

Melissa Naomi Suda

**EFEITOS DE RECUPERAÇÃO SOBRE A
RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO ELÉTRICO**

Trabalho de Formatura apresentada à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo, junto ao Departamento
de Engenharia de Metalurgia e de
Materiais.

São Paulo

2002

Melissa Naomi Suda

**EFEITOS DE RECUPERAÇÃO SOBRE A
RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO ELÉTRICO**

Trabalho de Formatura apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Área de concentração:
Engenharia de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

São Paulo

2002

Dedico este trabalho aos meus pais e familiares,
que sempre me apoiaram e incentivaram a fazer o
melhor. E a todos que colaboraram com esse
trabalho, tornando-o possível.

RESUMO

Em condição de fabricação industrial, os aços elétricos, após laminação a frio, passam por uma etapa de recozimento com o objetivo de eliminar o encruamento e condicionar a textura de modo a ter a maior fração possível de grãos com a direção de magnetização fácil paralela à superfície da chapa.

O presente trabalho estuda os efeitos da recuperação sobre a recristalização de um aço elétrico de grão não orientado, principalmente no que se refere à cinética e a textura. O mapeamento da cinética de recristalização foi realizado, tanto para o material com e sem recuperação prévia. A análise de textura foi realizado utilizando-se a técnica do EBSD (*electron back scattered diffraction*). O estudo de textura ficou focado sobre as amostras com os maiores tempos de tratamento térmico, ou seja, mais próximos da textura final.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....	2
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
3.1. MATERIAIS	6
3.1.1. Composição e Estrutura Inicial	6
3.2. EQUIPAMENTOS.....	7
3.3. MÉTODOS	7
3.3.1. Confeção das Amostras	7
3.3.2. Tratamentos Térmicos	8
3.3.3. Preparação das amostras.....	9
3.3.4. Técnicas de caracterização microestrutural.....	10
4. RESULTADOS	11
4.1. ESTRUTURAS	11
4.1.1. Estruturas do Material Laminado a Frio.....	11
4.1.2. Estruturas das Amostras Recozidas.....	12
4.1.3. Estruturas das Amostras Recozidas com Recuperação Prévia	14
4.2. CINÉTICA DE RECRISTALIZAÇÃO.....	16
4.3. ANÁLISE DE TEXTURAS	19
5. CONCLUSÕES.....	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

LISTA DE FIGURAS

Fig.2. 1.Cinética de recristalização para recozimento isotérmico	2
Fig.2.2.O efeito da temperatura de recozimento no recozimento	4
Fig.2.3.Representação esquemática da orientação	4
Fig.3.1.1.Micrografia óptica: seção transversal do material de partida	6
Fig.3.1.2. Micrografia óptica: superfície do material de partida	7
Fig.3.3.1. Esquema da laminação.....	7
Fig. 3.3.2. Confeção da amostra	8
Fig. 3.3.3. Ciclos de recozimentos.	8
Fig. 3.3.4. Esquema da grade para determinação da fração recristalizada.....	10
Fig. 4.1.1. Micrografia óptica: seção transversal do material de partida.	11
Fig. 4.1.2. Micrografia óptica: seção superficial do material de partida.....	11
Fig.4.1.3. Micrografia óptica: seção superficial do material de partida.....	12
Fig.4.1.4. Micrografia óptica: início de recristalização.....	12
Fig. 4.1.5. Microscopia óptica: material recozido.....	13
Fig. 4.1.6. Microscopia óptica: material recozido.....	14
Fig. 4.1.7. Microscopia óptica: material recozido.....	14
Fig. 4.1.8. Micrografia óptica: material recozido.....	15
Fig. 4.1.9. Micrografia óptica: Heterogeneidade da recristalização.....	15
Fig. 4.2.1. – Cinética de recristalização.	16
Fig. 4.2.2. – Cinética de recristalização para amostras com e sem recuperação prévia, tratadas a 550°C.....	17
Fig. 4.2.3. – Cinética de recristalização para amostras com e sem recuperação prévia, tratadas a 580°C.....	17
Fig. 4.2.4. – Cinética de recristalização para amostras com e sem recuperação prévia, tratadas a 550°C.....	18
Fig. 4.3.1. Análise por EBSD.....	20
Fig. 4.3.2. Análise por EBSD.....	21
Fig. 4.3.3. Análise por EBSD.....	22
Fig. 4.3.4. Análise por EBSD.....	23
Fig. 4.3.5. Análise por EBSD.....	24
Fig. 4.3.6. Análise por EBSD.....	25
Fig. 4.3.7. Análise por EBSD.....	26
Fig. 4.3.8. Análise por EBSD.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.1. - Composição química do aço	6
Tabela 3.3.1. – Tempos e temperaturas de tratamento (recuperação prévia).....	9
Tabela 4.2.1 – Medidas de fração recristalizada para amostras recozidas a 580°C.	19

1. INTRODUÇÃO

O trabalho teve por objetivo estudar da competição entre recuperação e recristalização na escala da microestrutura como um todo e nas escalas das diversas heterogeneidades da estrutura encruada. Trata-se de estudar as variáveis importantes para o processamento de aços elétricos de grão não orientado, dando ênfase aos efeitos de recuperação sobre a recristalização, no que se refere à cinética e a texturas de recristalização.

As técnicas experimentais utilizadas são a metalografia quantitativa e a de difração por elétrons retroespalhados - EBSD (*electron back scattered diffraction*).

2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Tanto a recuperação como a recristalização designam processos de redução de energia livre associada ao excesso de discordâncias contidas na estrutura encruada. Na recuperação a diminuição de energia se dá pelo rearranjo de discordâncias em configurações de menor energia. A recristalização é o processo de eliminação de discordâncias pela movimentação de contornos de grande ângulo. Caso haja recuperação do material, a energia armazenada será menor, o que seria análogo a uma redução de deformação imposta ao material.

Como ambas consomem o mesmo potencial termodinâmico, apesar de o fazerem por processos diferentes, diz-se que há competição entre recuperação e recristalização.

A cinética de recristalização durante um recozimento isotérmico é geralmente representada em um gráfico da fração volumétrica de material recristalizado em função do log do tempo (Humphreys et al., 1996). Esse gráfico tem forma sigmoideal característica como mostrado na figura 2.1., e tipicamente apresenta um tempo de incubação antes que a recristalização se inicie.

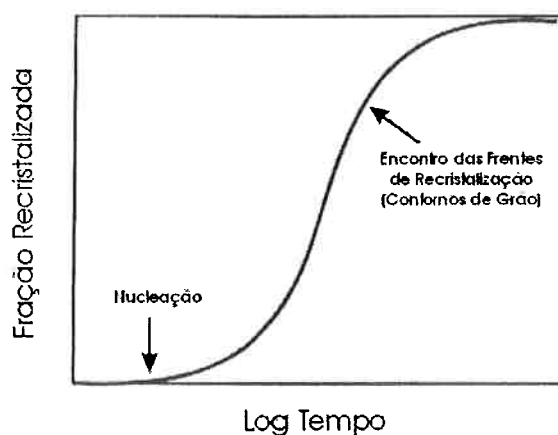


Fig.2. 1. Cinética de recristalização típica durante recozimento isotérmico (Humphreys et al., 1996).

Variáveis que influenciam a cinética de recristalização

A quantidade e o modo de deformação afetam a cinética de recristalização pois alteram a quantidade de energia armazenada, quanto maior a deformação, mais rápido se dá o processo. Nos aços de baixo carbono, dos quais os aços elétricos são parte, a estrutura encruada tem energia armazenada diferentemente para cada grão (Hutchinson, 1999). E

conseqüentemente a recuperação antes da recristalização terá cinéticas diferentes para cada grão, pois a cinética de recuperação é função da energia armazenada (Li, 1996).

A temperatura em que a deformação é aplicada afeta a taxa de recristalização, pois se a deformação é realizada em altas temperaturas a energia armazenada é reduzida e a cinética de recristalização é alterada (Padilha e Falleiros, 1979). Isso se deve à mobilidade das discordâncias, causada pela alta temperatura, possibilitando o seu rearranjo durante a própria deformação (recuperação dinâmica).

O tamanho de grão original também tem a sua influência, pois normalmente o material com tamanho de grão inicial pequeno se recristaliza mais rápido do que um material com tamanho de grão inicial grande. Os contornos de grão, assim como as bandas de transição e as bandas de cisalhamento, são regiões favoráveis para a nucleação de novos grãos (Falleiros e Campos, 2001) e, portanto, o número de regiões de nucleação é maior para um material com grão pequeno.

A taxa de aquecimento durante o tratamento também tem sua influência, pois se ela for pequena pode haver recuperação do material. Aquecimento lento possibilita as reações de recuperação, esta que começa a ocorrer a temperaturas menores ($\sim 0,3 T_F$) que as de recristalização ($\sim 0,5 T_F$), onde T_F é a temperatura de fusão (Shewmon, 1969). Os aços elétricos têm facilidade para recuperação, pois são fáceis as mudanças de planos de escorregamento, necessárias para o processo.

