14
Figura 6: Histerese de magnetização para Permalloy [10] .....	16
Figura 7: Variação do limite de escoamento e limite de resistência com a deformação [13].....	18
Figura 8: Efeito do teor de carbono no envelhecimento magnético [15] .....	19
Figura 9: Efeito do tamanho de grão com as perdas [11] .....	20
Figura 10: Variação do perfil da histerese magnética com a aplicação de deformação [18].....	21
Figura 11: Aumento das perdas magnéticas com a deformação [12].....	22
Figura 12: Mudança no aspecto macroscópico observado por Cahn [21] .....	23
Figura 13: Estrutura do material deformado .....	24
Figura 14: Aniquilação de discordâncias restando apenas discordâncias de mesma orientação .....	24
Figura 15: Alinhamento dos campos de tração e compressão .....	25
Figura 16: Variação da susceptibilidade com a temperatura para diversos tratamentos térmicos para aço ARMCO com diversos tipos de deformação [23] .....	26
Figura 17: Variação do campo coercivo para diversos tempos de tratamentos térmicos [24] .....	27
Figura 18: Efeito da recuperação na recristalização [24].....	28
Figura 19: Curva da fração não recuperada em função do tempo para uma amostra de ferro adaptada de [25].....	31
Figura 20: Esquema das dimensões dos corpos de prova para medidas magnéticas.....	31
Figura 21: Corpo de prova de ensaio de tração.....	32
Figura 22: Microestrutura da amostra com 5% de deformação sem recozimento com aumento de 500x .....	39
Figura 23: Microestrutura da amostra com 10% de redução sem recozimento com aumento de 1000x .....	40
Figura 24: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 500°C por 60 minutos com aumento de 1000x .....	40
Figura 25: Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 500°C por 60 minutos com aumento de 500x.....	41
Figura 26: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 500°C por 90 minutos com aumento de 200x.....	41



Figura 27: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 700°C por 60 minutos com aumento de 500x .....	42
Figura 28: Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 700°C por 60 minutos com aumento de 500x .....	42
Figura 29: Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 700°C por 30 minutos com aumento de 200x .....	43
Figura 30: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 700°C por 30 minutos com aumento de 500x .....	43
Figura 31: Curva da variação da perda total para os tratamentos térmicos realizados para indução de 1T .....	45
Figura 32: Curva da variação da perda total para os tratamentos térmicos realizados para indução de 1,5T .....	45
Figura 33: Variação do limite de escoamento para os diversos tratamentos térmicos realizados .....	46
Figura 34: Variação do campo magnético para os diversos tratamentos térmicos realizados para indução de 1T .....	46
Figura 35: Variação do campo magnético para os diversos tratamentos térmicos realizados para indução de 1,5T .....	47
Figura 36: Parâmetro de recuperação calculado pelas perdas totais medidas para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1T .....	48
Figura 37: Parâmetro de recuperação calculado pelas perdas totais medidas para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1,5T .....	48
Figura 38: Variação das perdas totais em relação à medida deformada em função dos tratamentos térmicos realizados para indução de 1T .....	49
Figura 39: Parâmetro de recuperação calculado pelo limite de escoamento para os diversos tratamentos térmicos realizados .....	50
Figura 40: Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1T e o limite de escoamento para as amostras com 5% de redução .....	50
Figura 41: Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1,5T e o limite de escoamento para as amostras com 5% de redução .....	51
Figura 42: Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1T e o limite de escoamento para as amostras com 10% de redução .....	51
Figura 43: Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1,5T e o limite de escoamento para as amostras com 10% de redução .....	52
Figura 44: Parâmetro de recuperação calculado pelo campo medido para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1T .....	52
Figura 45: Parâmetro de recuperação calculado pelo campo medido para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1,5T .....	53
Figura 46: Variação da parcela não recuperada para diversos tratamentos térmicos [26] .....	53

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição química do material a ser estudado .....	29
Tabela 2: Tratamentos térmicos realizados .....	30
Tabela 3: Valores obtidos pelo ensaio Soken para as amostras com 5% de redução .....	35
Tabela 4: Valores obtidos pelo ensaio Soken para as amostras com 10% de redução .....	36
Tabela 5: Valores obtidos pelo ensaio de tração para as amostras com 5% de redução .....	37
Tabela 6: Valores obtidos pelo ensaio de tração para as amostras com 10% de redução .....	37
Tabela 7: Parcela recuperada para diversas medidas para as amostras com 5% de redução .....	38
Tabela 8: Parcela recuperada para diversas medidas para as amostras com 10% de redução .....	38

## 1 Introdução

As propriedades magnéticas são alvo de intenso estudo na comunidade científica desde sua descoberta, datando do século VI a.C. quando Tales de Mileto viajando pela Grécia observou que pedregulhos do minério presente na região se atraíam e também atraíam objetos de ferro. Ele foi um dos primeiros a tentar explicar o fenômeno chamando o minério de magnetita.

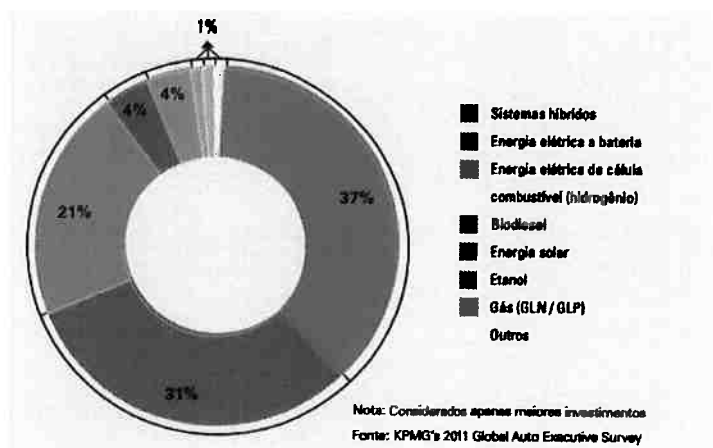
Se para os antigos o magnetismo era um fenômeno mágico onde elementos possuíam a capacidade de dar vida e movimento a metais e outros minérios, hoje em dia temos explicações e teorias que consolidam o efeito. Mesmo assim essa propriedade ainda é cheia de novas áreas a se desbravar tanto na área da ciência quanto em suas aplicações.

Existem muitos equipamentos que utilizam essas propriedades magnéticas, dentre eles vale ressaltar os motores elétricos e os transformadores, que são parte vital do cotidiano contemporâneo. Os motores elétricos em particular utilizam do efeito ferromagnético [1] de chapas de aço elétrico presentes em seu interior para gerar movimento a partir de corrente elétrica.

Esse efeito também é explorado para os transformadores e outros equipamentos igualmente importantes. Para essas aplicações utilizam-se aços magneticamente moles, dos quais temos que 97% deles são aços elétricos [2], o que corresponde a uma produção de 12 milhões de toneladas anuais. Desse valor 80% são de material com grão não orientado (GNO).

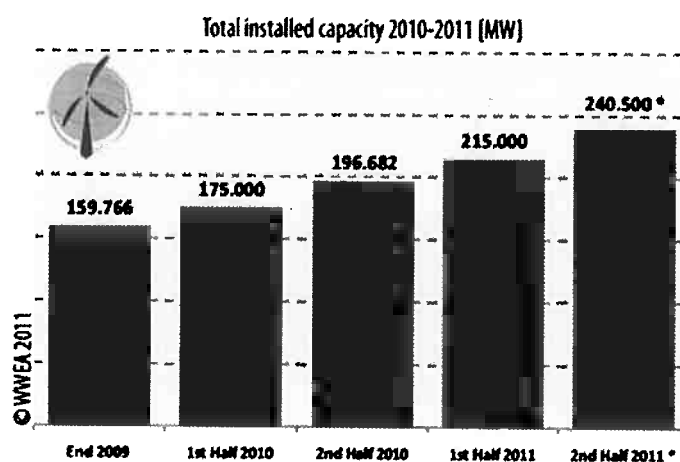
A elevada produção desse tipo específico de aço ocorre devido ao uso de energia elétrica em relação aos outros tipos de energia. Isso fica explícito na indústria automotiva onde se observa o crescimento do setor de carros movidos a energia elétrica e carros elétricos híbridos como alternativa para os que utilizam fontes de energia fósseis não renováveis e biomassa.

Segundo estudos realizados pela KPMG [3] em 2011, prevê-se que a indústria automotiva irá investir 67% dos seus recursos destinados a investimentos na área de energia elétrica, como mostrado pela Figura 1. Além disso, temos que as maiores expectativas de investimentos estão nos carros híbridos (84%) e elétricos (77%).



**Figura 1: Investimentos da indústria automotiva**

Outro fenômeno global que estamos vivenciando atualmente é o aumento do uso de energia eólica [4], que utiliza a energia cinética do vento para gerar energia elétrica como substituta à matriz termoeletrônica e nuclear. Aliado a isso também temos o aumento das hidroelétricas que utilizam a energia potencial gravitacional da água represada para gerar energia por movimentação de turbinas utilizando o mecanismo que também é usado no alternador.



**Figura 2: Aumento da energia produzida por fontes eólicas [4]**

Finalmente temos o caso dos alternadores automobilísticos que apresentam rendimento baixo, por volta de no máximo 65% [5]. Esse rendimento é a capacidade do alternador de transformar o movimento do eixo em energia elétrica, como mostrado pela Figura 3.

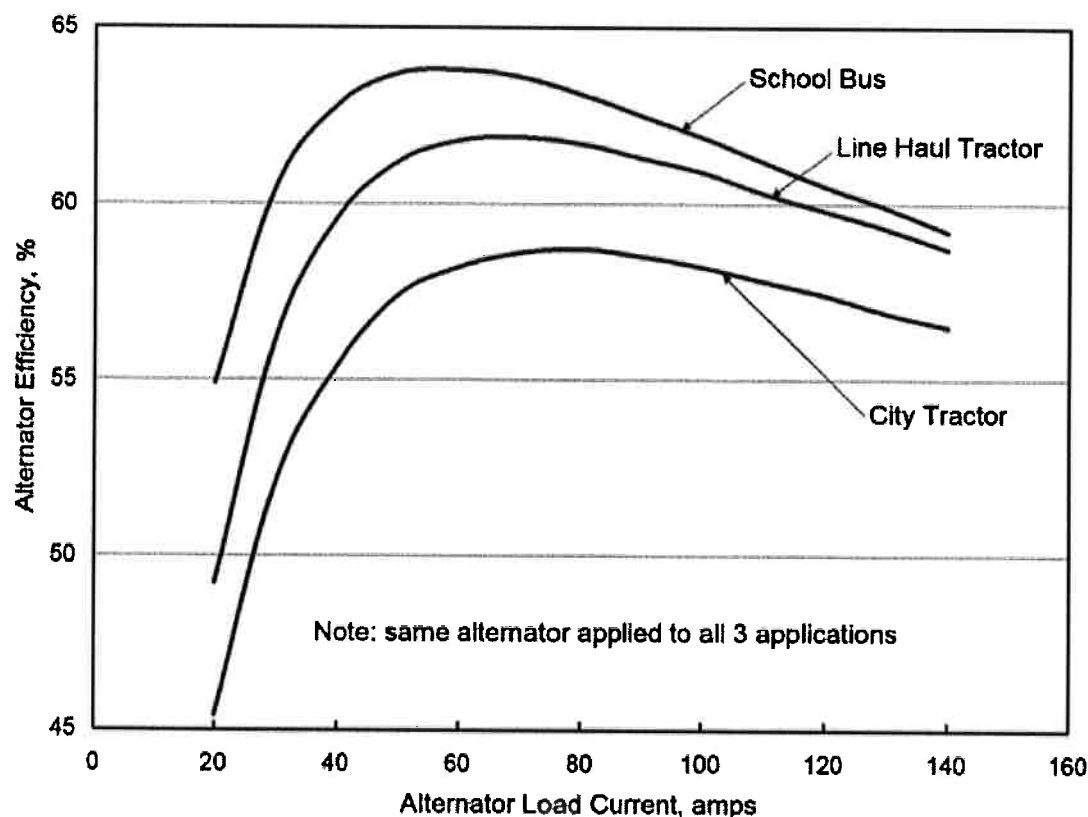


Figura 3: Variação da eficiência do alternador em função da aplicação e da corrente aplicada [5]

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.

Sabendo isso fica obvia a importância de analisarmos as propriedades mecânicas junto das magnéticas de modo que a permitir peças mais eficientes com reduções de peso e melhores propriedades mecânicas.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Aços elétricos

Os aços elétricos são caracterizados por um elevado teor de silício e baixo teor de carbono. Esse elevado teor de silício é justificado [6] pelo seu efeito na redução das perdas magnéticas totais para a qual podemos observar uma melhora contínua das propriedades magnéticas com o aumento do teor de silício, como mostrado pela Figura 4 mostrada pelo aumento da resistividade, esses efeitos melhoram as propriedades conforme será mostrado mais adiante. Outro elemento que pode ser adicionado é o alumínio que também possui efeito similar ao silício [7], diminuindo as perdas totais, como mostrado pela Figura 5, por ultimo, o manganês, que geralmente é adicionado para melhorar a estampabilidade, visto que essa é uma das etapas de conformação importante para fabricação de estatores e rotores.

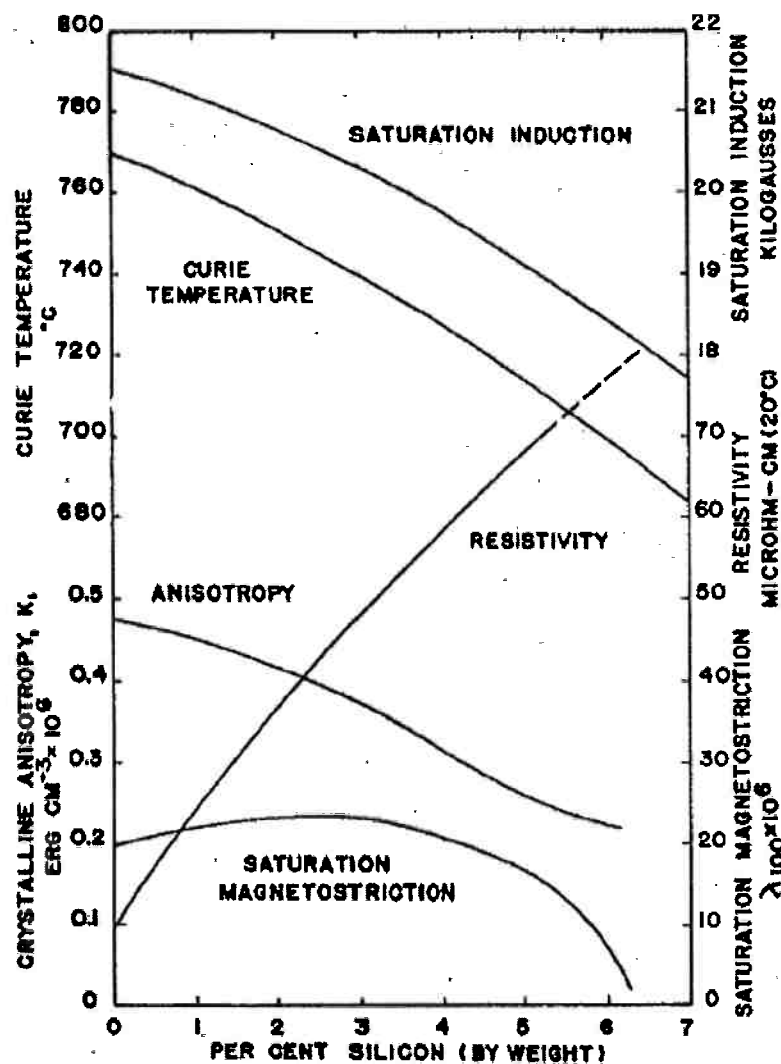


Figura 4: Efeito do teor de silício nas propriedades magnéticas [6]

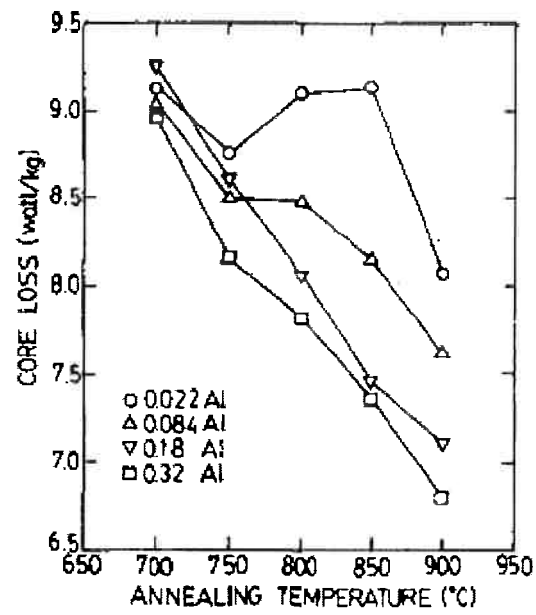


Figura 5: Efeito do teor de alumínio nas perdas magnéticas e na temperatura de recozimento [7]

## 2.1 Propriedades Magnéticas

### 2.1.1 Ferromagnetismo

Ferromagnetismo é a principal propriedade dos aços elétricos, essa propriedade é definida como a capacidade do material quando exposto a um campo magnético externo de aumentar o campo resultante pelo alinhamento de dipolos magnéticos [8] presentes no material, resultando em forças fortes o suficiente para serem sentidas externamente.