A temperatura de recozimento tem um papel importante no processo de recristalização (Speich e Fisher, 1966), como pode ser visto na figura 2.2. Os mecanismos que controlam a recristalização e a recuperação são termicamente ativados e a relação entre a taxa de recristalização e a temperatura de reação pode ser descrita por uma equação do tipo Arrhenius.

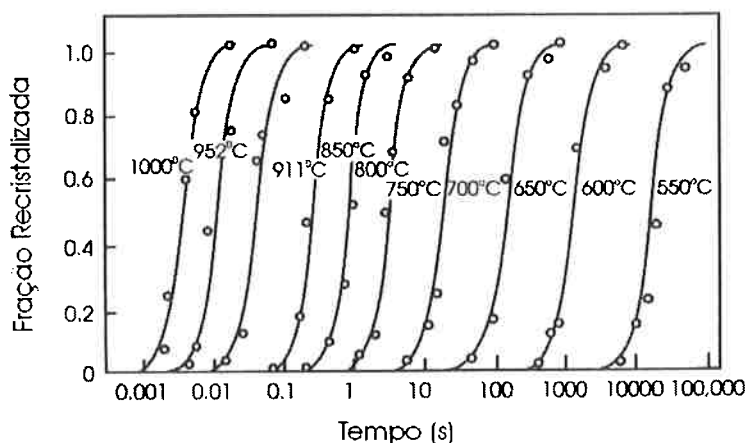


Fig.2.1.O efeito da temperatura de recozimento no recozimento de Fe – 3,5% Si deformado 60% (Speich e Fisher, 1966)

Em materiais policristalinos existe evidência de que a taxa de recristalização como um todo pode ser dependente tanto da textura inicial como da textura de deformação (Humphreys et al., 1996). A figura 2.3. ilustra a dependência da orientação cristalográfica na taxa de nucleação em ferro deformado (Hutchinson, 1984).

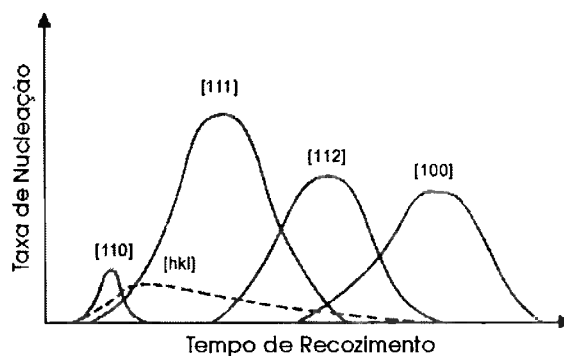


Fig.2.2.Representação esquemática da dependência da orientação na taxa de nucleação em ferro deformado (Hutchinson, 1984).

Por exemplo, sabe-se que a orientação $\langle 111 \rangle$ possui elevado fator (M) de Taylor, sendo assim as regiões que possuem essa orientação são as primeiras a se recristalizar. E seguindo a figura 2.3, a orientação $\langle 111 \rangle$ também é a primeira a se formar. Por outro lado a orientação $\langle 001 \rangle$ possui baixo M . Sendo mais estável é uma das últimas a se recristalizar, e seguindo a figura 2.3, é a última a se formar.

A textura do aço elétrico após o recozimento final influencia propriedades como permeabilidade e perdas magnéticas. A textura cristalográfica teórica ideal para aços elétricos de grão não-orientado é a fibra $\{100\}$, conhecida com fibra α . Pois ela gera maior permeabilidade (Boer e Wieting, 1997 apud Shimanaka et al, 1982) e conseqüentemente, menores perdas magnéticas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA INICIAL

O material recebido é um aço elétrico de grão não orientado com a composição química dada na Tabela 3.1.1.

Tabela 3.1.1. - Composição química do aço

%C	%Mn	%Si	%Al	%P	%S	ppm N
0,005	0,31	0,54	0,04	0,05	0,006	53

Obs.: o restante para 100% é Fe

A chapa foi laminada a frio com 8% de alongamento e recozida a 800°C por duas horas em atmosfera de argônio, sendo este o material inicial.

As estruturas da chapa recebida são apresentadas nas figuras 3.1.1. e 3.1.2. O material apresenta grãos equiaxiais, tanto na direção paralela à superfície, como na direção transversal. Apresenta tamanho de grão de cerca de 700 μm .

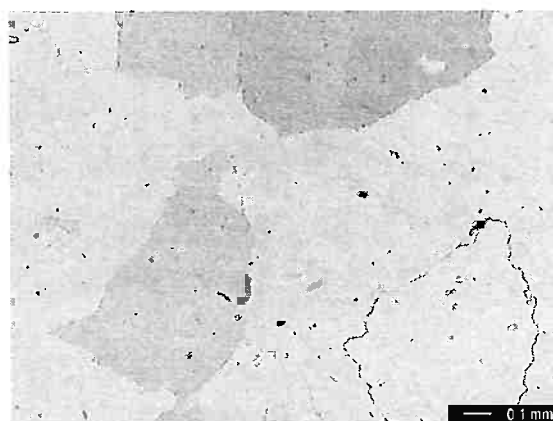


Fig.3.1.1. Micrografia óptica: seção transversal do material de partida. 50X

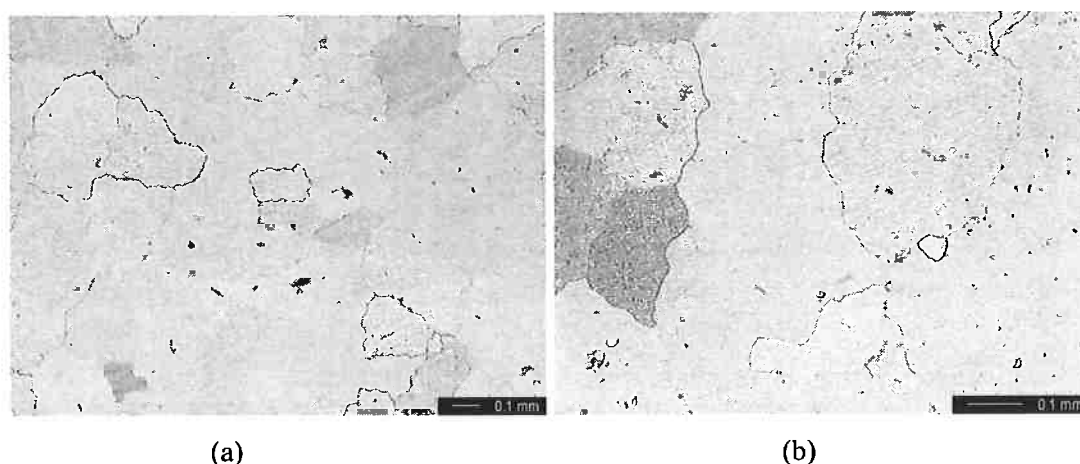


Fig.3.1.2. Micrografia óptica: superfície (a) 50X e (b) 100X

3.2. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados:

- * Laminador;
- * Forno tipo poço;
- * Microscópios ópticos;
- * Microscópio eletrônico de varredura.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS

O material recebido foi laminado a frio, com grau de redução típico de situação industrial ($\epsilon = 1,5$), em laminador experimental, no IPT. A chapa foi laminada da maneira mostrada na figura 3.3.1. O material de partida tinha espessura de 2,50 mm, depois do processo de laminação passou a ter espessura de 0,5 mm.

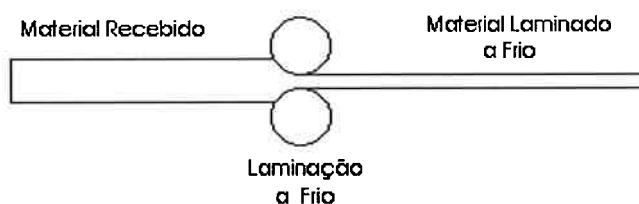


Fig.3.3.1. Esquema da laminação

As amostras, foram feitas cortando-se a chapa da maneira mostrada na figura 3.3.2. O furo foi feito nas amostras com o objetivo de facilitar a fixação das amostras ao ser submetido aos tratamentos de recozimento em banhos de metal líquido.

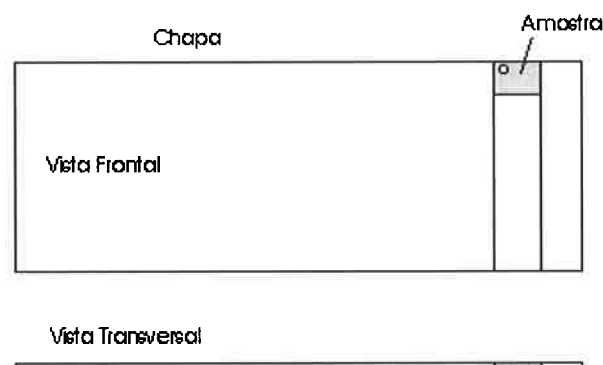


Fig. 3.3.2. Confeção da amostra

3.3.2. TRATAMENTOS TÉRMICOS

O material laminado foi recozido por diferentes tempos e temperaturas, com e sem recuperação prévia.