Dentre as propriedades magnéticas importantes se encontram as perdas energéticas durante a magnetização do material e a indução magnética [9] (B), essa pode ser descrita como sendo:

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo, H é o campo externo aplicado, e M é a magnetização do material. Esse termo por sua vez pode ser descrito como sendo o campo H multiplicado pela susceptibilidade do material,  $\chi$ .

O ferromagnetismo está intrinsecamente ligado à formação de domínios magnéticos no material, domínios esses que nada mais são do que parcelas do material que apresentam mesma orientação magnética. Quanto aos tipos de materiais magnéticos podemos classificá-los como sendo magneticamente moles ou magneticamente duros.

Os materiais magneticamente moles apresentam pouca energia necessária para magnetização e baixa remanência, essa é a categoria dos aços elétricos. Os materiais magneticamente duros por outro lado possuem elevada remanência e estrutura de domínios estável, o que resulta em um aumento da energia para desmagnetizar esses materiais, essa é a categoria dos ímãs permanentes.



### 2.1.2 Perdas Magnéticas

Os aços elétricos se destacam por sua aplicação singular em equipamentos elétricos como motores elétricos e transformadores. Esses equipamentos por apresentarem elevada frequência de magnetização nos obrigam a procurar materiais que apresentem perdas totais por ciclo de magnetização os menores possíveis. Quanto à perda total ( $P_t$ ) sabemos que ela pode ser descrita pela equação abaixo.

$$P_t = C_h \cdot f + P_p + P_a$$

Onde  $C_h$  é a perda histerética por ciclo, para a qual se multiplica a frequência de magnetização ( $f$ ). Essa perda vem da energia que é absorvida pelo material durante o ciclo de magnetização e desmagnetização e é descrita pela área da curva de histerese do material. A curva de histerese por sua vez é obtida medindo a variação da indução com a variação do campo aplicado. Em especial, essa perda se dá devido ao fato de que quando removemos o campo após a magnetização temos que o material ainda apresenta domínios magnéticos remanentes da magnetização anterior ao invés de domínios aleatórios, como mostrado [10] pela Figura 6, na qual domínios magnéticos orientados em uma direção e sentido apresentam tonalidade escura e domínios orientados na mesma direção, mas sentido oposto apresenta tonalidade clara.

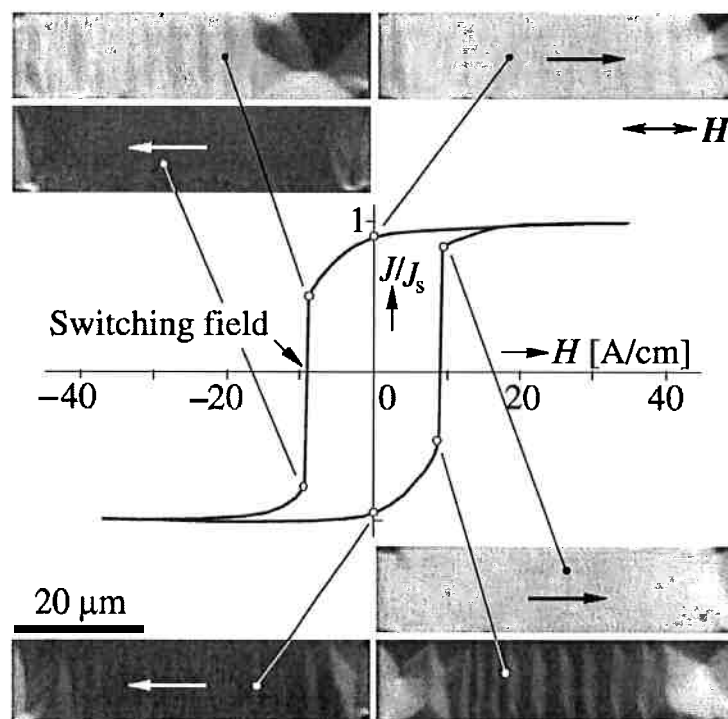


Figura 6: Histerese de magnetização para Permalloy [10]

O termo  $P_p$  designa a perda parasita, essa se dá devido à formação de correntes de Foucault dentro do material devido à formação de diferença de potencial fruto da variação de fluxo magnético. Ela pode ser calculada pela equação abaixo

$$P_p = \frac{(\pi \cdot B_{\max} \cdot f \cdot e)^2}{6 \cdot d \cdot \rho}$$

Onde  $B_{\max}$  é a indução máxima à qual o material está exposto,  $e$  é a espessura,  $d$  é a densidade e  $\rho$  é a resistividade elétrica. Como podemos ver por essa equação a componente parasítica da perda cresce com o quadrado da frequência, espessura e indução magnética máxima e temos um decaimento com o inverso da resistividade do material, por isso é interessante possuir elevada resistividade e baixa indução máxima.

Finalmente temos a perda anômala  $P_a$ . Esse componente se origina devido à diferença entre o valor de perdas totais teórico e o observado na prática. Mesmo ela sendo obtida pela diferença existem diversos modelos matemáticos que a tentam descrever, como mostrado abaixo [11] pela equação abaixo.

$$P_a = c \cdot TG^{1/2} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot e^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot f^{3/2}$$

Onde  $c$  é uma constante obtida experimentalmente,  $TG$  é o tamanho de grão presente no material. Vale comentar que o termo parasita das perdas é ainda alvo de diversos estudos e essa fórmula serve para ilustrar que apesar de não termos uma equação que descreva fielmente essa parcela, podemos ter noções de como as propriedades do material afetam essa parcela de uma maneira geral.

## 2.2 Mecanismos de aumento do limite de escoamento

Além da melhoria nas propriedades magnéticas, busca-se melhoria nas propriedades mecânicas. Essa melhoria fica demonstrada pela exigência de esforços cada vez maiores nesses equipamentos, isso aliado com reduções de peso para um aumento combinado de potência e rendimento no caso dos motores. Deseja-se então um aumento no limite de escoamento que no caso de aços elétricos é consideravelmente baixo, na faixa de 200 e 300 MPa [12] quando livres de deformação e chegando a 400 e 500 Mpa quando encruados, como mostrado pela Figura 7.

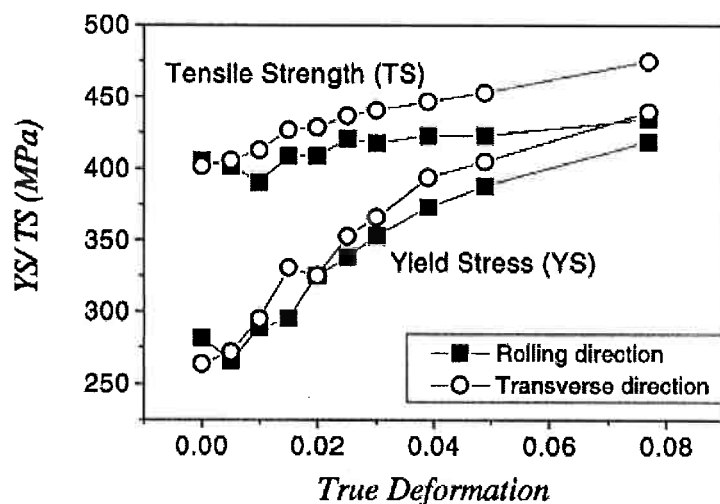


Figura 7: Variação do limite de escoamento e limite de resistência com a deformação [13]

Tendo em vista essa melhora nas propriedades mecânicas, dentre os mecanismos convencionais para aumento do limite de escoamento nos aços, temos três como sendo os principais:

## 2.2.1 Aumento do teor de carbono

O aumento do teor de carbono em geral resulta no aumento do limite de escoamento dos aços, isso se comprova para os aços elétricos também. No entanto, as propriedades magnéticas se degradam consideravelmente com o aumento do teor de carbono e de outros elementos como enxofre e fósforo [14].

No entanto o maior problema não é o carbono em solução sólida, mas sim o seu efeito devido ao envelhecimento magnético. Durante tratamentos térmicos, a presença de carbono e de nitrogênio pode resultar na precipitação de carbonetos e nitretos, esses por sua vez aumentam as perdas totais consideravelmente [15][16]. Por isso o teor de carbono tem que ser o mínimo possível, como mostrado na Figura 8 que revela um descolamento entre as curvas de perdas, em especial a parcela histerética, devido ao efeito do envelhecimento magnético que se acentua com o aumento do teor de carbono.

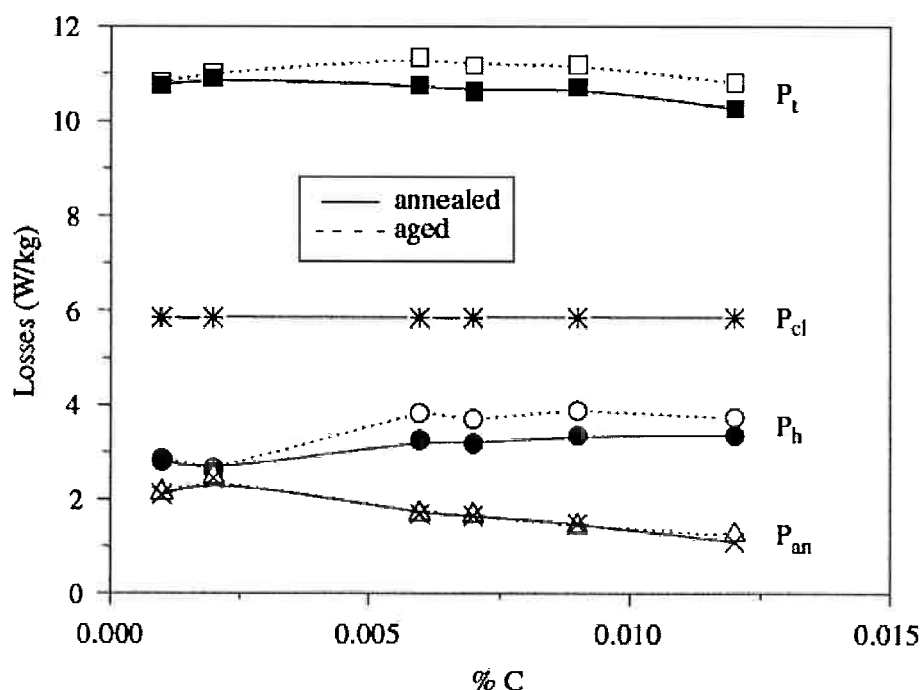


Figura 8: Efeito do teor de carbono no envelhecimento magnético [15]

### 2.2.2 Refino de grão

O outro mecanismo é o refino do tamanho de grão, considerando as propriedades mecânicas, esse é um mecanismo fácil de controlar quando sabemos o tamanho de grão inicial e aplicamos deformações controladas seguidas de tratamento térmico de recristalização. Bastando aplicar elevadas deformações temos que o tamanho de grão após o tratamento térmico irá cair consideravelmente resultando em um aumento do limite de escoamento.

No entanto, as propriedades magnéticas seguem um caminho inverso, apresentando uma melhora com o aumento do tamanho de grão, isso até certo ponto de tamanho de grão ótimo, como mostrado Figura 9, na qual, observamos que conforme aumentamos o tamanho de grão, a perda histerética diminui, no entanto a perda anômala cresce contrabalanceando a anterior e temos que a partir de 150  $\mu\text{m}$  não é vantajoso aumentar o tamanho de grão, pois a variação nas perdas torna-se muito pequena e as perdas chegam a um patamar.

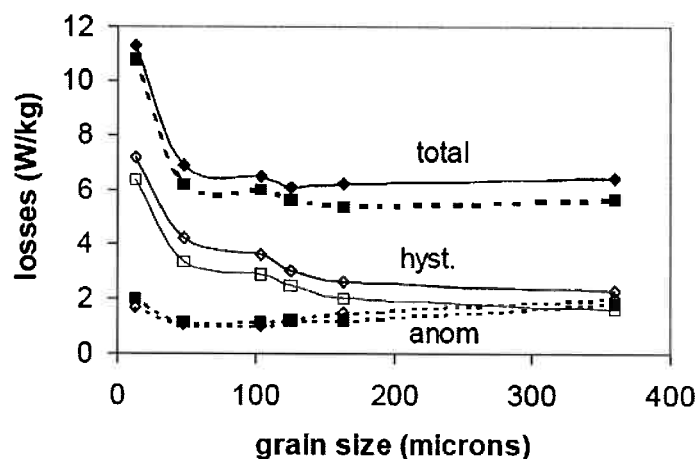


Figura 9: Efeito do tamanho de grão com as perdas [11]

### 2.2.3 Encruamento

E finalmente, o último mecanismo a ser mencionado é o encruamento, que consiste no aumento do limite de escoamento do material com a utilização de uma deformação previa. Esse endurecimento do material se dá devido à dificuldade de movimentação de novas discordâncias devido à presença de discordâncias geradas a partir de outros sistemas de escorregamento, oriundas de deformações anteriores.

Esse mecanismo é muito utilizado na pratica, no entanto a deformação eleva as perdas [17] [12], conforme mostra a Figura 11. Além disso, temos o aumento da área da histerese [18], como mostrado pela Figura 10, e do campo coercivo [19]. Junto da deformação a frio em geral temos o aparecimento de tensões residuais resultantes de etapas de laminações, que também aumentam as perdas [20].

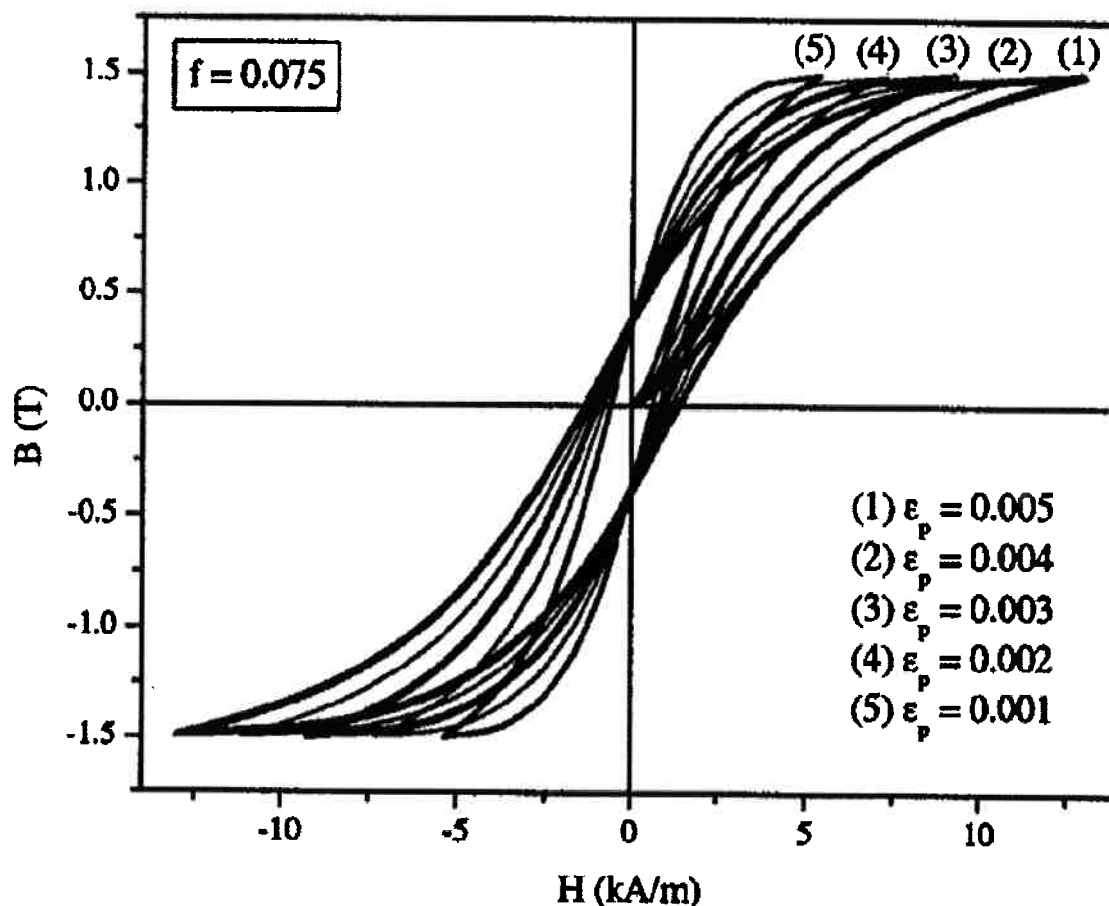


Figura 10: Variação do perfil da histerese magnética com a aplicação de deformação [18]