O esquema dos ciclos de tratamentos adotado está a seguir na figura 3.3.3.

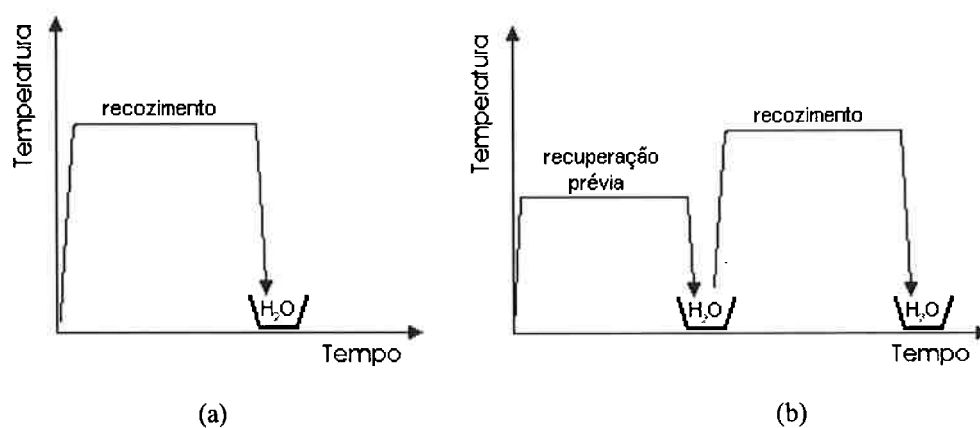


Fig. 3.3.3. Ciclos de recozimentos (a) ciclo para amostras sem recuperação prévia. (b) ciclo de tratamento para amostras que tiveram recuperação prévia.

As amostras foram tratadas em forno tipo poço, utilizando-se banhos de estanho líquido (ou, mais raramente, de sais fundidos). As amostras, em todos os tratamentos, foram resfriadas em água. Este meio de tratamento foi escolhido para tornar os tempos de aquecimento e resfriamento mínimos em comparação com outras técnicas. Isto é

importante porque durante o aquecimento pode haver recuperação, e tanto mais quanto menor a velocidade de aquecimento.

Recozimentos

As condições de tratamentos aplicados nas amostras variaram conforme o comportamento da cinética de recristalização, para temperaturas de tratamentos maiores, os intervalos de tempo foram menores.

As temperaturas de recozimentos estudadas foram: 550°C, 580°C e 600°C

Recuperação Prévia

A maior parte das amostras passou por um tratamento de recuperação a 500°C por duas horas, e então seguiram os mesmos procedimentos para a obtenção dos materiais que foram apenas recozidos (sem recuperação prévia). Outras temperaturas e tempos de tratamento foram testados (tabela 3.3.1.). Estes procedimentos foram feitos procurando evidenciar os processos de recuperação do material e dessa forma, tentar obter alterações na cinética de recristalização e na textura final das amostras.

Tabela 3.3.1. – Tempos e temperaturas de tratamento (recuperação prévia)

Temperatura	Tempo
450°C	2 horas
480°C	2:30 horas
500°C	30 minutos
500°C	1 hora
500°C	2 horas

3.3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras consistiu tipicamente de:

1. lixamento até a lixa de granulometria 1000;
2. polimento em pasta de diamante (6, 3 e 1µm);
3. polimento em sílica coloidal;
4. ataque em nital 2%.

3.3.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Microscopia óptica

As estruturas presentes nas amostras foram analisadas com um microscópio óptico, com aumentos variando de 10 a 1000X.

Microscopia eletrônica

As análises de textura foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde um feixe de elétrons estacionário produz um padrão de difração numa técnica denominada EBSD (difração de elétrons retroespalhados). A técnica chega a ter resolução espacial de até 50 nm (Pinto e Lopes, 2001 apud Isabell e David, 1997), sendo ideal para amostras recuperadas, recristalizadas ou deformadas a quente. Pois nos permite analisar a textura cristalográfica localizadamente (Schäfer, 1998).

Metalografia quantitativa

Para diferentes tempos de tratamentos, as frações recristalizadas foram determinadas pelo método de pontos, método mais eficiente para a obtenção da fração recristalizada (Hilliard, 1966). A técnica consiste em contar o número de pontos da grade que incidiam na região, recristalizada ou não, a ser estudada. A grade escolhida de modo que dois pontos não incidissem na mesma região recristalizada onde $X < 0,5$ (X é a fração recristalizada). Caso $X > 0,5$ a mesma regra se aplica com relação às regiões não-recristalizadas. A grade escolhida continha 25 pontos (figura 3.3.4.) e era acoplada diretamente no microscópio óptico. Foram realizadas 20 contagens para cada amostra, e então calculados os valores médios e desvios padrões.

A maior parte das medidas foram feitas utilizando-se o campo escuro, pois este evidenciava com maior eficiência os contornos de grão da amostra.

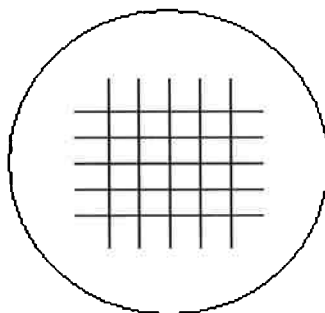


Fig. 3.3.4. Esquema da grade utilizada na determinação da fração recristalizada.

4. RESULTADOS

4.1. ESTRUTURAS

4.1.1. ESTRUTURAS DO MATERIAL LAMINADO A FRIO

O material deformado pode ser observado nas figuras 4.1.1 e 4.1.2.

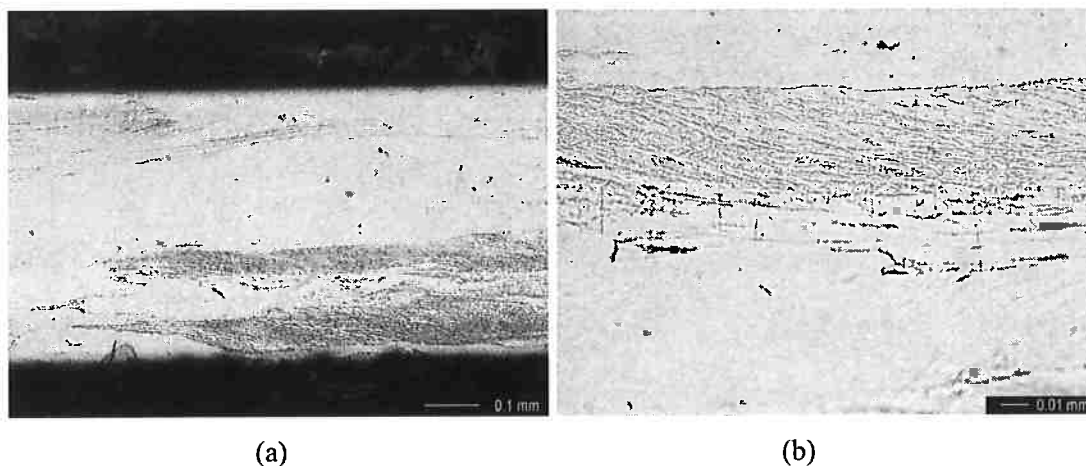


Fig. 4.1.1. Micrografia óptica: seção transversal do material de partida. (a) Regiões muito deformadas e regiões sem deformação aparente. 100X (b) Linhas de deformação a aproximadamente 45° da direção de laminação. 500X

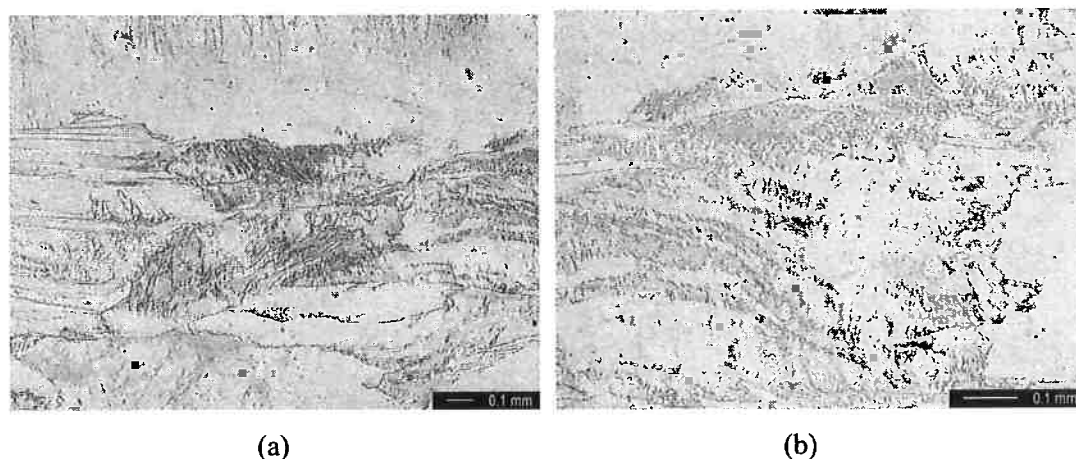


Fig. 4.1.2. Micrografia óptica: seção superficial do material de partida. (a) Regiões muito deformadas e regiões sem deformação aparente. 50X (b) Detalhe para o contorno de grão. 100X

As micrografias mostram que o material encontra-se deformado tanto na superfície como na seção transversal da chapa. Nota-se ainda que os grãos estão alongados e mostram grande heterogeneidade nas deformações.