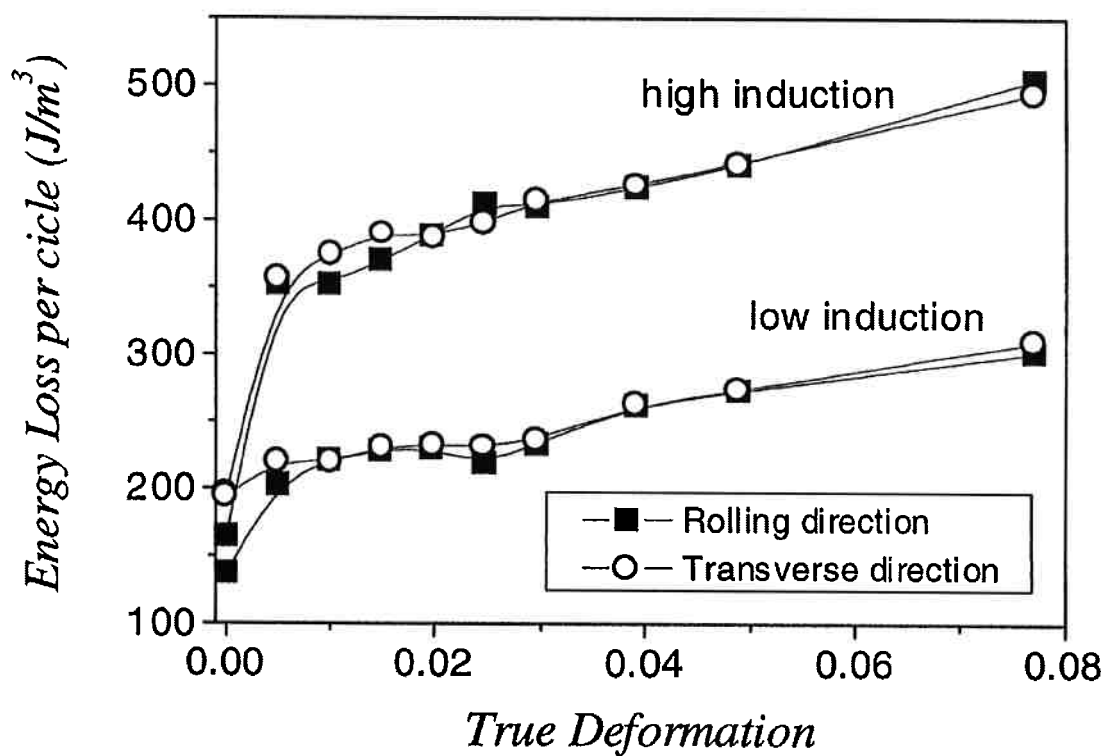


Figura 11: Aumento das perdas magnéticas com a deformação [12]

Tendo em foco esse mecanismo de endurecimento temos que uma possibilidade de melhora nas propriedades magnéticas com retenção das propriedades mecânicas é pelo uso de tratamentos térmicos de recuperação.

## 2.3 Recuperação

Em 1949, Cahn [21] publica em seu trabalho um fenômeno que já se havia sendo estudado por outros pesquisadores, no qual amostras de metais deformados apresentam mudança de sua estrutura e propriedades após estarem submetidos a tratamentos térmicos com temperaturas abaixo da de recristalização. Observando amostras de monocristais de materiais diversos ele observou que material fletido apresentava a seguinte mudança em seu aspecto macroscópico como mostrado pela Figura 12:

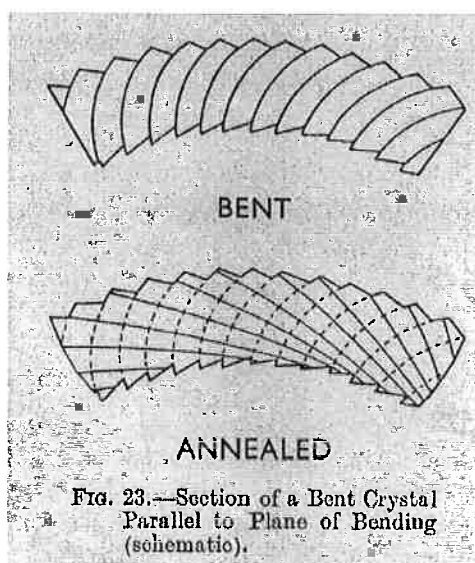


Figura 12: Mudança no aspecto macroscópico observado por Cahn [21]

Combinado com análises metalográficas, Cahn também realizou observações com raios-X, para as quais ele observou que após os tratamentos térmicos os picos de difração na figura de polo apresentaram maior resolução o que é curioso visto que as amostras haviam sido deformadas e apresentavam picos difusos previamente. Cahn então observando a microestrutura do material após o tratamento térmico observa que a estrutura ainda apresenta monocristal, sinal de que o material ainda não passou pelo processo de recristalização.

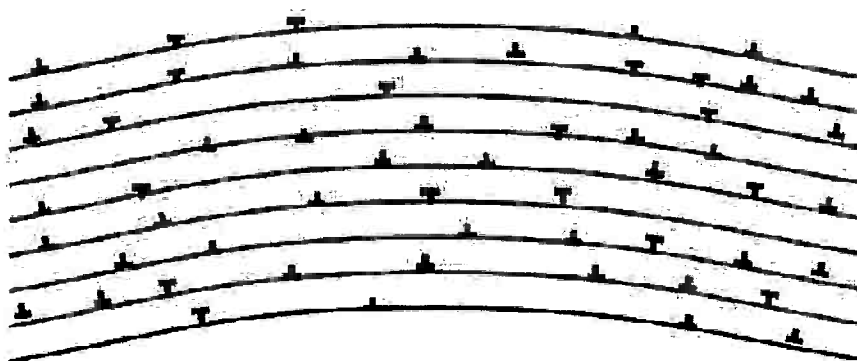
Tendo essas ideias em mente Cahn sugere no mesmo trabalho chamar esse fenômeno de recuperação, visto que, observando os picos de difração, percebe-se uma recuperação no reticulado do material sem que houvesse mudança em sua microestrutura. Cahn também sugere nomear o que ocorreu com o material dele de poligonização, visto que o material se poligoniza nas regiões deformadas, como observado na barra de monocristal deformada.

Essa foi uma das primeiras definições para o processo de recuperação, atualmente esse fenômeno possui uma definição mais ampla sendo definido como qualquer tratamento térmico que ocorre em material deformado para o qual ocorre eliminação de discordâncias sem que haja migração de contorno

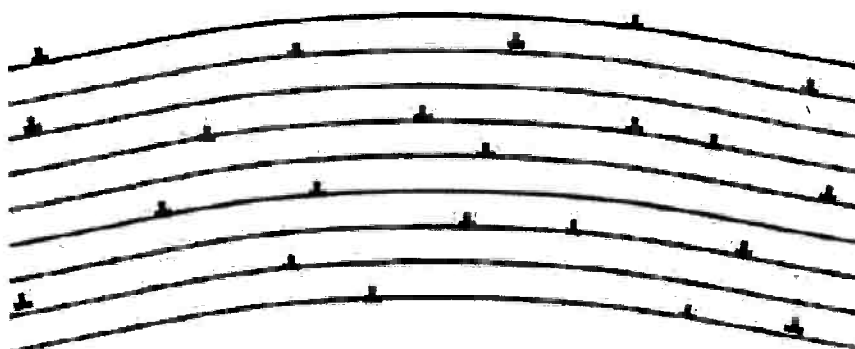


de grão de alto ângulo [22]. Dentre os fenômenos que ocorrem durante o processo de recuperação temos a poligonização, a ascensão e a formação de células de discordâncias.

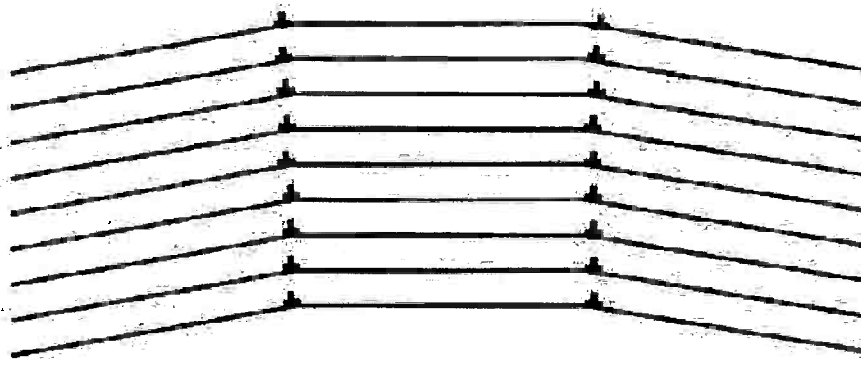
O processo de poligonização é descrito pelo alinhamento dos campos de tensão de discordâncias de modo que os haja sobreposição dos campos de tensão e de compressão de discordâncias minimizando a tensão interna do material, conforme mostrado pelas figuras abaixo para o caso de discordâncias em cunha.



**Figura 13: Estrutura do material deformado**



**Figura 14: Aniquilação de discordâncias restando apenas discordâncias de mesma orientação**



**Figura 15: Alinhamento dos campos de tração e compressão**

Esse processo ocorre naturalmente até certo ponto dentro do material, no entanto, conforme fornecemos energia cinética para os átomos das discordâncias presentes no material deformado ocorre um desancoramento das mesmas, esse fenômeno ocorre quando as discordâncias mudam para um plano de escorregamento adjacente, esse fenômeno é chamado de ascensão. Com esse aumento da mobilidade das discordâncias elas irão se fixar de modo a que haja uma sobreposição dos campos de tensão e de compressão gerados pelas discordâncias como mostrado pela Figura 15. Aliado à poligonização também teremos a aniquilação de discordâncias, na qual discordâncias de sinais opostos ao se encontrarem completam uma a outra formando um plano atômico completo conforme foi ilustrado pela Figura 14.

### 2.3.1 Efeito nas propriedades magnéticas

Temos que para as propriedades magnéticas a recuperação é um fenômeno com diversos efeitos, em geral benéficos, como podemos ver pela Figura 16, na qual a curva de susceptibilidade obtida para diversos tratamentos térmicos realizados apresenta aumento em seu valor [23].

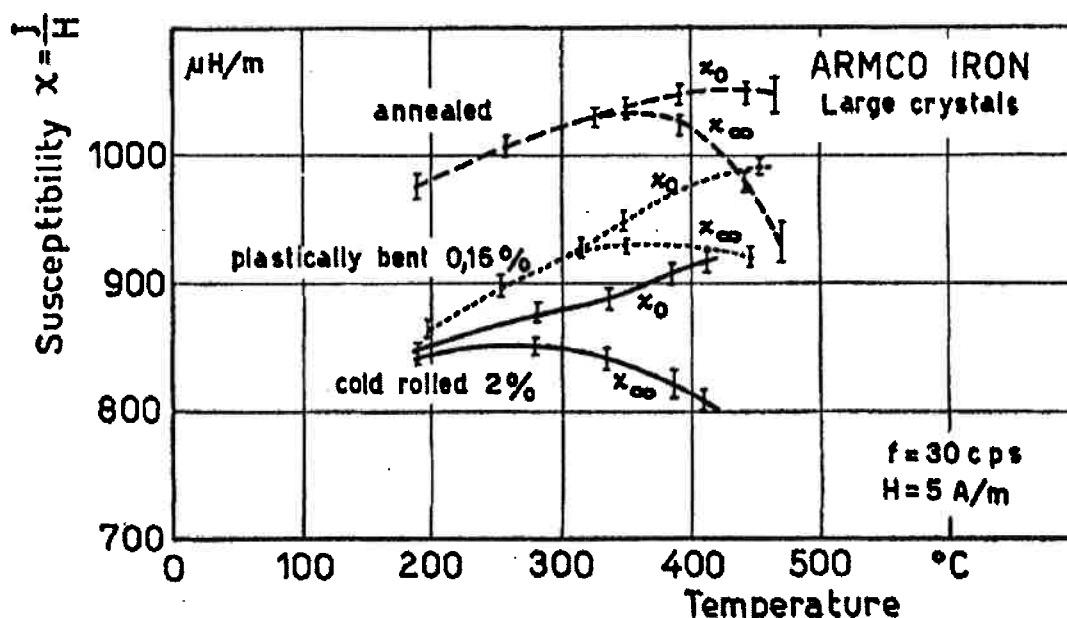


Figura 16: Variação da susceptibilidade com a temperatura para diversos tratamentos térmicos para aço ARMCO com diversos tipos de deformação [23]

Para essa figura podemos observar que a susceptibilidade medida 10 segundos após a desmagnetização  $\chi_0$ , apresenta aumento em seu valor com o aumento da temperatura, como observado em especial pela curva do material laminado a frio. Quanto à curva de susceptibilidade após 30 minutos,  $\chi_{30}$ , temos que sua diminuição se dá devido a relaxação dos contornos de grão permitindo maior movimentação de discordâncias, diminuição da magnetização do material, sendo esse fenômeno bastante parecido com o processo de recuperação.

Esse estudo nos permite observar que mesmo sem realizar tratamentos térmicos que existe uma variação nas propriedades magnéticas com a temperatura de tratamento de recuperação.

Estudos realizados [24] no efeito da recuperação nos permitem observar que conforme o fenômeno se desenvolve temos uma diminuição no campo coercivo do material como mostrado pela Figura 17.

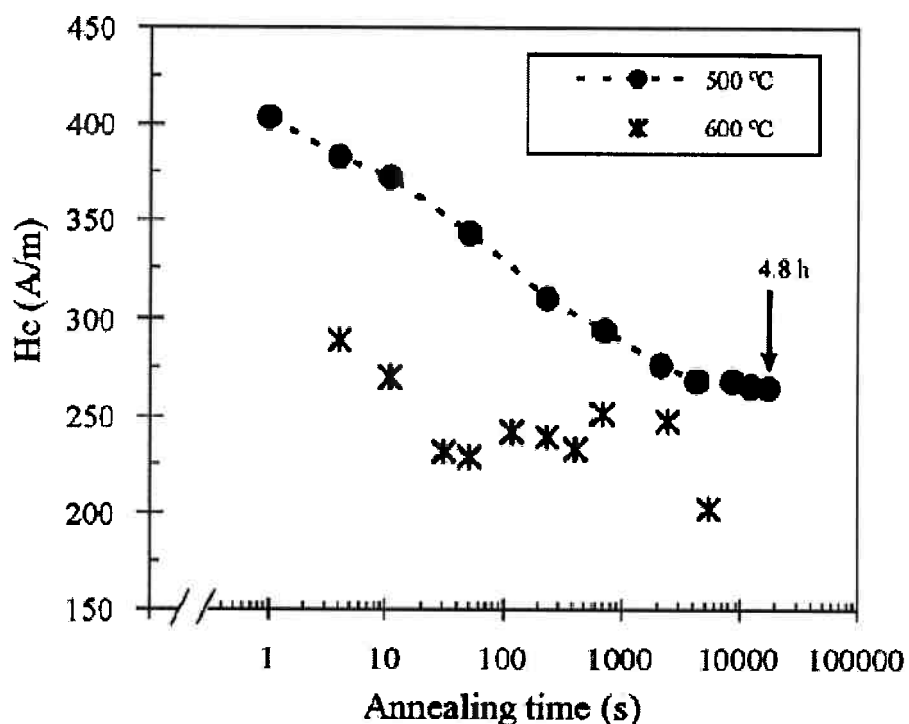


Figura 17: Variação do campo coercivo para diversos tempos de tratamentos térmicos [24]

O campo coercivo é uma propriedade importante de ser estudada pois ela é essencial para definirmos a histerese magnética e consequentemente sua parcela de perda histerética e como podemos observar a recuperação por tender a diminuir esse termo é de se esperar que ela resulte em uma diminuição da perda total do material.

### 2.3.2 Efeito na recristalização

A recuperação é um processo que resulta na diminuição da energia interna do metal deformado, visto as discordâncias passam a ter uma quantidade de energia menor devido ao alinhamento dos campos e devido à aniquilação das mesmas. Vale ressaltar que essa diminuição de energia interna resulta em um estado de metaestabilidade, visto que a energia associada a cada uma dessas discordâncias ainda persiste no material.

Essa diminuição de energia interna por sua vez afeta diretamente a recristalização, pois se sabe que a energia gerada na deformação é o driving force para o crescimento dos núcleos livres de deformação durante a recristalização e essa redução na energia irá resultar em uma redução no potencial para a recristalização que consequentemente implica em tempos e temperaturas maiores para que ocorra a recristalização quando comparado com a recristalização do material apenas deformado, conforme ilustrado pela Figura 18.

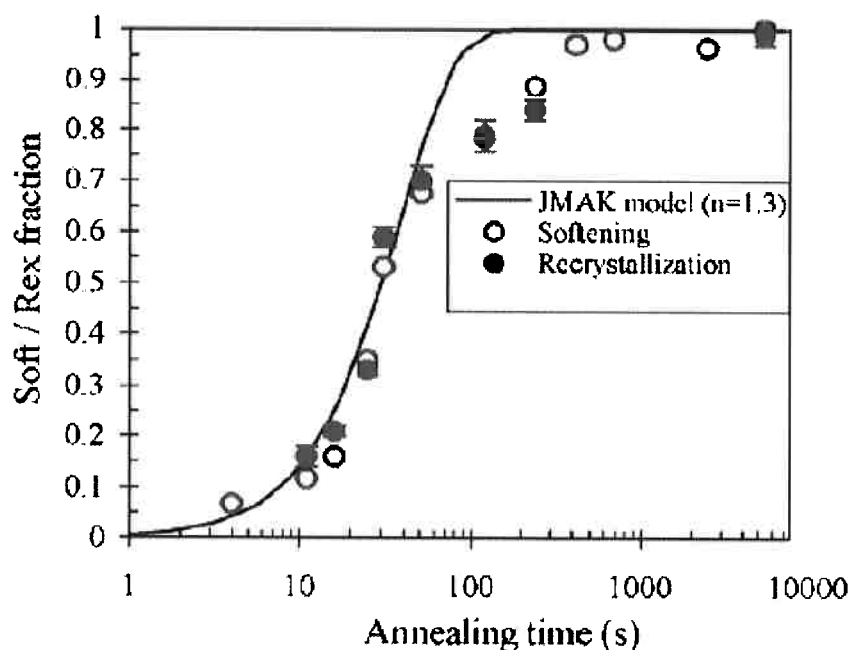


Figura 18: Efeito da recuperação na recristalização [24]

Essa figura nos mostra a variação na curva de recristalização [24], para amostras que sofreram reduções de 84% e depois passaram por um tratamento térmico de recuperação prévio à recristalização. A curva contínua nos fornece como seria o comportamento teórico da recristalização enquanto os pontos em vermelho e azul nos fornecem o volume recristalizado e a porcentagem amolecida respectivamente.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Material Utilizado

O material de partida para a realização desse trabalho foi extraído de duas bobinas de aço elétrico de grão não orientado, gentilmente cedido pela Brasmatal Waelzholz. A composição química do material é dada pela Tabela 1. As duas bobinas diferem uma da outra quanto à sua redução de 5% e de 10% (skin pass) realizada através de laminação a frio. Elas apresentam densidade de 7781 kg/m<sup>3</sup> e espessura de 602μm para o deformado com 5% de redução e de 583 μm para o deformado com 10% de redução.

Sabendo que o material apresentava originalmente espessura de 620 mm, podemos calcular a deformação real ( $\epsilon_{real}$ ) para os dois tipos de bobinas pela equação abaixo.

$$\epsilon_{real} = \ln \left( \frac{e_{inicial}}{e_{final}} \right)$$

Utilizando essa formula temos que a bobina que apresentou 5% de redução possui deformação real de 2,9% enquanto a bobina com 10% de redução apresentou deformação real de 5,8%, ambos para o caso de compressão.

Tabela 1: Composição química do material a ser estudado

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%

As bobinas foram cortadas com o uso de guilhotina, a qual o uso nos foi gentilmente cedido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), para a extração dos corpos de prova para os diversos tipos de ensaios a serem realizados. Todos os corpos de prova apresentam o comprimento paralelo à direção de laminação das chapas. Após os cortes, as amostras foram encaminhadas para o recozimento. Essa etapa teve como objetivo a produção de amostras com diferentes tempos e temperaturas de recozimento.

### 3.2 Tratamentos Térmicos

Para o estudo dos efeitos da recuperação nas propriedades magnéticas foram realizados tratamentos térmicos de recozimento nas amostras. Cada tratamento térmico foi feito variando tempo e temperatura como mostrado na tabela abaixo.

**Tabela 2: Tratamentos térmicos realizados**

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)			
	300	400	500	700
30	X	x	x	x
60	X	x	x	x
90	X	x	x	

Os tratamentos térmicos foram realizados em fornos Brasimet pertencentes à Brasmatal Waelzholz com atmosfera inerte de modo a eliminar os efeitos de uma possível camada oxidada produto da corrosão generalizada, fruto da elevada temperatura e os tempos elevados dos tratamentos.

Estudos realizados Michalak e Paxton em 1961[25] nos permitem observar conforme mostra a Figura 19 que para uma amostra de ferro com elevado grau de pureza temos uma grande variação na fração recuperada medida pela tensão de escoamento quando comparamos as temperaturas de 300, 400 e 500°C, sendo que essa diferença já fica visível a partir de 50 minutos.

Os tratamentos térmicos adotados foram escolhidos de modo a estudar o efeito do tempo e da temperatura no processo de recuperação simulando diversos tipos de tratamentos. Além disso, foi escolhido realizar os tratamento térmicos de recozimento a 700°C com 30 e 60 minutos para analisar as propriedades mecânicas e magnéticas do material livre de deformação, as perdas totais, o campo necessário para as induções de 1 e 1,5T e o limite de escoamento.

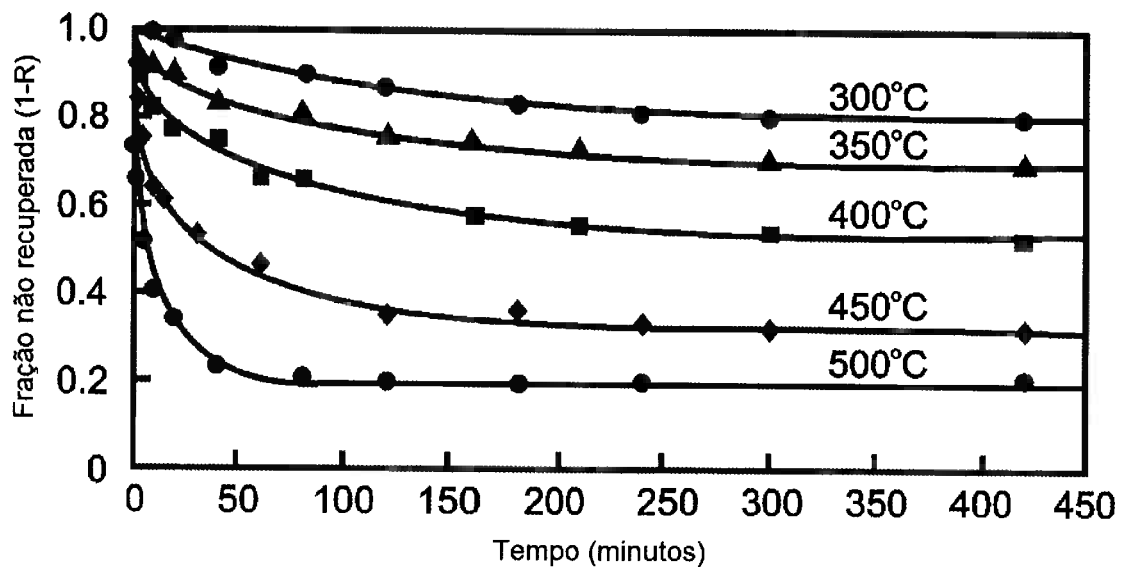


Figura 19: Curva da fração não recuperada em função do tempo para uma amostra de ferro adaptada de [25]

### 3.3 Medidas Magnéticas

Para a medida das perdas totais e de campo necessário para indução de 1 e 1,5T das amostras foi utilizado o equipamento de medidas soken pertencentes ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Esse equipamento nos permite medir localmente as perdas totais e o campo de saturação de chapas de material magnético para diferentes induções e frequências. Para essas medidas foram preparadas chapas de material magnético com 30 cm de comprimento e 3 cm de largura, a preparação dessas chapas foi feita utilizando uma guilhotina (de salto) também pertencente ao IPT. Após o corte das amostras em suas dimensões padrão foram realizados os tratamentos térmicos.

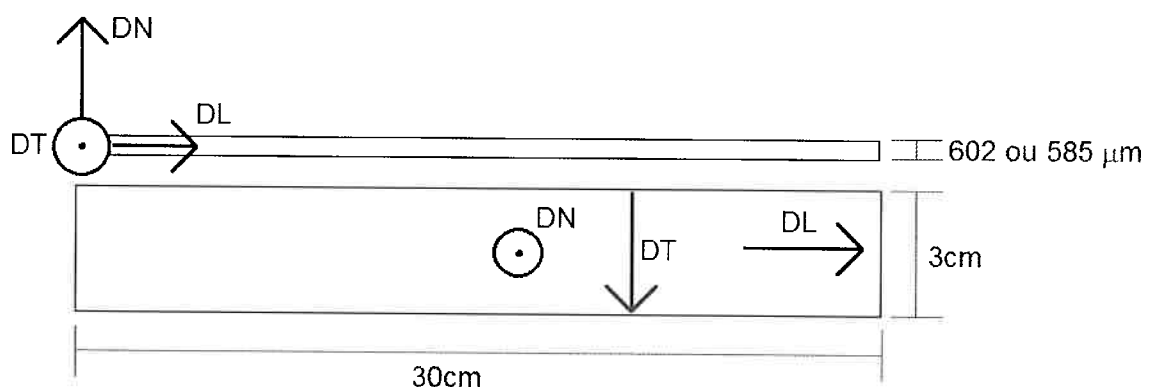


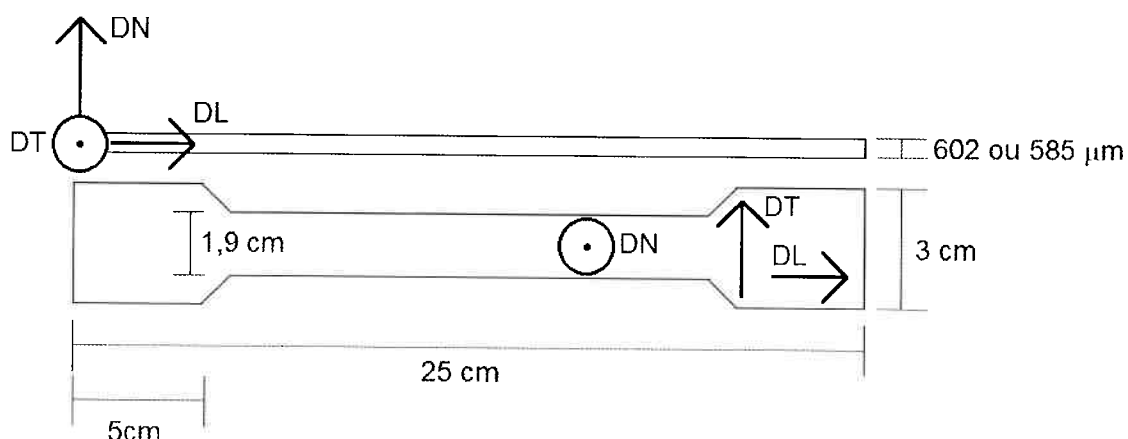
Figura 20: Esquema das dimensões dos corpos de prova para medidas magnéticas



Em relação à medida foram realizadas cinco medidas em cada chapa de tratamento térmico único, para a qual foi calculada uma média aritmética para cada chapa utilizando essas medidas. Essas medidas foram realizadas para 60Hz de frequência devido à relevância nacional e utilizando induções de 1 e 1,5T. No total foram realizados 24 conjuntos de medidas sendo 12 para as chapas de material deformado com 5% de redução e 12 medidas para as chapas do material deformado com 10% de redução para os diversos tratamentos térmicos realizados.

### 3.4 Medidas Mecânicas

Para a análise das propriedades mecânicas foram preparados três corpos de prova para ensaios de tração para cada tratamento térmico realizado e para o material apenas deformado. Esses corpos de prova foram gerados por estampagem realizada na Brasmetal, os corpos de prova após estampagem tiveram suas bordas lixadas de modo a remover essa região da borda e eliminar o efeito de rebarbas e imperfeições nessa região. A estampagem foi realizada de modo a manter a direção de laminação como a direção do comprimento nos corpos de prova e apresentam suas dimensões conforme mostra a Figura 21.



**Figura 21: Corpo de prova de ensaio de tração**

Após a remoção das bordas com lixas mais finas, as amostras foram utilizadas para levantarmos as curvas de tensão deformação do material, dos quais foi obtido o limite de escoamento dos mesmos.

### 3.5 Parâmetro de recuperação

Percebendo essas variações de propriedades durante os tratamentos térmicos temos a necessidade de um número adimensional que nos forneça um método de comparar essas medidas. Martínez-de-Guerenu utiliza em seus trabalhos [26] o seguinte adimensional, que designa a fração recuperada (R) para uma propriedade medida, de modo a ser possível analisar amostras com diferentes condições de deformação, propriedades e temperaturas de tratamento.

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

Para o qual  $H_{c0}$  é o valor do campo coercivo do material após a deformação,  $H_{cf}$  é o campo coercivo do material completamente recristalizado e  $H_{c(T,t)}$  é o valor do campo coercivo para o material com determinado tratamento térmico à temperatura T e tempo t. Esse valor de “1-R” é comumente utilizado na literatura para descrever a evolução das propriedades, sendo implementado previamente por outros estudiosos[25], mas apenas utilizando propriedades mecânicas como limite de escoamento, limite de ruptura e dureza, temos que o valor “1-R” é utilizado para as propriedades mecânicas pois temos que a parcela não recuperada é mais importante para ser analisada, visto que com deformação essas propriedades melhoram.

Neste trabalho estaremos utilizando a mesma fórmula para calcular a parcela recuperada, utilizando a perda total, campo para as induções realizadas e limite de escoamento no lugar do campo coercivo, como mostrado abaixo para o caso das perdas totais  $P_t$ .

$$R = \frac{P_{t0} - P_{t(T,t)}}{P_{t0} - P_{tf}}$$

Esse parâmetro é muito importante para analisarmos a evolução das propriedades do material comparando suas propriedades quando deformado para as quando o mesmo encontra-se livre de deformação. No entanto, vale ressaltar que esse parâmetro adimensional leva em consideração as propriedades do material deformado o que pode gerar certa confusão, por exemplo, partindo do mesmo material inicial.

Aplicando duas deformações diferentes A e B sendo A maior que B temos que as propriedades do material que sofreu deformação A estarão mais afetadas pela deformação do que a do material que sofreu deformação B. Portanto caso tivermos mesmo valor de R para ambos temos que o material A irá apresentar maior variação de propriedade do que o material B em seus valores absolutos de propriedades.

Outro detalhe interessante é que esse parâmetro adotado não leva em consideração mudanças na microestrutura do material em especial mudanças no tamanho de grão do mesmo, sendo que essa característica do material influencia diretamente nas perdas.

Por esse motivo temos que o valor obtido para o parâmetro de recuperação serve mais como comparativo entre as propriedades que podemos obter pelo processo de recuperação em relação ao processo de recristalização. O ideal seria que o parâmetro independesse da microestrutura, de modo a tornar esse fator comparativo mais imparcial, no entanto para isso devemos aperfeiçoar essa formulação o que não é foco desse trabalho.

### **3.6 Metalografia**

A análise metalográfica foi realizada no laboratório Hubertus Copaert do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo. Primeiramente as amostras foram cortadas e embutidas em baquelite, elas passaram pelas lixas de água 600 e 1200, em seguida elas foram polidas com pasta de diamante com granulometria de 9, 3 e 1  $\mu\text{m}$  foi utilizado álcool 99,5% como lubrificante.

Acabado o polimento as amostras foram atacadas com uma solução de Nital 4% de modo a revelar os contornos de grão do material. Em seguida foi utilizada microscopia óptica com captação de imagens para obter as fotos.

Foram realizadas análises metalográficas e o estudo do tamanho de grão das amostras com 5 e com 10% de redução sem recozimento e de todos os tratamentos térmicos de modo a verificar se houve variação de microestrutura e se para as amostras com tratamentos térmicos de 700°C houve ou não recristalização.

## 4 Resultados

### 4.1 Medidas magnéticas

Feitas as medidas com o equipamento Soken, com esse ensaio obtivemos cinco medidas para cada amostra, com esses valores foi calculada uma média aritmética com os valores de perdas e campo necessário para as induções de 1 e 1,5 T. Esses valores para as amostras com 5% de redução que sofreram tratamento térmico e do material apenas deformado mostram-se na Tabela 3.