Somente com recuperação

As amostras do material laminado a frio recuperadas a 500°C por 2 horas, apresentam estruturas semelhantes às encontradas na estrutura encruada (figura 4.1.3). Nessas amostras foram encontrados indícios do início de recristalização, como pode ser observado na figura 4.1.4.

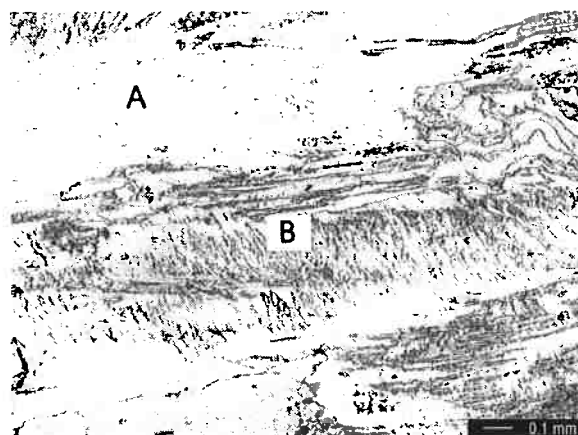


Fig.4.1.3. Micrografia óptica: seção superficial do material de partida com recuperação a 500°C por 2 horas. (B) regiões muito deformadas. (A) regiões sem deformação aparente. 50X

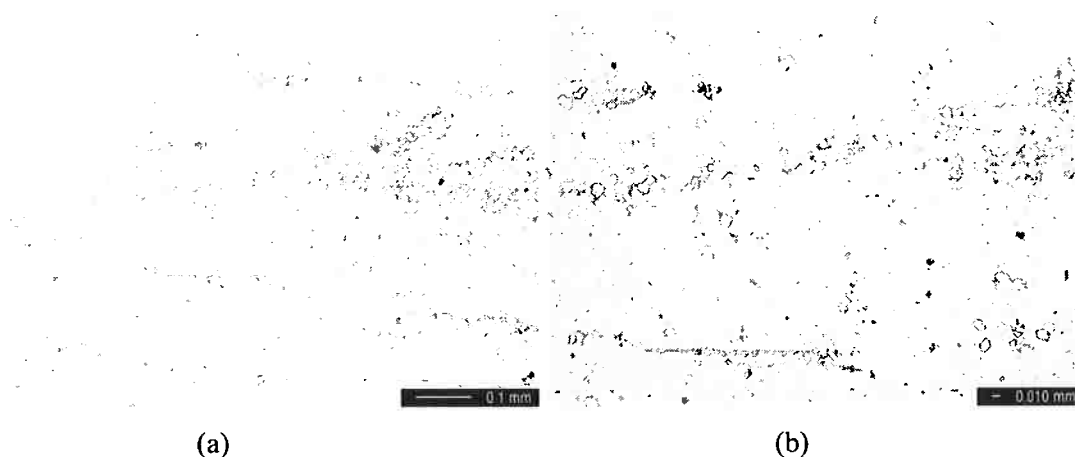


Fig.4.1.4. Micrografia óptica: seção superficial – região com início de recristalização: amostra tratada a 500°C por 2 horas (a) 100X. (b) 200X

4.1.2. ESTRUTURAS DAS AMOSTRAS RECOZIDAS

Nas amostras recozidas notamos a não-uniformidade das regiões recristalizadas e encruadas, como mostrado na figura 4.1.5. Em uma mesma amostra temos regiões 100%

recristalizadas e regiões com muito pouca recristalização. Essa característica ocorre para as diferentes temperaturas e tempos de tratamento realizados.

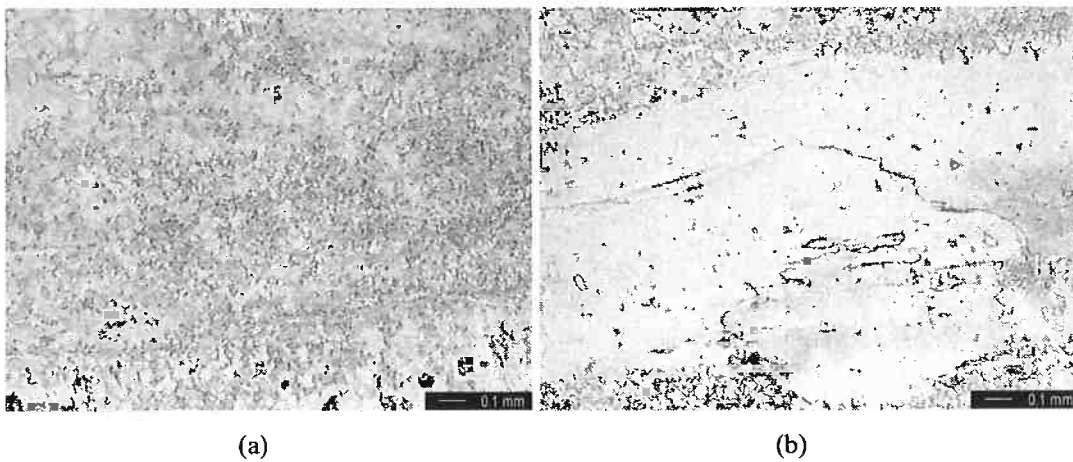


Fig. 4.1.5. Microscopia óptica: material recozido a 580°C por 20 minutos sem recuperação prévia. (a) região totalmente recristalizada 50X. (b) região pouco recristalizada – detalhe para o contorno de grão, 50X.

As micrografias apresentadas nas figuras 4.1.6 e 4.1.7. servem para ilustrar o comportamento da cinética de recristalização do material.

Na figura 4.1.6.a a amostra foi recozida por 5 minutos, apresentando fração recristalizada de aproximadamente 3,6%. Apesar da pequena diferença de tempo de tratamento, notamos grandes mudanças nas estruturas apresentadas e na fração recristalizada da amostra recozida a 7 minutos (fig. 4.1.6.b), que apresenta fração recristalizada acima de 50%.

Já ao compararmos as amostras com tempos maiores, como as apresentadas na figura 4.1.7, notamos que a velocidade de recristalização diminui. Mesmo passado um grande intervalo de tempo, já não temos muitas mudanças na microestrutura das amostras. A amostra 4.1.7.a. apresenta fração recristalizada de cerca de 72,4% e a 4.1.7.b de 91,0%.

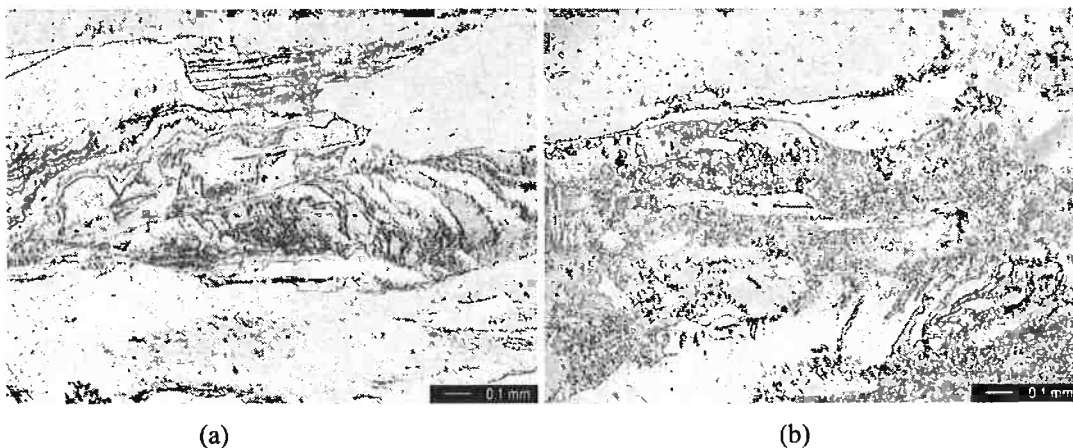


Fig. 4.1.6. Microscopia óptica: material recozido a 580°C (a) por 5 minutos. 50X (b) por 7 minutos. 50X