**Tabela 3: Valores obtidos pelo ensaio Soken para as amostras com 5% de redução**

		Perdas Totais (W/kg)	Campo (A/m)	Perdas Totais (W/kg)	Campo (kA/m)
Temperatura (°C)	Tempo (min)	1T	1T	1,5T	1,5T
s/recozimento		7,7	984	13,6	2,8
300	30	7,6	944	13,5	2,6
	60	7,6	966	13,4	2,8
	90	7,6	958	13,3	2,8
400	30	7,3	892	12,9	2,7
	60	6,7	752	12,3	2,4
	90	6,7	766	12,0	2,2
500	30	5,7	512	11,0	1,7
	60	5,1	410	10,1	1,3
	90	5,2	418	10,3	1,4
700	30	4,3	232	8,9	0,8
	60	3,6	192	8,1	0,7

Para as amostras com 10% de redução com as medidas obtidas pelo Soken foi obtida a seguinte tabela de dados:

Tabela 4: Valores obtidos pelo ensaio Soken para as amostras com 10% de redução

		Perdas Totais (W/kg)	Campo (A/m)	Perdas Totais (W/kg)	Campo (kA/m)
Temperatura (°C)	Tempo (min)	1T	1T	1,5T	1,5T
s/recozimento		8,6	1232	14,4	3,3
300	30	8,1	1128	14,5	3,3
	60	8,1	1081	14,6	3,1
	90	8,4	1172	14,4	3,5
400	30	7,9	1018	13,8	2,9
	60	7,3	896	13,2	2,8
	90	7,3	896	12,9	2,6
500	30	6,3	627	11,8	2,3
	60	5,6	466	11,0	1,7
	90	5,2	380	10,4	1,5
700	30	2,8	144	6,7	0,7
	60	3,0	160	7,2	0,7

## 4.2 Medidas Mecânicas

Realizados os ensaios de tração obtivemos os seguintes valores de limite de escoamento, com os três dados foi tirada a média aritmética para gerar as tabelas de dados, para as amostras tratadas com 5% de deformação temos a Tabela 5.

**Tabela 5: Valores obtidos pelo ensaio de tração para as amostras com 5% de redução**

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Limite de escoamento (MPa)
s/recozimento		463
300	30	466
	60	452
	90	454
400	30	443
	60	414
	90	432
500	30	389
	60	368
	90	371
700	30	295
	60	294

Para a amostra com 10% de deformação obtivemos os seguintes valores médios pelos ensaios de tração.

**Tabela 6: Valores obtidos pelo ensaio de tração para as amostras com 10% de redução**

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Limite de escoamento (MPa)
s/recozimento		521
300	30	510
	60	508
	90	507
400	30	495
	60	458
	90	466
500	30	417
	60	401
	90	392
700	30	243
	60	250

### 4.3 Parâmetro de recuperação

Utilizando o parâmetro de recuperação adotado obtivemos os seguintes valores de parcela recuperada para as amostras que sofreram 5% de redução.

**Tabela 7: Parcela recuperada para diversas medidas para as amostras com 5% de redução**

		Perdas Totais	Campo	Perdas Totais	Campo	
Temperatura (°C)	Tempo (min)	1T	1T	1,5T	1,5T	Limite de escoamento
s/recozimento		0	0	0	0	0
300	30	0,03	0,05	0,02	0,07	-0,02
	60	0,04	0,02	0,04	-0,02	0,06
	90	0,04	0,03	0,05	-0,01	0,05
400	30	0,12	0,12	0,13	0,05	0,11
	60	0,27	0,30	0,26	0,19	0,29
	90	0,27	0,28	0,31	0,29	0,18
500	30	0,52	0,61	0,51	0,53	0,44
	60	0,68	0,74	0,68	0,72	0,56
	90	0,65	0,73	0,64	0,69	0,54

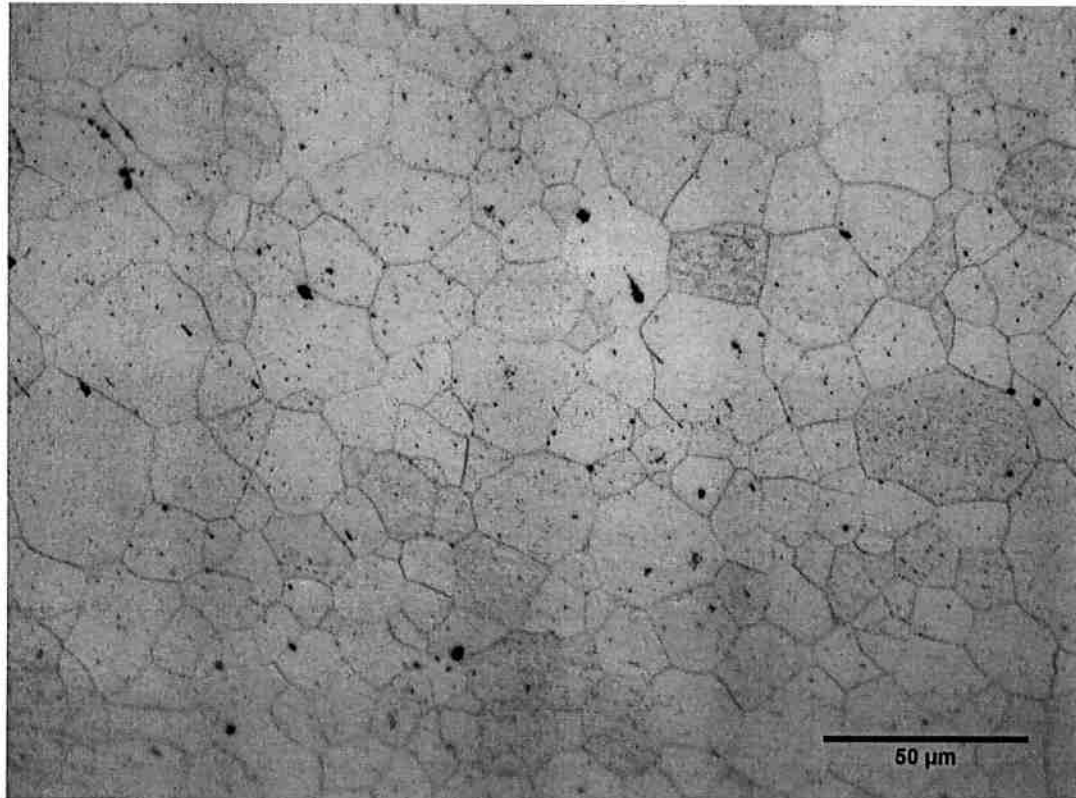
Para o cálculo do parâmetro foi utilizado como os valores das propriedades recristalizadas para as duas deformações, os valores obtidos pelas amostras tratadas à 700°C por 60 minutos, visto que para a amostra com 5% de redução em com 30 minutos de tratamento não tivemos recristalização completa. Para as amostra com 10% de redução tivemos os seguintes valores de parâmetro de recuperação

**Tabela 8: Parcela recuperada para diversas medidas para as amostras com 10% de redução**

		Perdas Totais	Campo	Perdas Totais	Campo	
Temperatura (°C)	Tempo (min)	1T	1T	1,5T	1,5T	Limite de escoamento
s/recozimento		0	0	0	0	0
300	30	0,08	0,10	-0,01	0,01	0,04
	60	0,08	0,14	-0,02	0,07	0,05
	90	0,03	0,06	0,00	-0,07	0,05
400	30	0,12	0,20	0,08	0,17	0,09
	60	0,22	0,31	0,16	0,19	0,23
	90	0,22	0,31	0,20	0,27	0,20
500	30	0,40	0,56	0,35	0,38	0,38
	60	0,53	0,71	0,46	0,62	0,44
	90	0,60	0,79	0,53	0,70	0,47

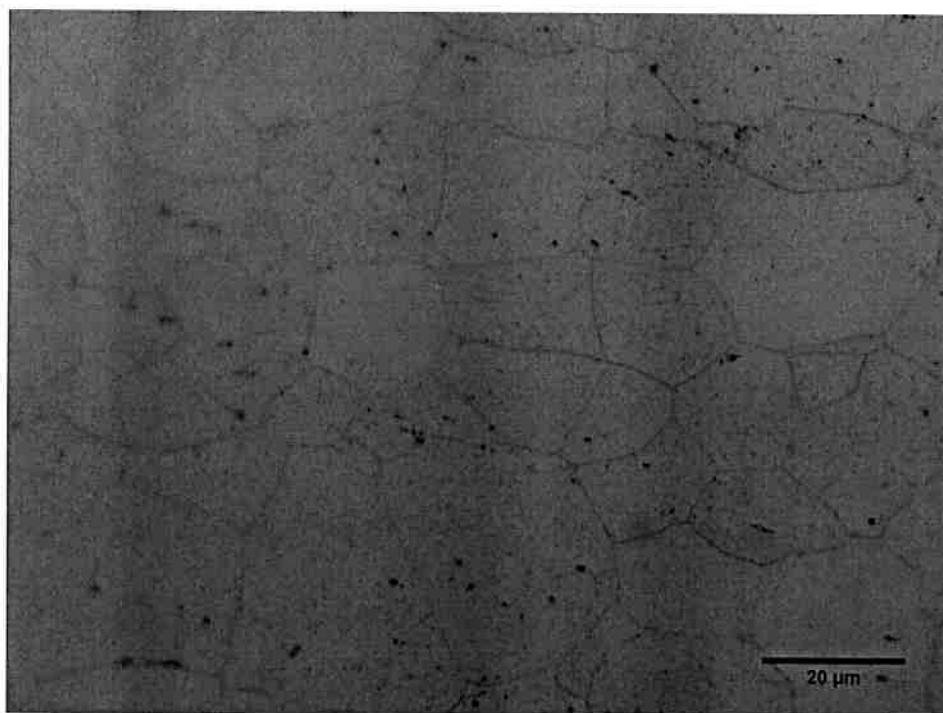
#### 4.4 Metalografia

Realizando a preparação das amostras e os ataques metalográficos descritos previamente observamos as seguintes microestruturas ao longo de suas respectivas matrizes. A fase presente em todas as micrografias é a ferrita e os pontos escuros são cavidades originadas de corrosão por pite no material.

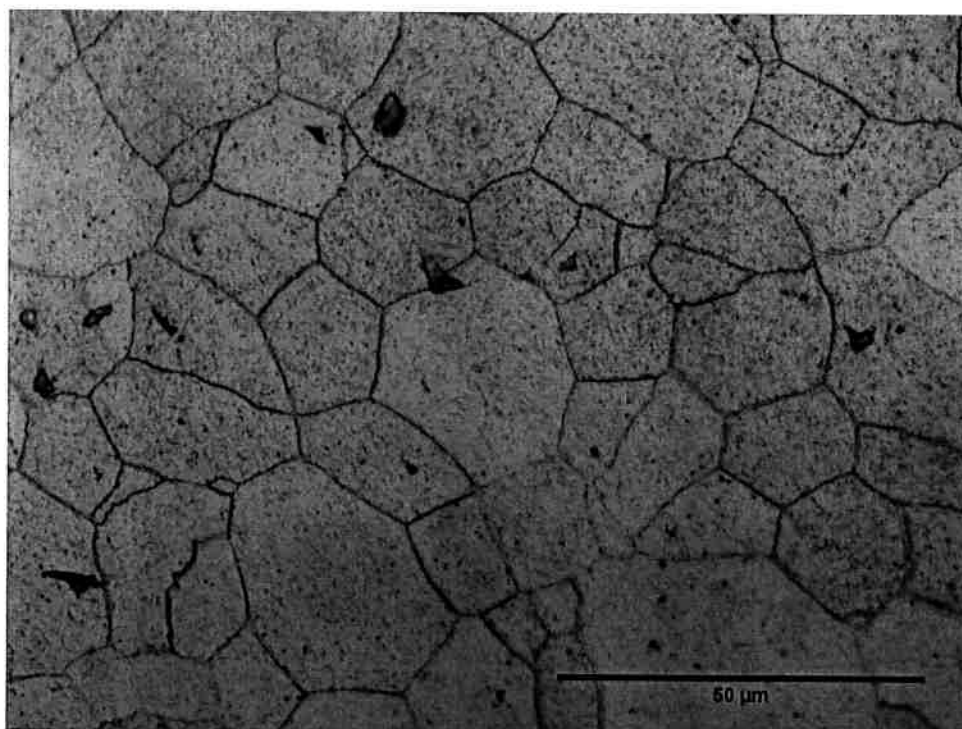


**Figura 22: Microestrutura da amostra com 5% de deformação sem recozimento com aumento de 500x**

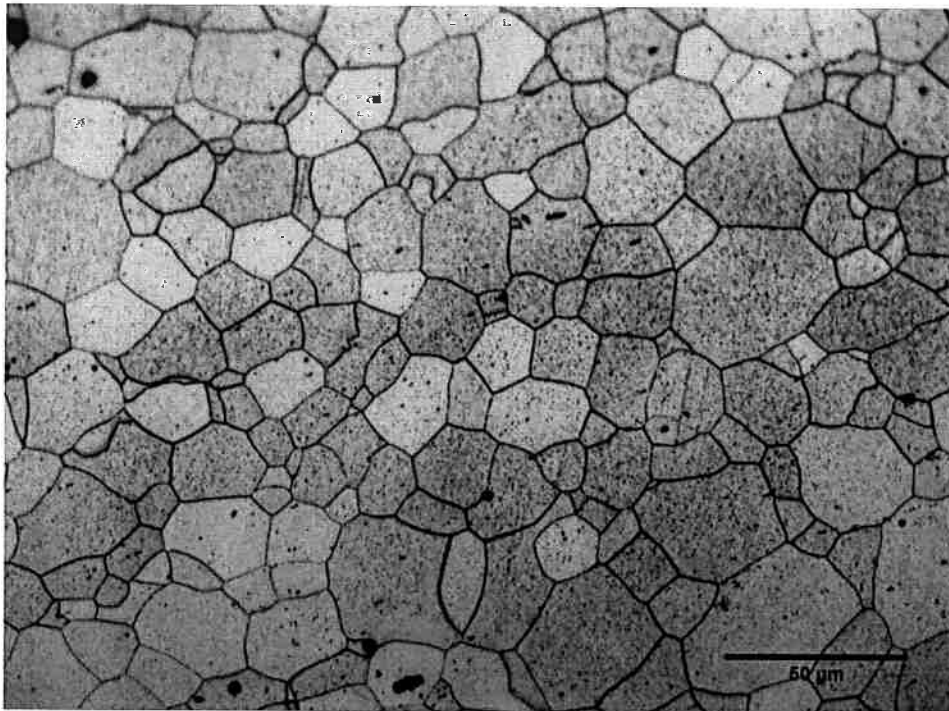




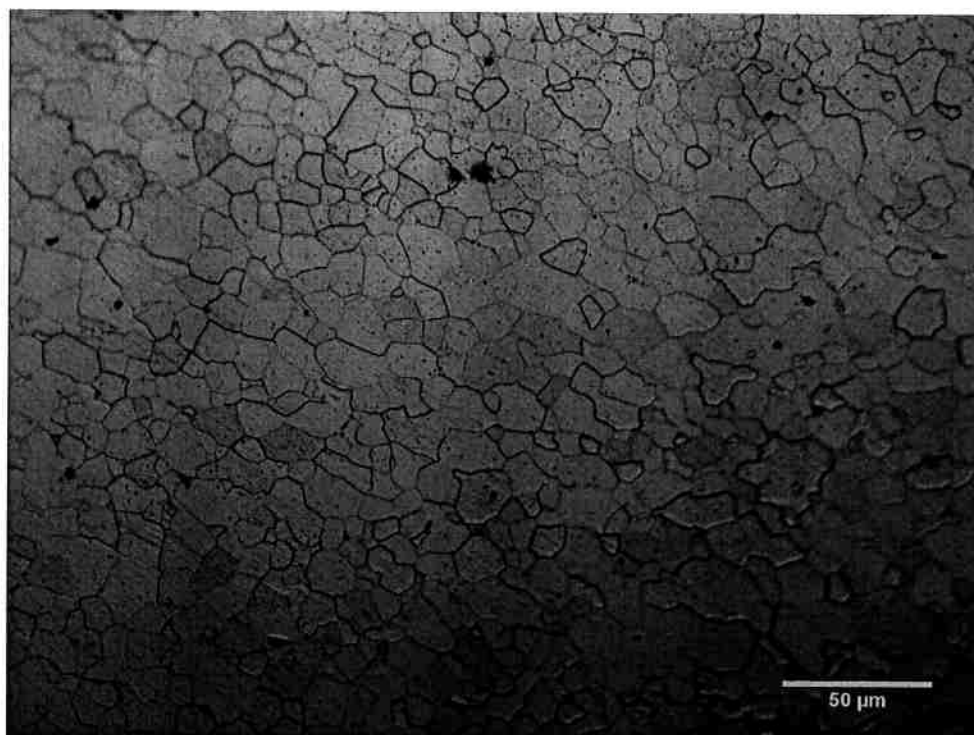
**Figura 23: Microestrutura da amostra com 10% de redução sem recozimento com aumento de 1000x**