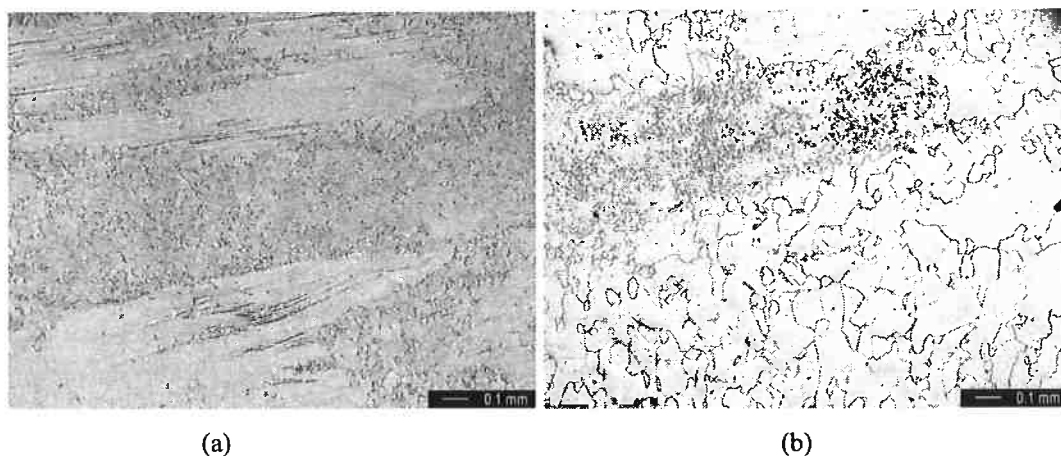


Fig. 4.1.7. Microscopia óptica: material recozido a 580°C (a) por 20 minutos. 50X (b) por 15 horas. 50X

4.1.3. ESTRUTURAS DAS AMOSTRAS RECOZIDAS COM RECUPERAÇÃO PRÉVIA

As amostras recuperadas e recozidas apresentam, no microscópio óptico, estruturas e características muito semelhantes às amostras recozidas sem recuperação prévia.

A recristalização continua não uniforme, com regiões totalmente recristalizadas e outras sem nenhum núcleo recristalizado. O comportamento da cinética das amostras recozidas se repete para as amostras que sofreram recuperação prévia. Na figura 4.1.8.a. a amostra tratada a 580°C por 5 minutos apresenta fração recristalizada de cerca de 13%, já a 4.1.8.b. tratada a 580°C por 7 minutos, cerca de 51%.

A figura 4.1.9. mostra as estruturas encontradas nas amostras e apresenta também uma estrutura não muito comum. Esta é a região apresentada como C, onde temos contornos de grão mais fortes na direção de laminação.

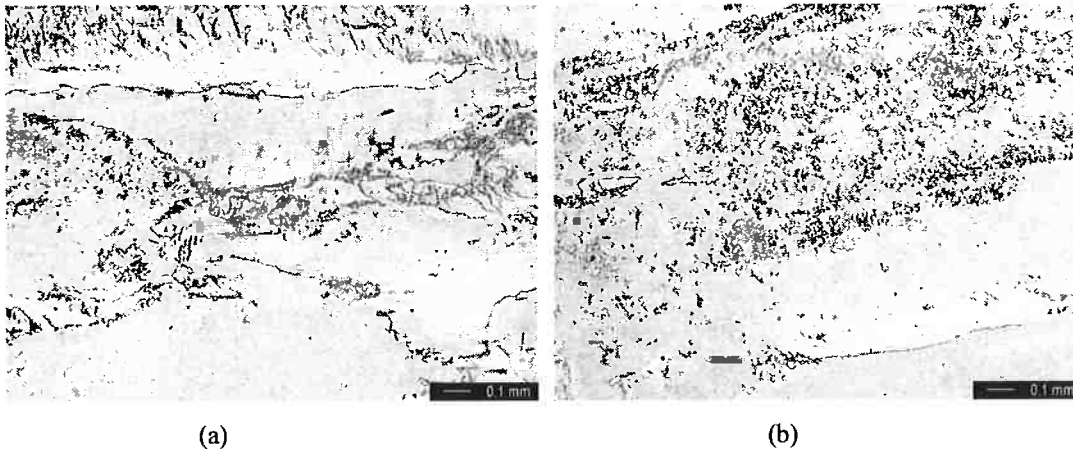


Fig. 4.1.8. Micrografia óptica: seção superficial do material recozido a 580°C (a) por 5 minutos com recuperação prévia. 50X (b) por 7 minutos com recuperação prévia. 50X

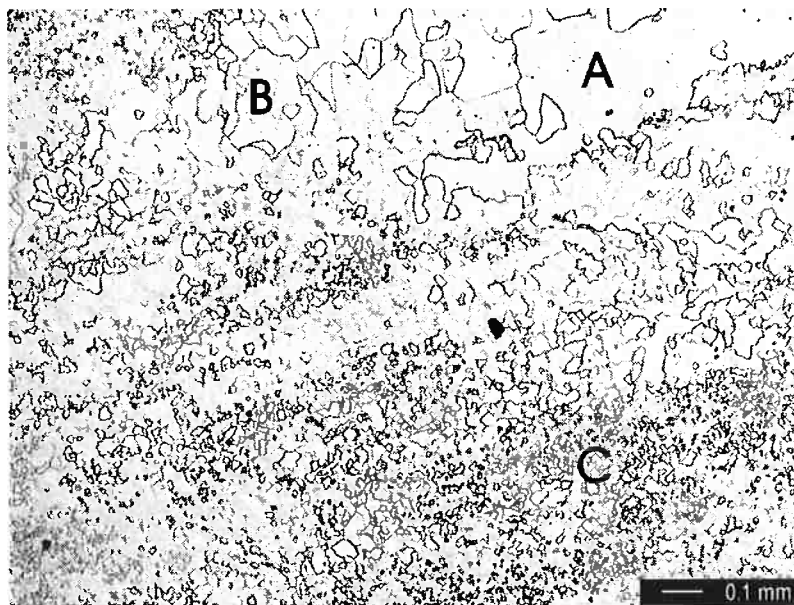


Fig. 4.1.9. Micrografia óptica: seção superficial – Heterogeneidade da recristalização: amostra tratada a 580oC por 15 horas, com recuperação prévia. 50X .(A) região não recristalizada. (B) região recristalizada apresentando grãos grandes. (C) região recristalizada com grão pequenos.

4.2. CINÉTICA DE RECRISTALIZAÇÃO

As análises feitas sobre as frações recristalizadas das amostras em função do tempo são mostradas na forma de gráficos.

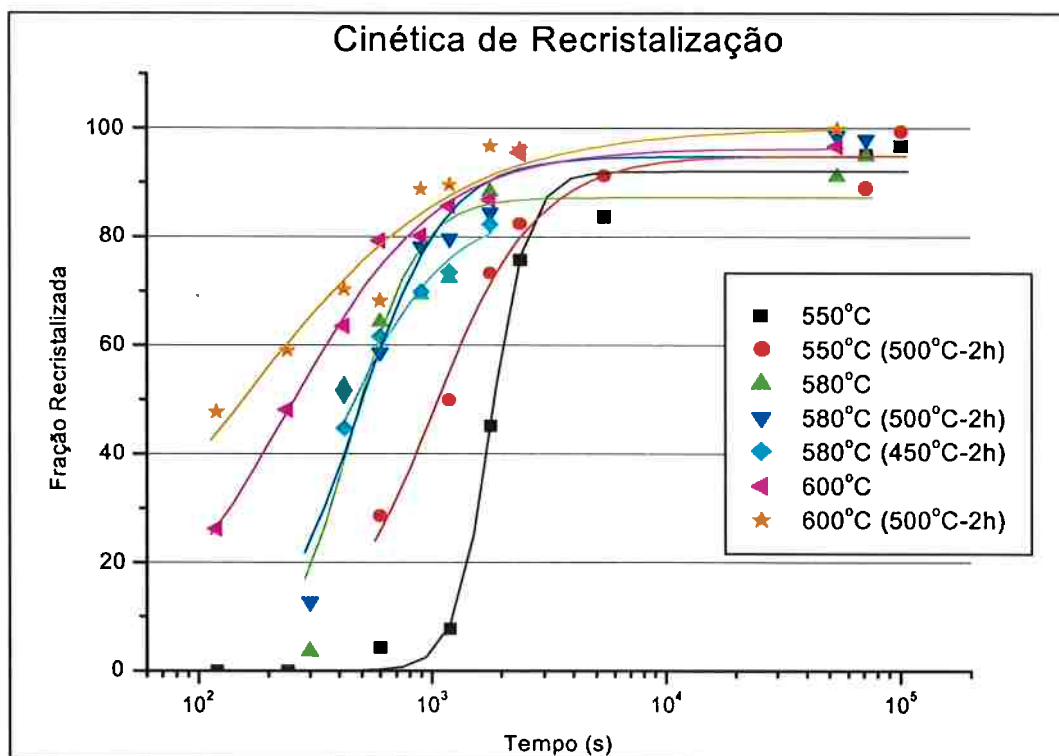


Fig. 4.2.1. – Cinética de recristalização em diferentes tempos e temperaturas.

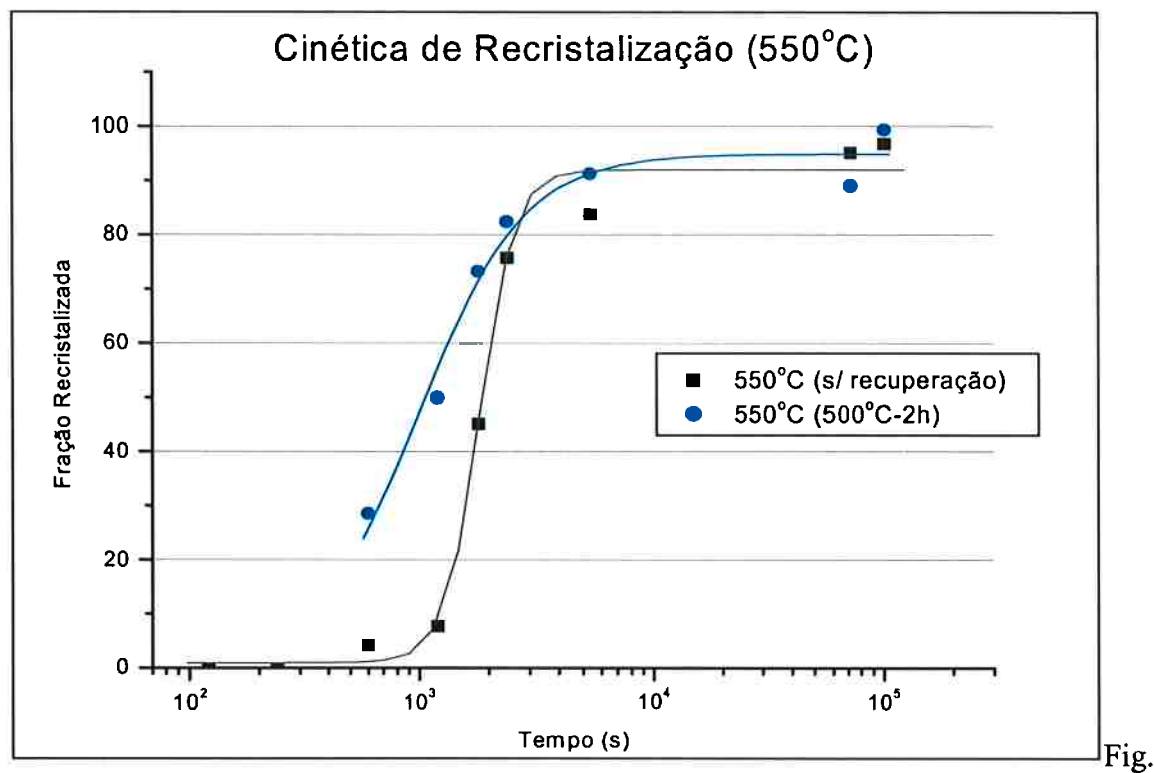


Fig.

4.2.2. – Cinética de recristalização para amostras com e sem recuperação prévia, tratadas a 550°C

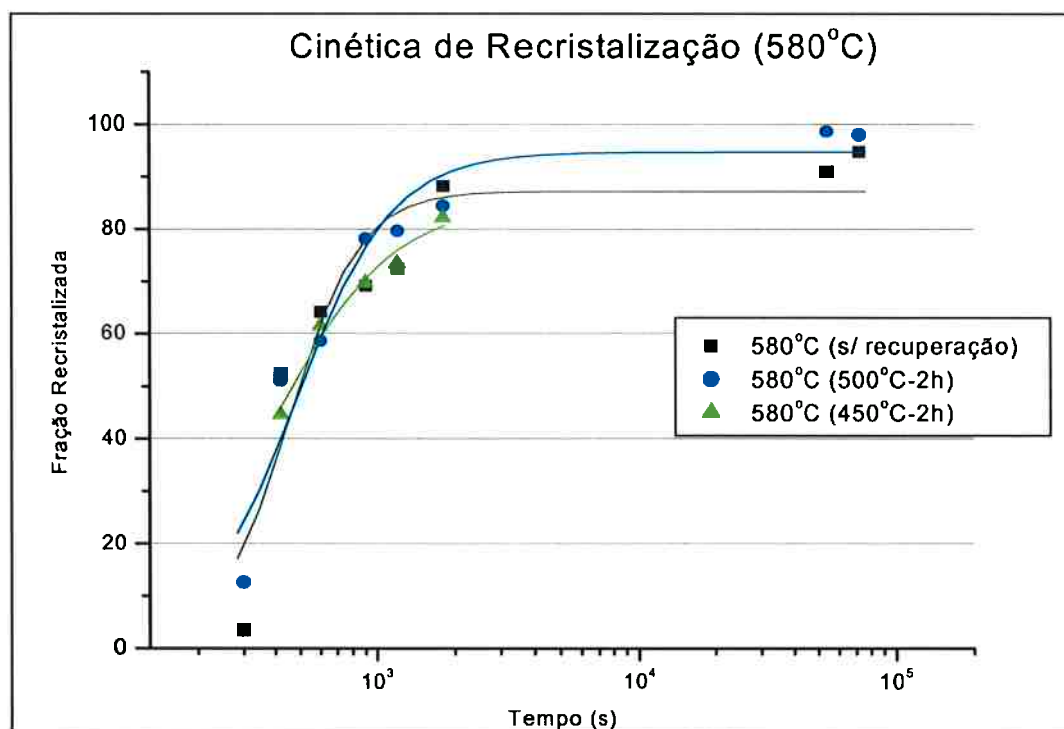


Fig. 4.2.3. – Cinética de recristalização para amostras com e sem recuperação prévia, tratadas a 580°C.

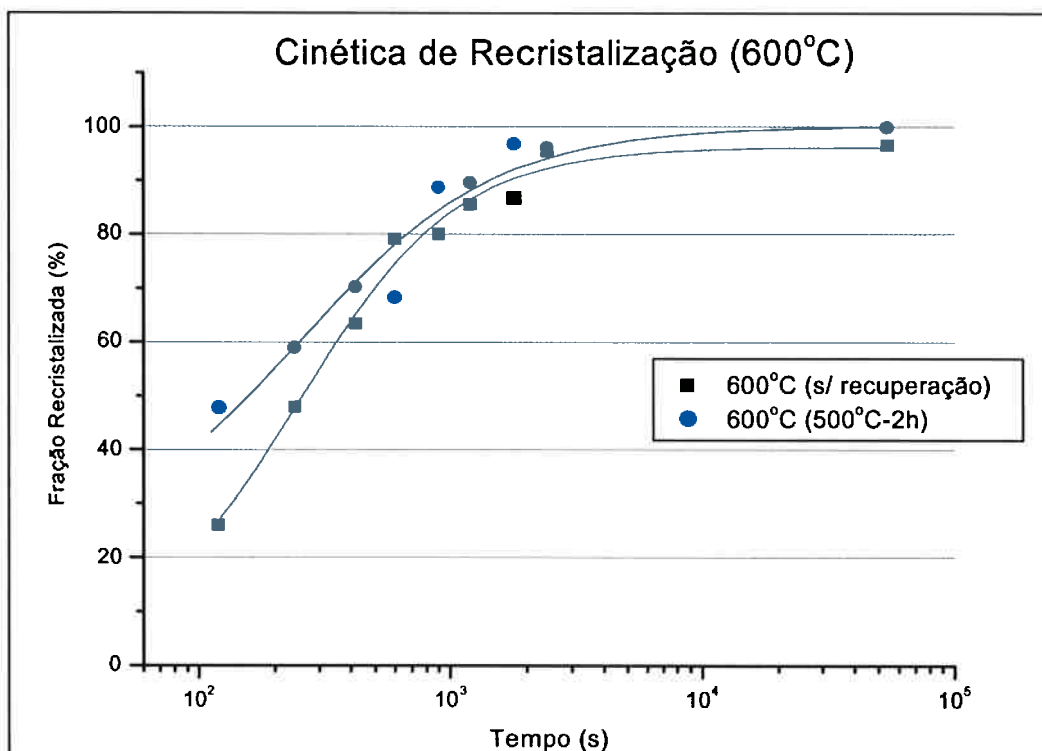


Fig. 4.2.4. – Cinética de recristalização para amostras com e sem recuperação prévia, tratadas a 550°C.

Contrariando as expectativas, analisando os gráficos não notamos efeitos da recuperação na cinética de recristalização.

Na literatura encontram-se algumas indicações de resultados similares para outros materiais.

Uma das possíveis razões desse comportamento seria a heterogeneidade da energia de deformação na amostra. Pois as heterogeneidades estão sempre presentes em estruturas encruadas (Hansen, 1985) e nas respectivas estruturas recristalizadas, sobretudo nas recozidas por curto tempo. Importantes heterogeneidades já foram observadas tanto no tamanho de grão recristalizado (Landgraf et al., 2000) como na textura dos aços elétricos (Takanohashi et al., 2000).

Além dos dados apresentados acima, um fator importante é o desvio encontrado nas medidas de fração recristalizada. Como já foi dito anteriormente, os valores de fração recristalizada foram obtidos através da média de 20 contagens em cada amostra. O desvio encontrado entre essas contagens foi muito alto (exemplo na tabela 4.2.1), o que leva a enorme dispersão de resultados e que dificulta a sua interpretação. Dessa maneira é difícil avaliar a “qualidade” desses valores.