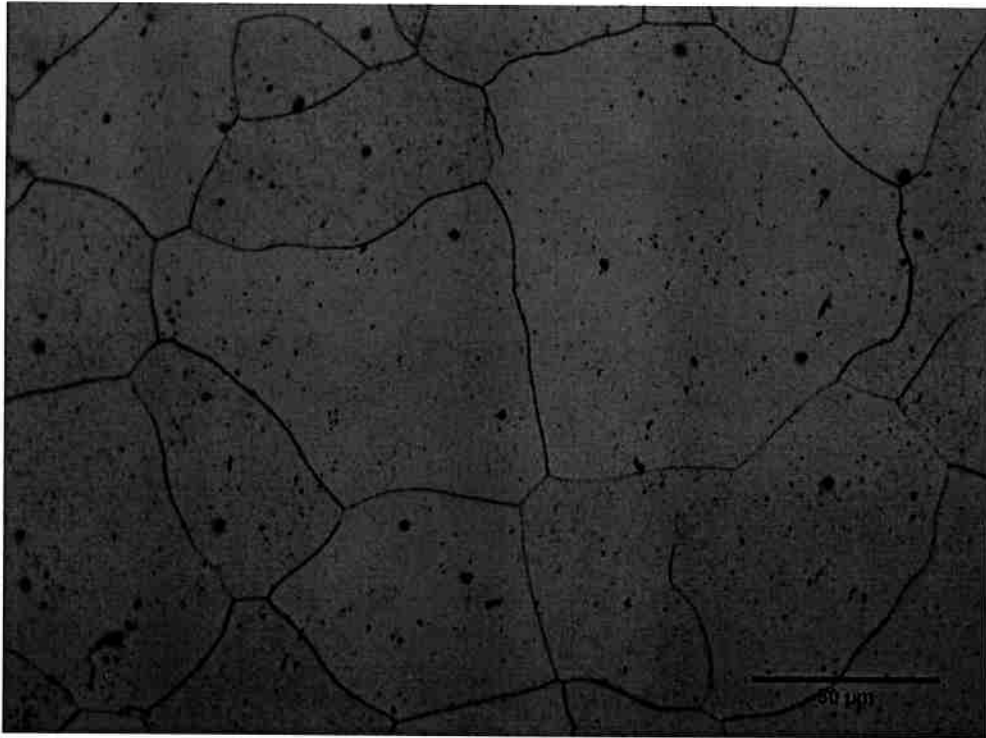
**Figura 24: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 500°C por 60 minutos com aumento de 1000x**



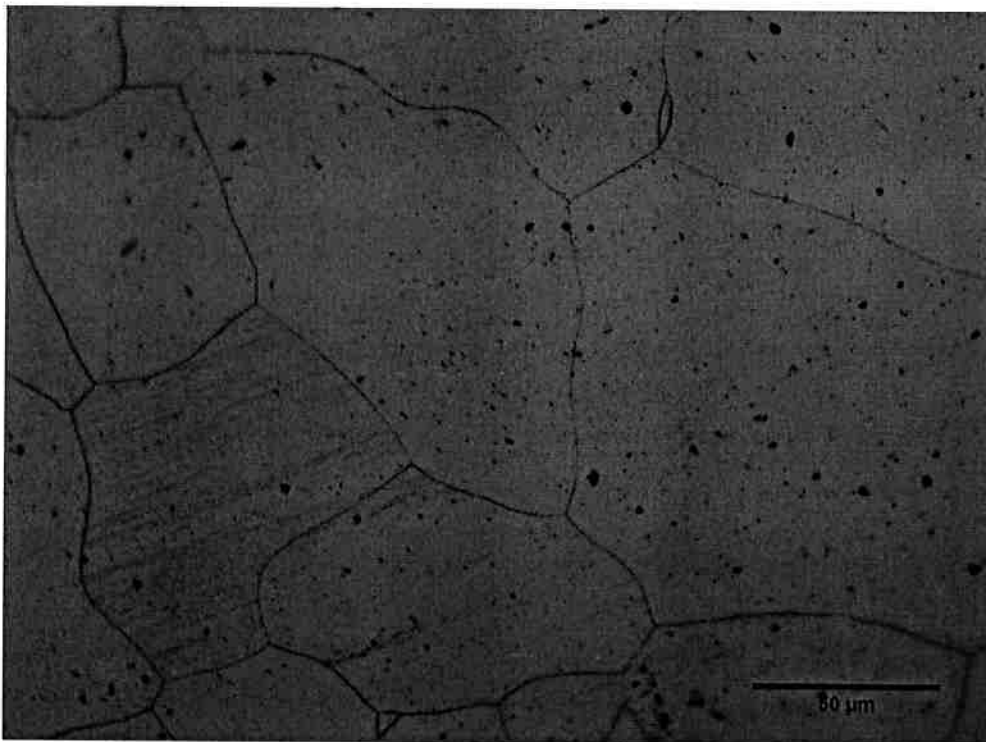
**Figura 25: Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 500°C por 60 minutos com aumento de 500x**



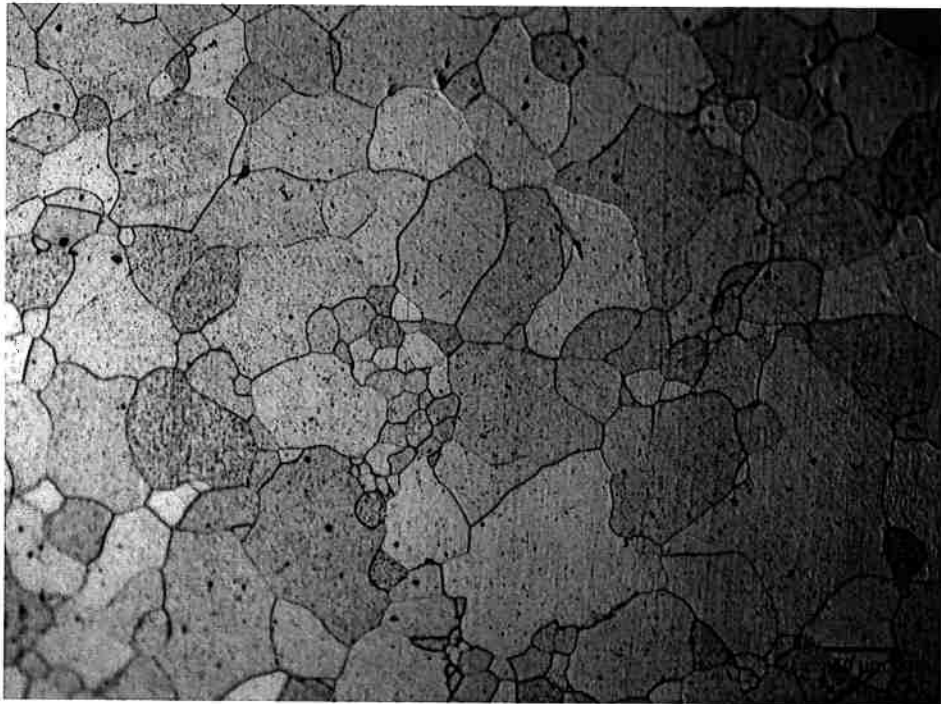
**Figura 26: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 500°C por 90 minutos com aumento de 200x**



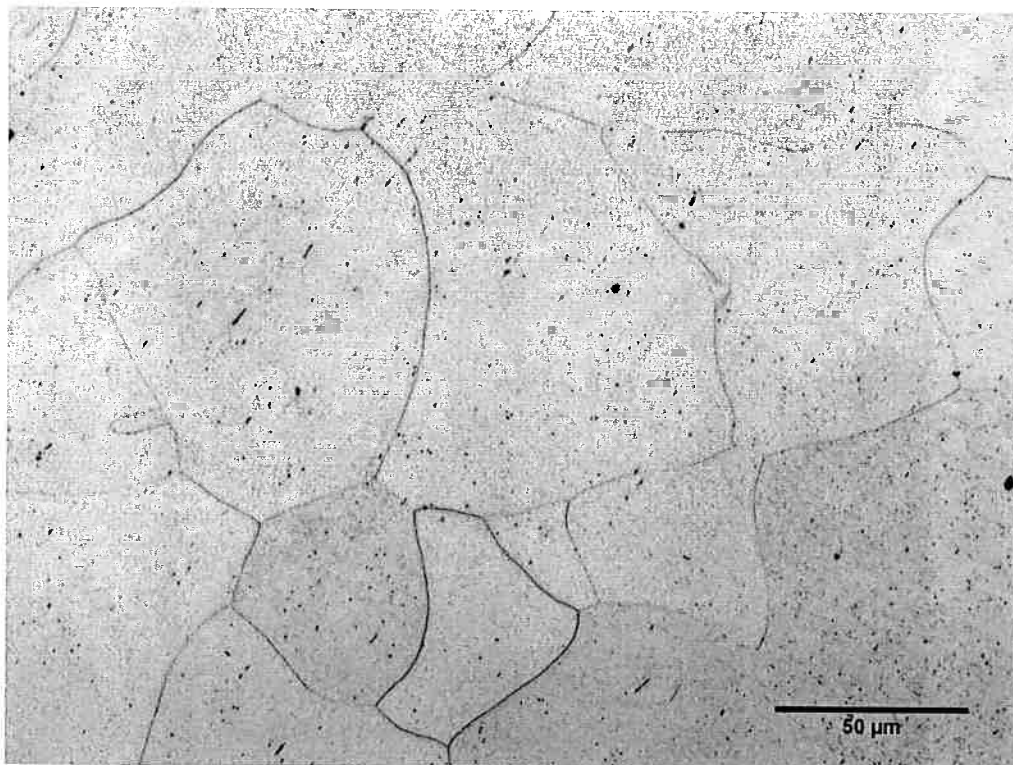
**Figura 27: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 700°C por 60 minutos com aumento de 500x**



**Figura 28: Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 700°C por 60 minutos com aumento de 500x**



**Figura 29: Microestrutura da amostra com 5% de redução com tratamento térmico de 700°C por 30 minutos com aumento de 200x**



**Figura 30: Microestrutura da amostra com 10% de redução com tratamento térmico de 700°C por 30 minutos com aumento de 500x**

Pelas figuras utilizando o programa ImageJ medimos os tamanhos de grão pelo método do intercepto para as amostras. Para as amostras sem tratamento térmico obtivemos tamanho de grão de aproximadamente 14  $\mu\text{m}$ . Esse tamanho de grão persistiu ao longo das amostras com tratamentos térmicos de 300, 400 e 500°C. Para as amostras com tratamento térmico em 700°C temos que para as amostras com 60 minutos tivemos tamanho de grão de 42  $\mu\text{m}$  para a amostra com 10% de redução e tamanho de grão de 59  $\mu\text{m}$ .

Todas as amostras apresentaram tamanho de grão constante, com exceção das amostras com 5% de redução tratadas à 700°C por 30 minutos que apresentaram regiões com tamanho de grão menor do que o resto do material, como mostrado na Figura 29.

## 5 Discussão

A partir dos valores obtidos de perdas totais podemos traçar as seguintes curvas:

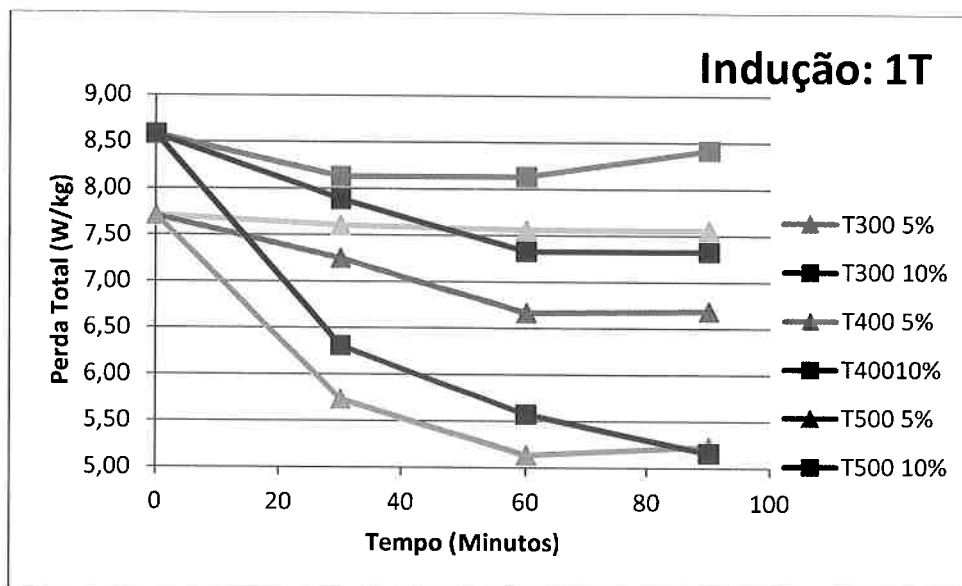


Figura 31: Curva da variação da perda total para os tratamentos térmicos realizados para indução de 1T

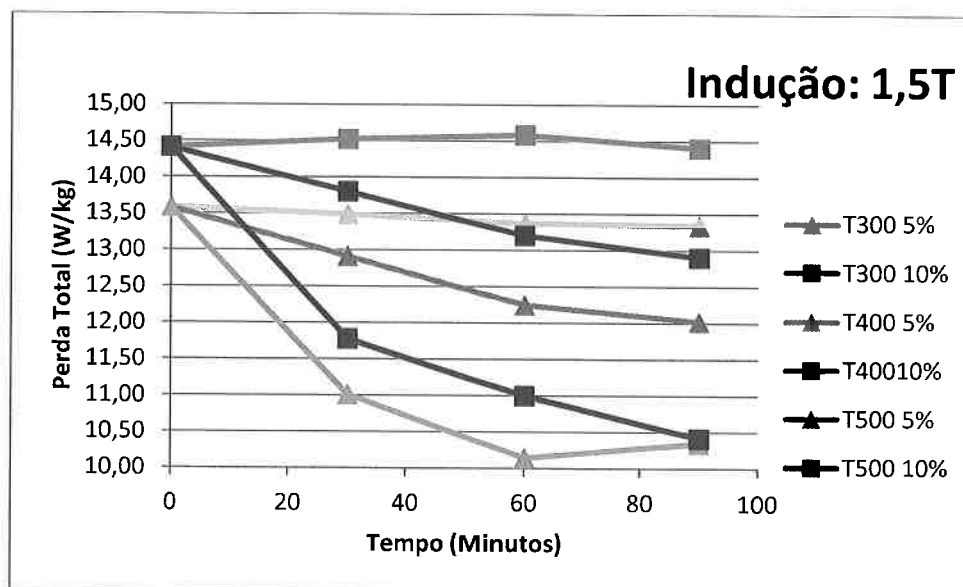
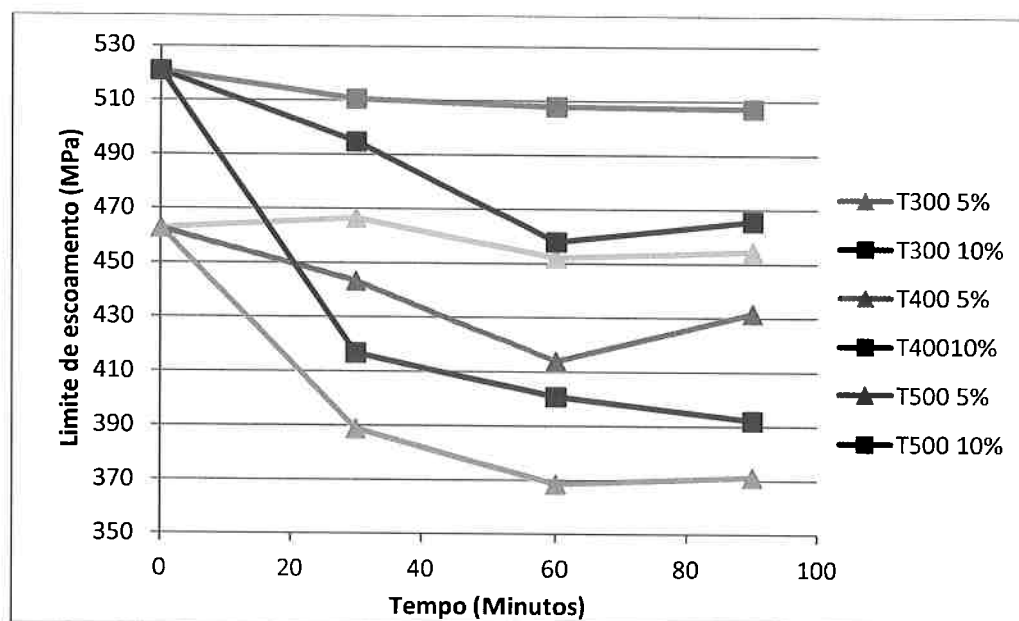


Figura 32: Curva da variação da perda total para os tratamentos térmicos realizados para indução de 1,5T

A partir dessas curvas podemos observar que conforme aumentamos a temperatura e o tempo do tratamento térmico, temos que, de modo geral uma queda nas perdas das amostras medidas. Observamos 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 temos basicamente o mesmo valor de perdas.

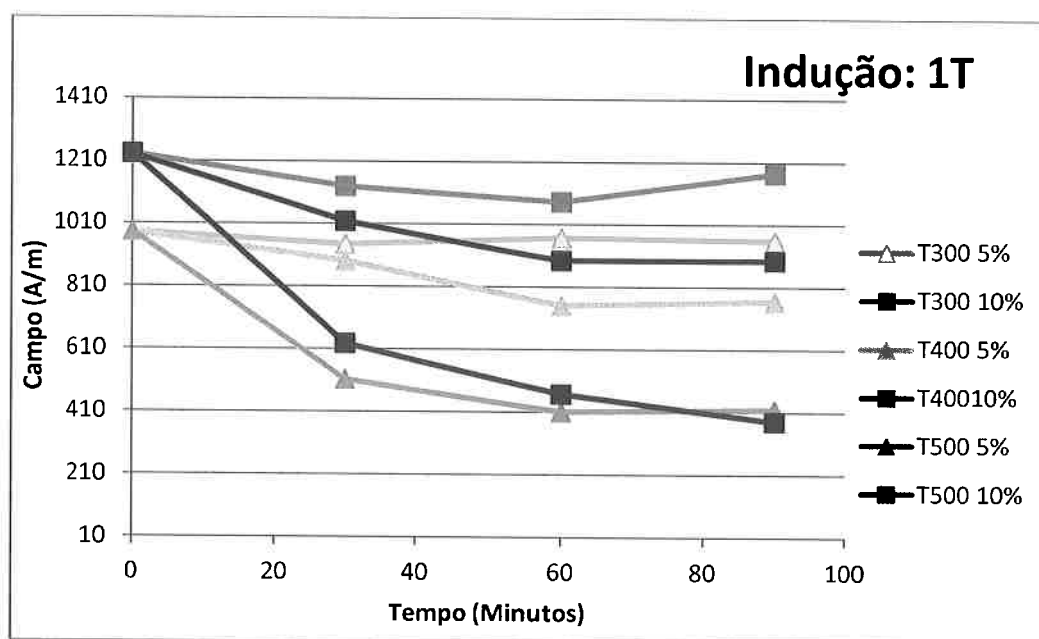
Considerando o limite de escoamento temos o seguinte gráfico:



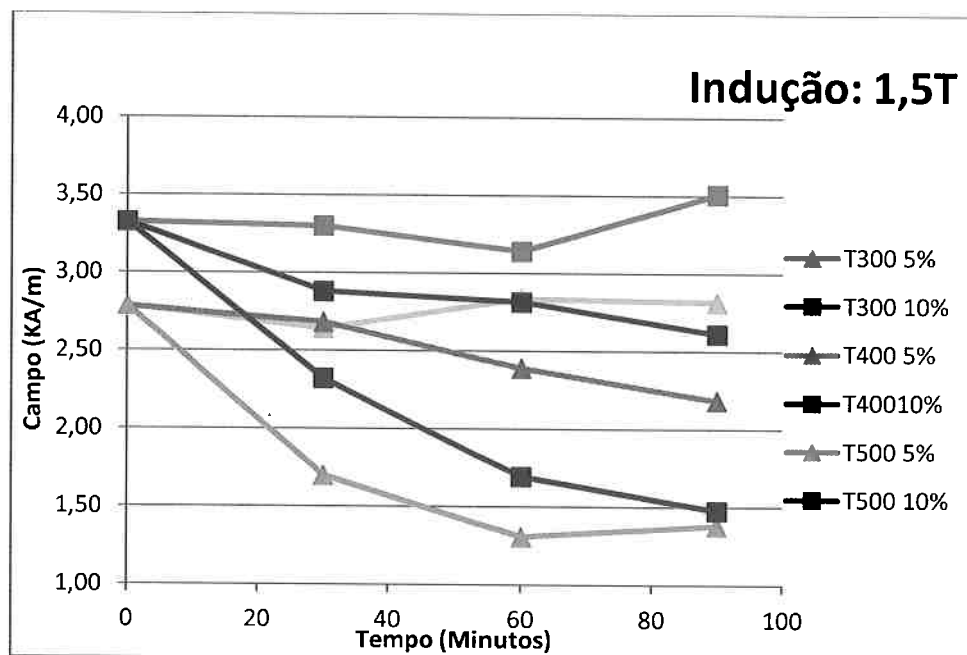
**Figura 33: Variação do limite de escoamento para os diversos tratamentos térmicos realizados**

A partir desse gráfico podemos observar um comportamento análogo ao das perdas, com valores decrescentes com o aumento da temperatura e tempo dos tratamentos térmicos.

Finalmente temos as curvas da variação do campo magnético, para o qual podemos obter as seguintes curvas:



**Figura 34: Variação do campo magnético para os diversos tratamentos térmicos realizados para indução de 1T**



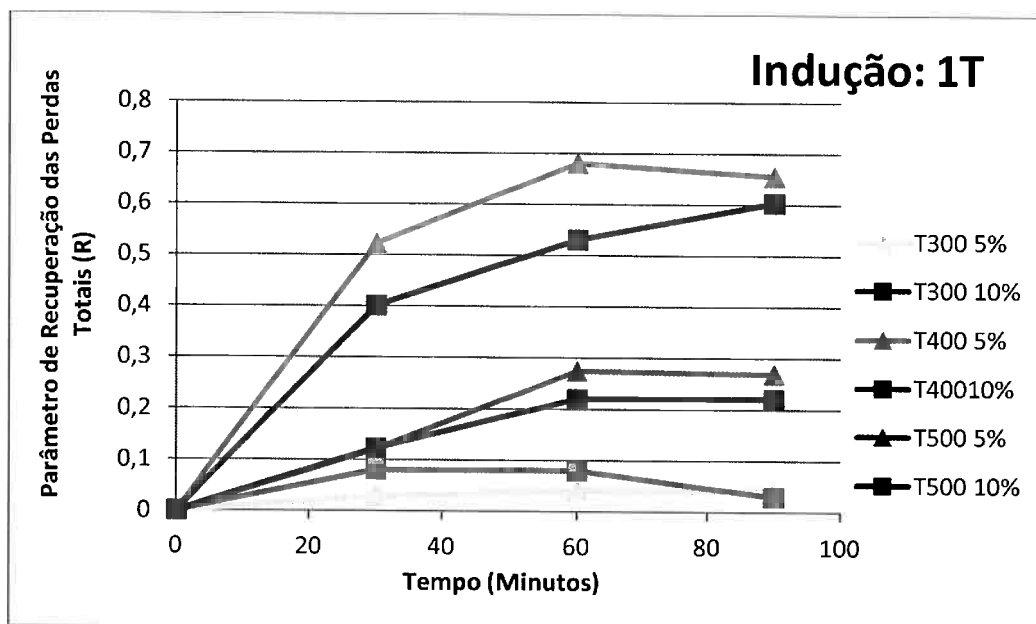
**Figura 35: Variação do campo magnético para os diversos tratamentos térmicos realizados para indução de 1,5T**

O comportamento se mantém para as medidas de campo magnético de maneira análoga, e como podemos observar, para os tratamentos térmicos em 300°C temos pouca variação e o efeito da recuperação pode ser desconsiderado.

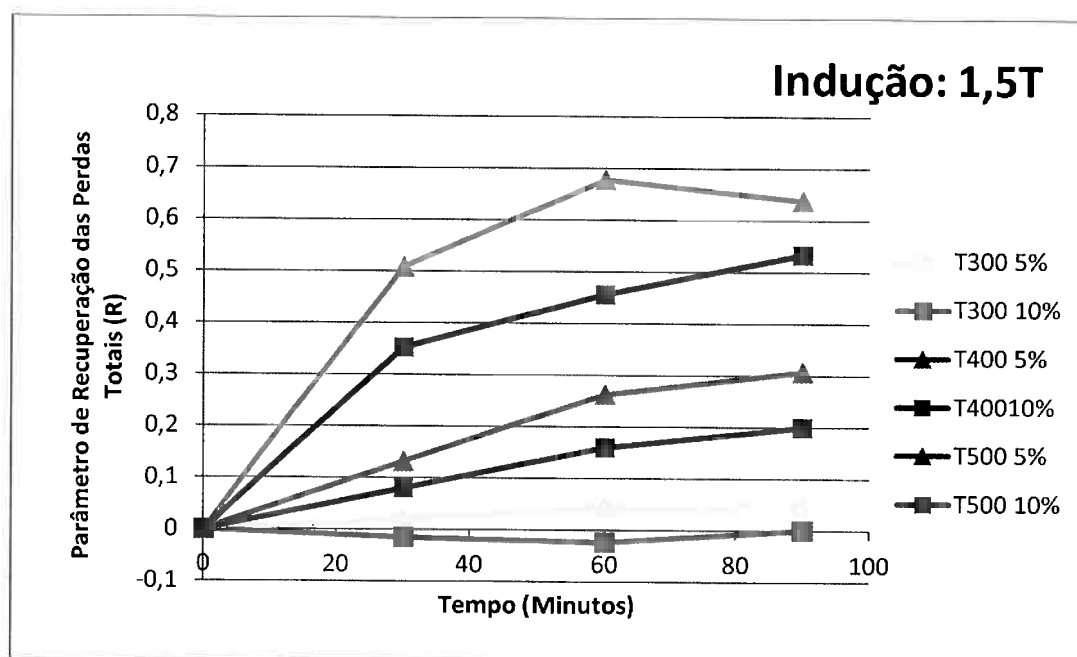
Em relação aos tratamentos térmicos temos que pelas metalografias as amostras não apresentaram mudança em suas microestruturas, apresentando mesmo tamanho de grão para as amostras com tratamentos térmicos de 300, 400 e 500°C. E para as amostras com tratamento térmico de 700°C por 60 minutos observamos 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.

Utilizando o parâmetro de recuperação podemos obter as seguintes curvas calculadas utilizando as perdas totais:





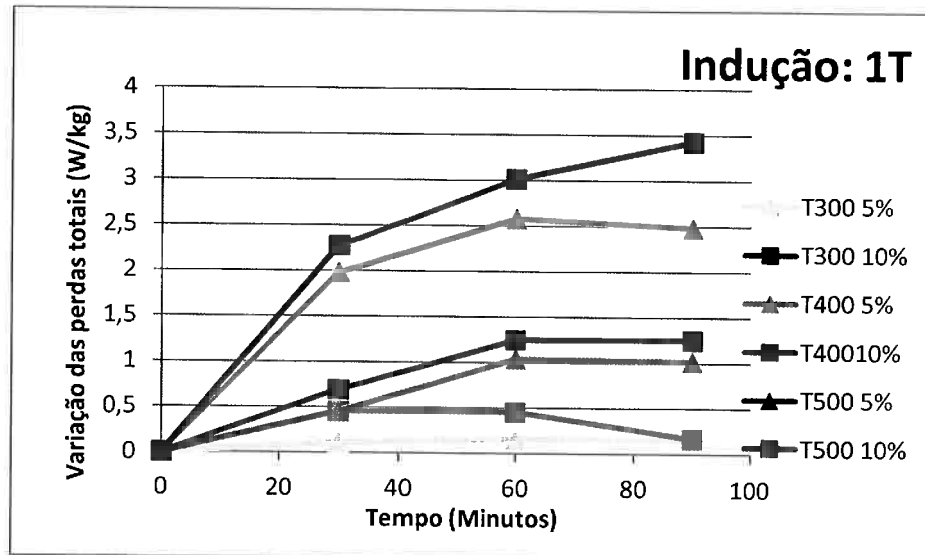
**Figura 36: Parâmetro de recuperação calculado pelas perdas totais medidas para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1T**



**Figura 37: Parâmetro de recuperação calculado pelas perdas totais medidas para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1,5T**

A partir dessas curvas podemos observar que para ambas as induções, temos que, 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 abaixo.

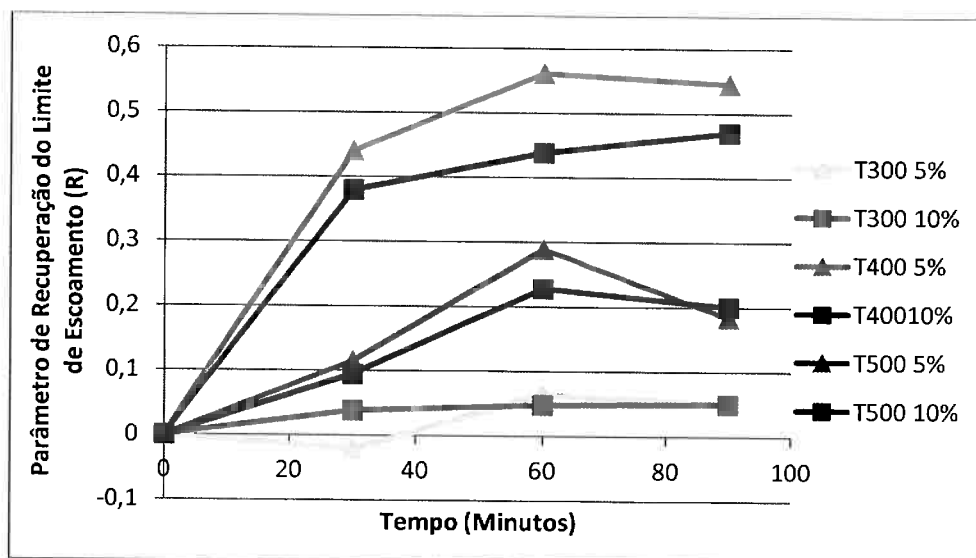


**Figura 38: Variação das perdas totais em relação à medida deformada em função dos tratamentos térmicos realizados para indução de 1T**

Essa curva ilustra bem que é mais fácil de obtermos uma redução de 1W/kg nas perdas do material para deformações maiores, no entanto vale ressaltar que com deformações maiores as perdas também aumentarão, isso balanceando esse efeito.

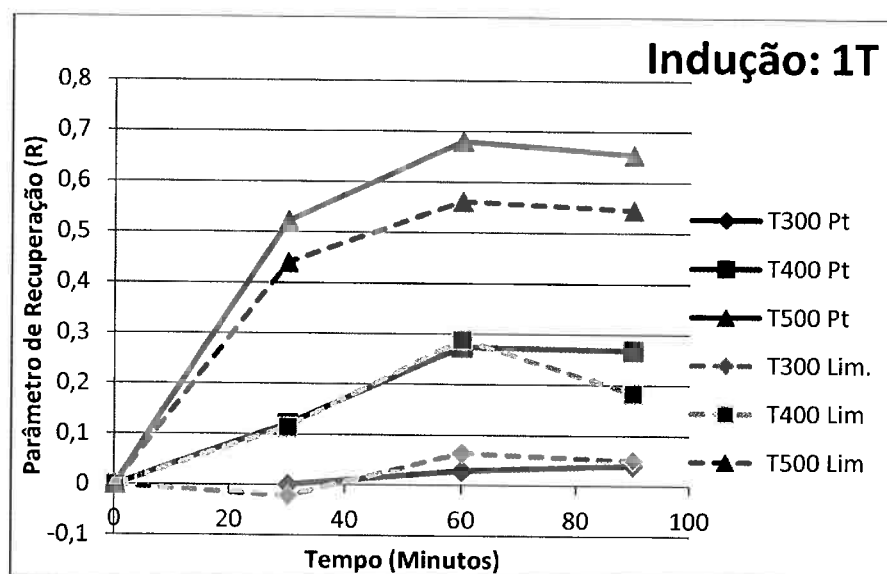
Pelas curvas podemos observar que para os tratamentos térmicos realizados a 500°C podemos ver que o metal chega a apresentar parâmetro de recuperação de 70% o que é muito bom visto que queremos as menores perdas possíveis.

Utilizando o parâmetro de recuperação calculado pelo limite de escoamento temos a seguinte curva.



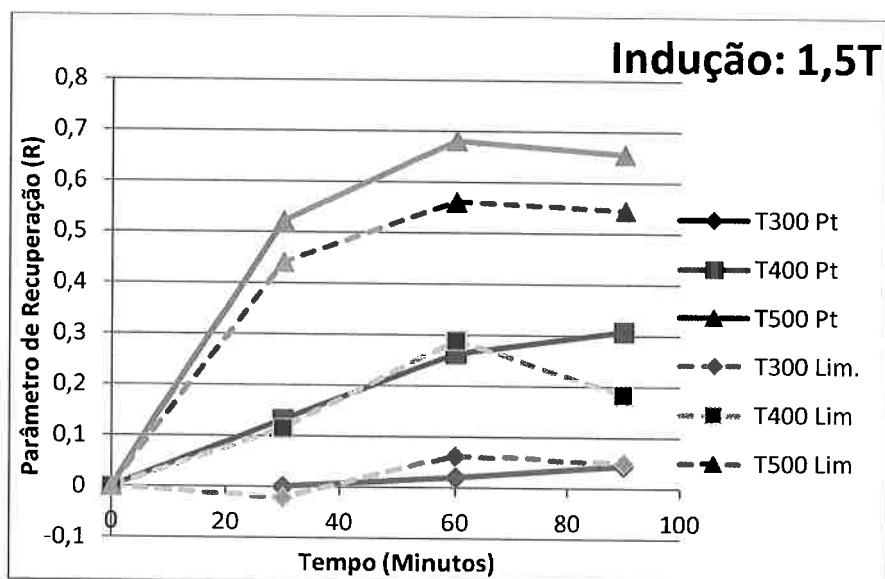
**Figura 39: Parâmetro de recuperação calculado pelo limite de escoamento para os diversos tratamentos térmicos realizados**

O parâmetro de recuperação calculado pelo limite de escoamento nos revela que as curvas para o material com 5 e com 10% de redução apresentam valores muito próximos um do outro, apenas para o tratamento térmico à 500°C que as curvas parecem se desprender. Também podemos observar que o parâmetro de recuperação calculado não chega a 60%, o que é bom visto que se deseja manter essa propriedade. A partir dessa diferença de comportamento podemos traçar curvas comparando o parâmetro de recuperação calculado pelas perdas totais e o calculado pelo limite de escoamento.