Tabela 4.2.1 – Medidas de fração recristalizada para amostras recozidas a 580°C.

580°C		
tempo (s)	fração recristalizada (%)	
	sem recuperação	com recuperação
54000	91 ± 83,72	98,6 ± 93,74

4.3. ANÁLISE DE TEXTURAS

As amostras analisadas pela técnica de EBSD mostram um material heterogêneo para os vários tempos e temperaturas de recozimento.

Nas amostras tratadas a 580°C por 20 horas, notam-se algumas mudanças na textura ao compararmos os resultados entre a amostra com e sem recuperação prévia. Apesar da diferença nos tratamentos, apresentam a textura $\{111\}\langle uvw \rangle$ (conhecida também por fibra γ), variando apenas a sua intensidade. A figura 4.3.1. mostra as orientações obtidas na amostra sem recuperação prévia, e a figura 4.3.2. a amostra com recuperação prévia a 500°C.

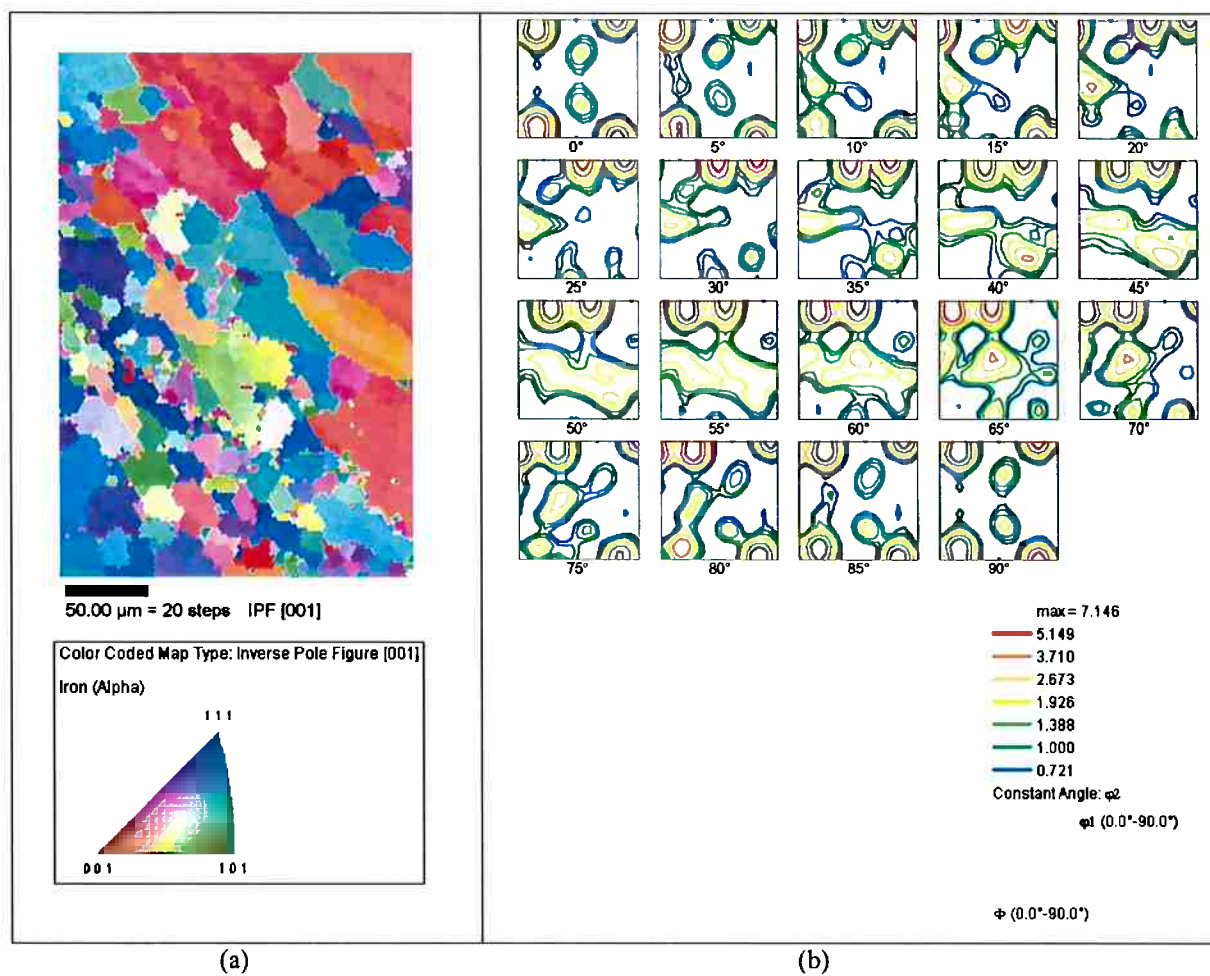


Fig. 4.3.1. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 580°C por 20 horas, sem recuperação prévia. (b) ODF's correspondentes

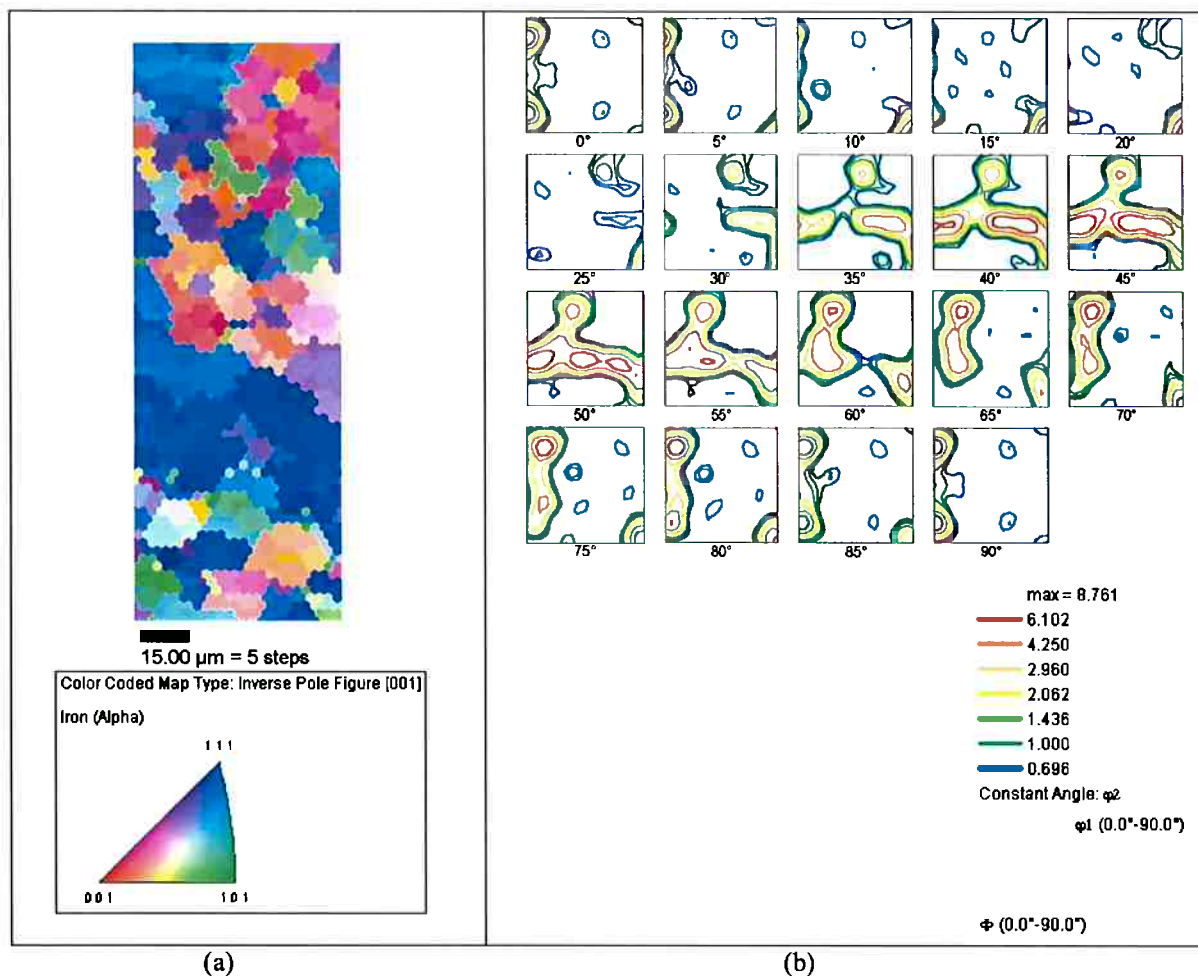


Fig. 4.3.2. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 580°C por 20 horas, com recuperação prévia. (b) ODF's correspondentes

As figuras 4.3.3. e 4.3.4. são varreduras feitas numa mesma amostra, tratada a 550°C por 20 horas, sem recuperação prévia. Ambas apresentam em comum, forte fibra $\{111\}\langle uvw \rangle$, apesar de apresentarem texturas diferentes, indicando a heterogeneidade existente no material.