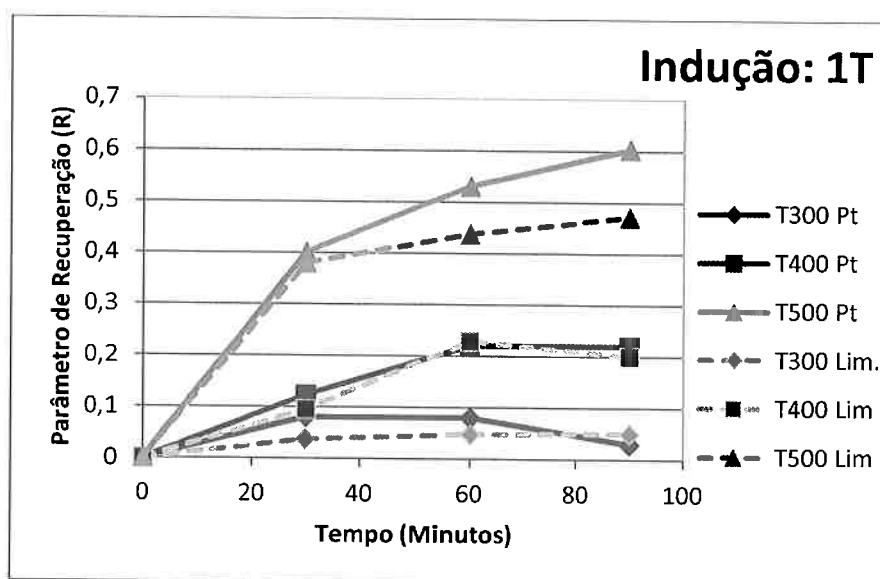
**Figura 40: Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1T e o limite de escoamento para as amostras com 5% de redução**

Além disso, observamos que esse comportamento se mantém com o aumento da indução, como mostrado pela Figura 41.

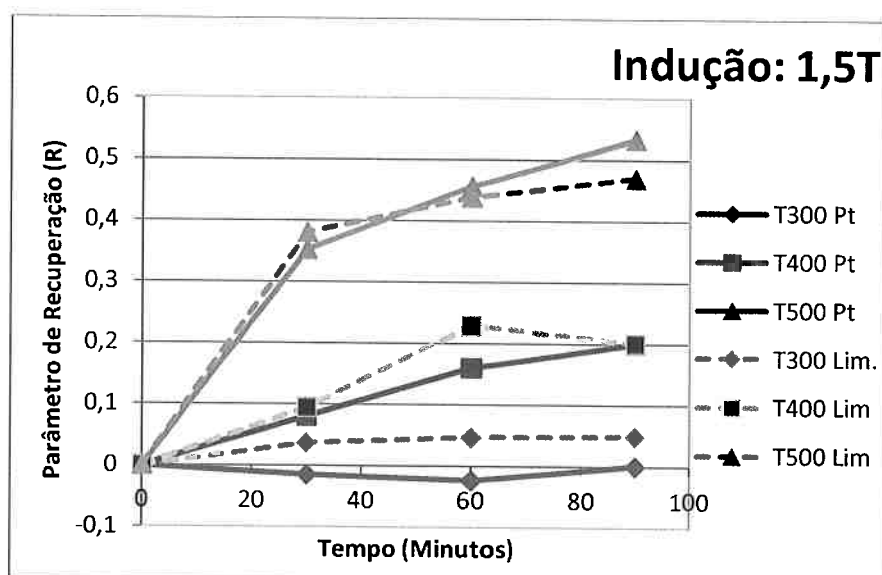


**Figura 41:** Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1,5T e o limite de escoamento para as amostras com 5% de redução

Para as amostras que sofreram 10% de redução temos que o comportamento descrito nas amostras com 5% de redução se mantiveram, conforme mostrado pelas curvas abaixo:



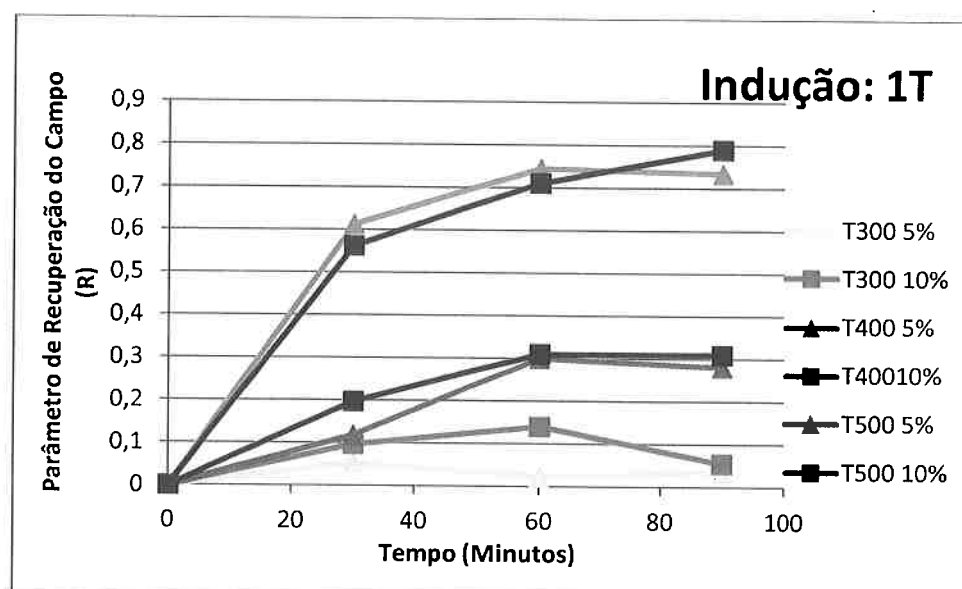
**Figura 42:** Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1T e o limite de escoamento para as amostras com 10% de redução



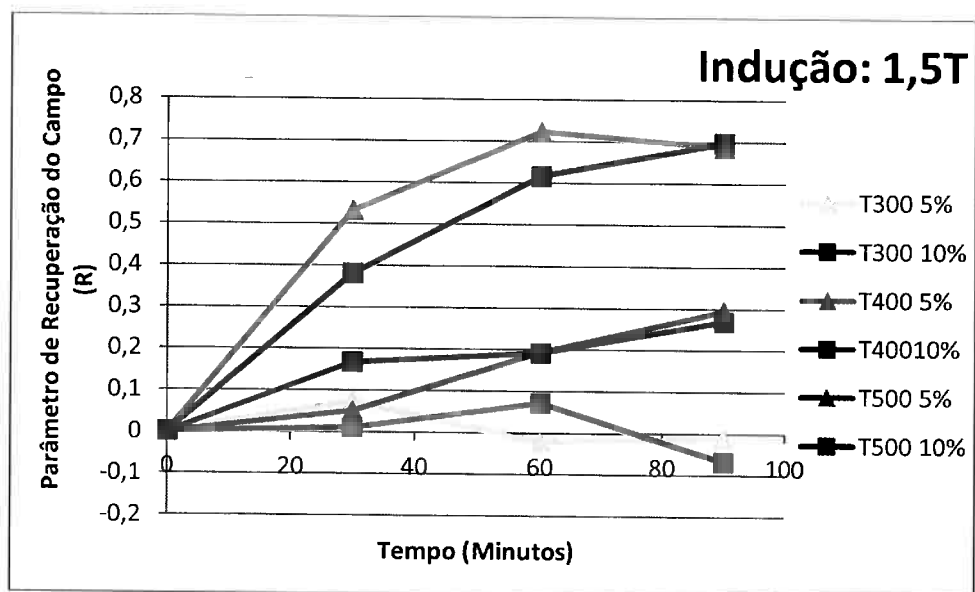
**Figura 43:** Comparação do parâmetro de recuperação para as perdas totais calculadas com indução de 1,5T e o limite de escoamento para as amostras com 10% de redução

Mesmo mantendo o mesmo comportamento das amostras com 5% de redução temos que para as curvas de parâmetro de recuperação das amostras com 10% de redução com 1,5 T de indução temos que mesmo para os tratamentos térmicos a 500°C temos que apenas para 90 minutos tivemos um descolamento efetivo das curvas.

Finalmente utilizando o parâmetro de recuperação temos as seguintes curvas para a variação do campo.



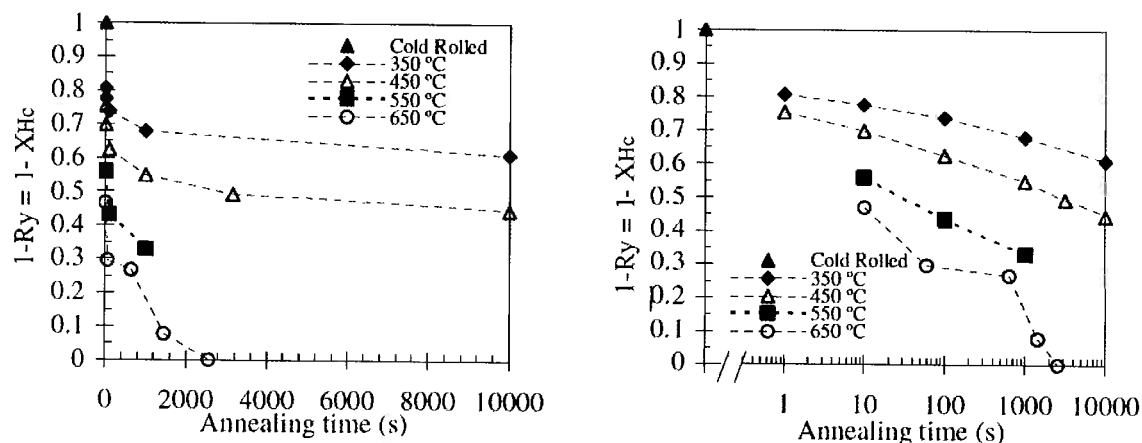
**Figura 44:** Parâmetro de recuperação calculado pelo campo medido para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1T



**Figura 45: Parâmetro de recuperação calculado pelo campo medido para os tratamentos térmicos realizados para a indução de 1,5T**

Podemos observar que o campo magnético deste atinge valores maiores do que as perdas totais para o parâmetro de recuperação, chegando à quase 80% para 1T de indução. Além disso podemos ver que tanto para 1T, como para 1,5T as curvas para as duas reduções apresentam valores muito próximos.

Observando os valores obtidos por Martínez-de-Guerenu [26], podemos observar que para tratamentos térmicos de 450°C para 3600 segundos temos parcelas de recuperação de cerca de 50% conforme mostrado abaixo.



**Figura 46: Variação da parcela não recuperada para diversos tratamentos térmicos [26]**

Esses valores de parcela recuperada são condizentes com os obtidos para as propriedades magnéticas do material.

Finalmente observamos que quando comparamos a amostra com 10% de redução que sofreu tratamento de 400°C acima de 60 minutos com a amostra com 5% de redução com tratamentos a 300°C percebemos que a primeira apresenta limite de escoamento levemente superior. Quando observamos as perdas observamos que o primeiro apresenta perdas menores e uma tendência á decrescer, enquanto para as amostras com 5% de redução tratadas a 300°C vemos que essa já possui menos variações em sua propriedade.

## 6 Conclusões

Primeiramente podemos observar que para os tratamentos térmicos realizados abaixo de 500°C não tivemos 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 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 chegamos 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.

Observamos também que para deformações maiores o aumento da indução diminui o efeito da recuperação nas perdas. Além disso, temos 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 no estado deformado tende a aumentar com o aumento da deformação.

Outro fator que vale ser ressaltado é que a 500°C já temos 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.

Em geral podemos ver que se for desejável buscar uma situação com melhores propriedades mecânicas e com propriedades magnéticas toleráveis é necessário realizarmos maiores estudos com faixas de temperaturas menores e tempos maiores.



## 7 Bibliografia

- [1] S. Chikazumi, "Physics of Ferromagnetism," in *Physics of Ferromagnetism*, Second., New York: Oxford Science Publications, 1997, pp. 11–17.
- [2] A. J. Moses, "Opportunities for exploitation of magnetic materials in an energy conscious world," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 27, p. 100, 2002.
- [3] C. Kriek, "Mudança de rumos," *KPMG*, pp. 12–17, 2011.
- [4] W. W. E. Association, "No Title," *World wind energy report*, 2010.
- [5] M. Bradfield, "Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs." 2008.
- [6] M. F. Littmann, "Iron and Silicon-Iron Alloys," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 7, pp. 48–60, 1972.
- [7] C. Hou, C. Hu, and S. Lee, "The Effect of Aluminum on the Magnetic Properties of Lamination Steels," vol. 27, no. 5, pp. 4305–4309, 1991.
- [8] S. Chikazumi, "Physics of Ferromagnetism," in *Physics of Ferromagnetism*, Second., New York: Oxford Science Publications, 1997, p. 3.
- [9] S. Chikazumi, "Physics of Ferromagnetism," in *Physics of Ferromagnetism*, Second., New York: Oxford Science Publications, 1997, p. 10.
- [10] A. Hubert and R. Schäfer, *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer, 2009, p. 441.
- [11] M. F. de Campos, J. C. Teixeira, and F. J. G. Landgraf, "The optimum grain size for minimizing energy losses in iron," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 301, no. 1, pp. 94–99, Jun. 2006.
- [12] F. J. G. Landgraf, M. Emura, K. Ito, and P. S. G. Carvalho, "Effect of plastic deformation on the magnetic properties of non-oriented electrical steels," vol. 216, pp. 215–217, 2000.
- [13] N. a. Castro, M. F. de Campos, and F. J. G. Landgraf, "Effect of deformation and annealing on the microstructure and magnetic properties of grain-oriented electrical steels," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, no. 2, pp. e617–e619, Sep. 2006.
- [14] C.-K. Hou, "Effects of sulfur content and slab reheating temperature on the magnetic properties of fully processed nonoriented electrical steels,"

*Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 6, pp. 1115–1122, Mar. 2008.

- [15] M. F. De Campos and F. J. G. Landgraf, "Consequences of magnetic aging for iron losses in electrical steels," vol. 304, pp. 593–595, 2006.
- [16] K. M. Marra, "Variação das perdas magnéticas durante envelhecimento de um aço elétrico," pp. 36–39, 2006.
- [17] O. Hubert, E. Hug, I. Guillot, and M. Clavel, "Effect of internal stresses and dislocation features on the magnetic properties of soft ferromagnetic materials," *Le Journal de Physique IV*, vol. 08, no. PR2, pp. Pr2–515–Pr2–518, Jun. 1998.
- [18] M. J. Sablik, S. Member, T. Yonamine, and F. J. G. Landgraf, "Modeling Plastic Deformation Effects in Steel on Hysteresis Loops with the same Maximum Flux Density," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 5, pp. 1–8, 2004.
- [19] H. Kronmüller, "Magnetic Techniques for the Study of Dislocations in Ferromagnetic Materials," *Journal of Nondestructive Testing*, vol. 3, pp. 314 – 349, 1972.
- [20] M. J. Sablik, F. J. G. Landgraf, R. Magnabosco, M. Fukuhara, M. F. de Campos, R. Machado, and F. P. Missell, "Fitting the flow curve of a plastically deformed silicon steel for the prediction of magnetic properties," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, no. 2, pp. 155–158, Sep. 2006.
- [21] R. W. Cahn, "Recrystallization of single crystals after plastic bending," *Journal of the institute of metals*, vol. 76, pp. 121–143, 1949.
- [22] R. D. Doherty, D. a. Hughes, F. J. Humphreys, J. J. Jonas, D. J. Jensen, M. E. Kassner, W. E. King, T. R. McNelley, H. J. McQueen, and a. D. Rollett, "Current issues in recrystallization: a review," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 238, no. 2, pp. 219–274, Nov. 1997.
- [23] G. Biorci, G. Montalenti, and A. Ferro, "Magnetic After-Effect in Iron due to Motion of Dislocations," *Physical Review*, vol. 119, no. 2, p. 653 – "57, 1960.
- [24] M. Oyarzábal, a. Martínez-de-Guerenu, and I. Gutiérrez, "Effect of stored energy and recovery on the overall recrystallization kinetics of a cold rolled low carbon steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 200–209, Jun. 2008.
- [25] J. T. Michalak and H. W. Paxton, "Some Recovery Characteristics of Zone-Melted Iron," *Transactions of the metallurgical society of AIME*, vol. 221, p. 850, 1961.

- [26] A. Martínez-de-Guerenu, M. Oyarzabal, F. Arizti, and I. Gutiérrez, "Application of Coercive Field Measurements to the Evaluation of Recovery and Recrystallization in Cold Rolled Interstitial Free ( IF ) Steel," vol. 501, pp. 647–654, 2005.