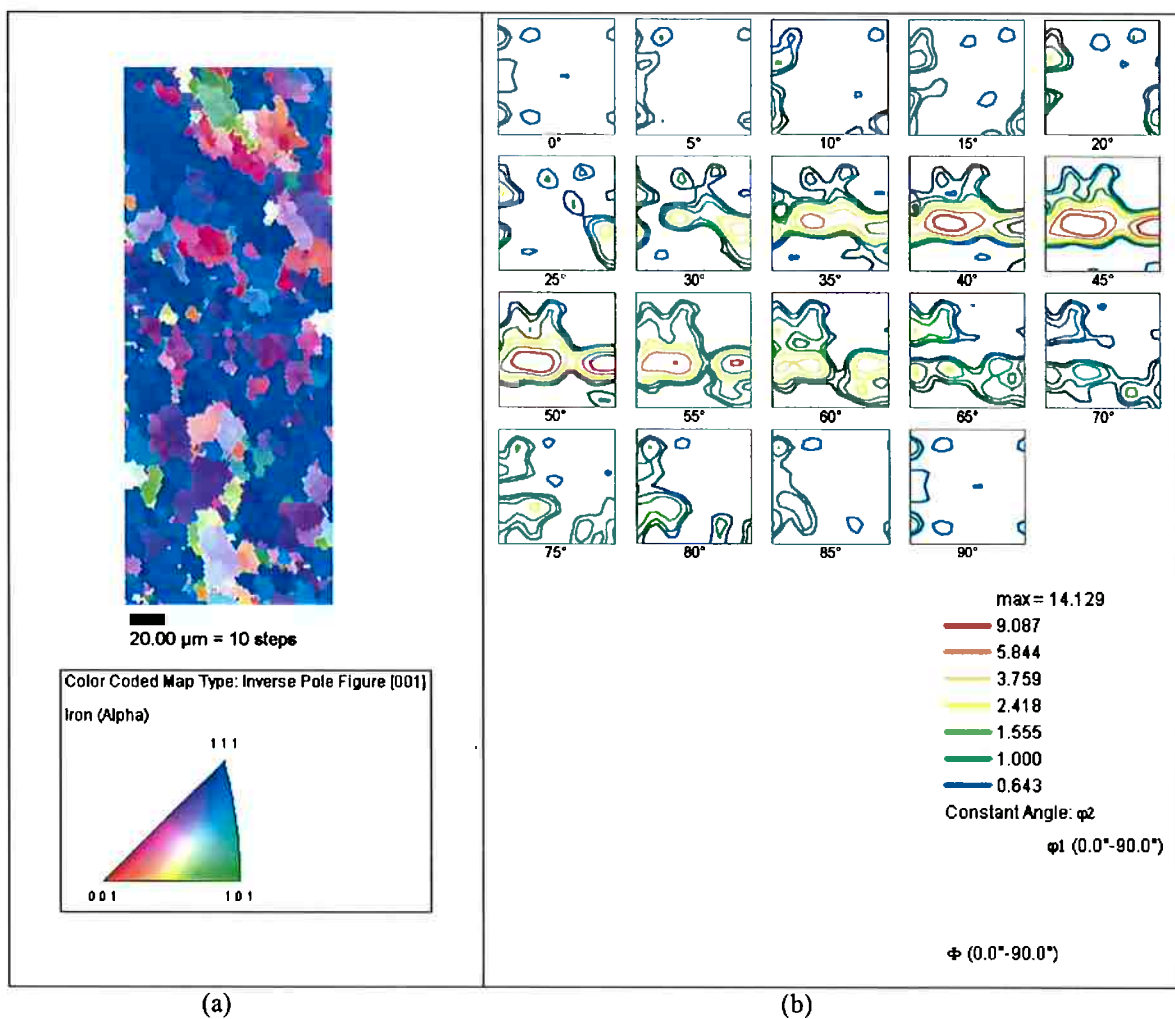


Fig. 4.3.3. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 550°C por 20 horas, sem recuperação prévia. (b) ODF's correspondentes

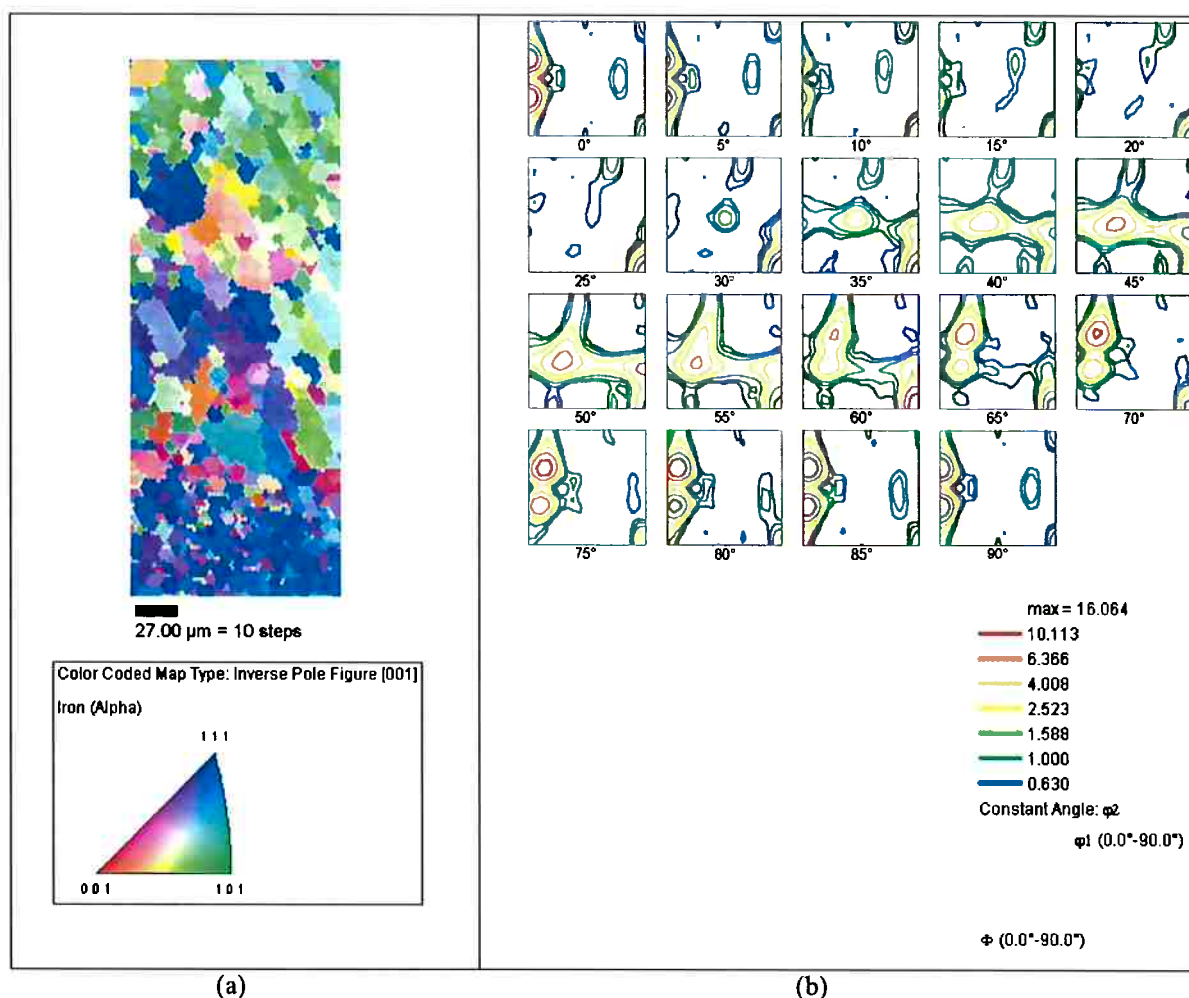


Fig. 4.3.4. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 550°C por 20 horas, sem recuperação prévia. (b) ODF's correspondentes

As figuras 4.3.5., 4.3.6. e 4.3.7 são varreduras em amostras tratadas a 580°C por 30 minutos. A amostra da figura 4.3.5. não passou por recuperação prévia e a amostra das figuras 4.3.6. e 4.3.7. (mesma amostra), passou por recuperação prévia a 450°C por 2 horas. Ambas apresentam em comum a fibra γ , sempre presente nas amostras analisadas. No entanto podemos observar uma pequena diminuição da intensidade dessa fibra na amostra que passou por recuperação prévia.

As figuras 4.3.6 e 4.3.7, quando comparadas, servem para ilustrar a heterogeneidade encontrada, dentro de uma mesma amostra. Uma saída para sanar o problema de heterogeneidade, maiores varreduras devem ser realizadas para se ter resultados estatísticos consistentes, pois as regiões analisadas pela técnica são muito pequenas. Outra possibilidade seria uma mudança na técnica empregada para a análise de textura nesse material.

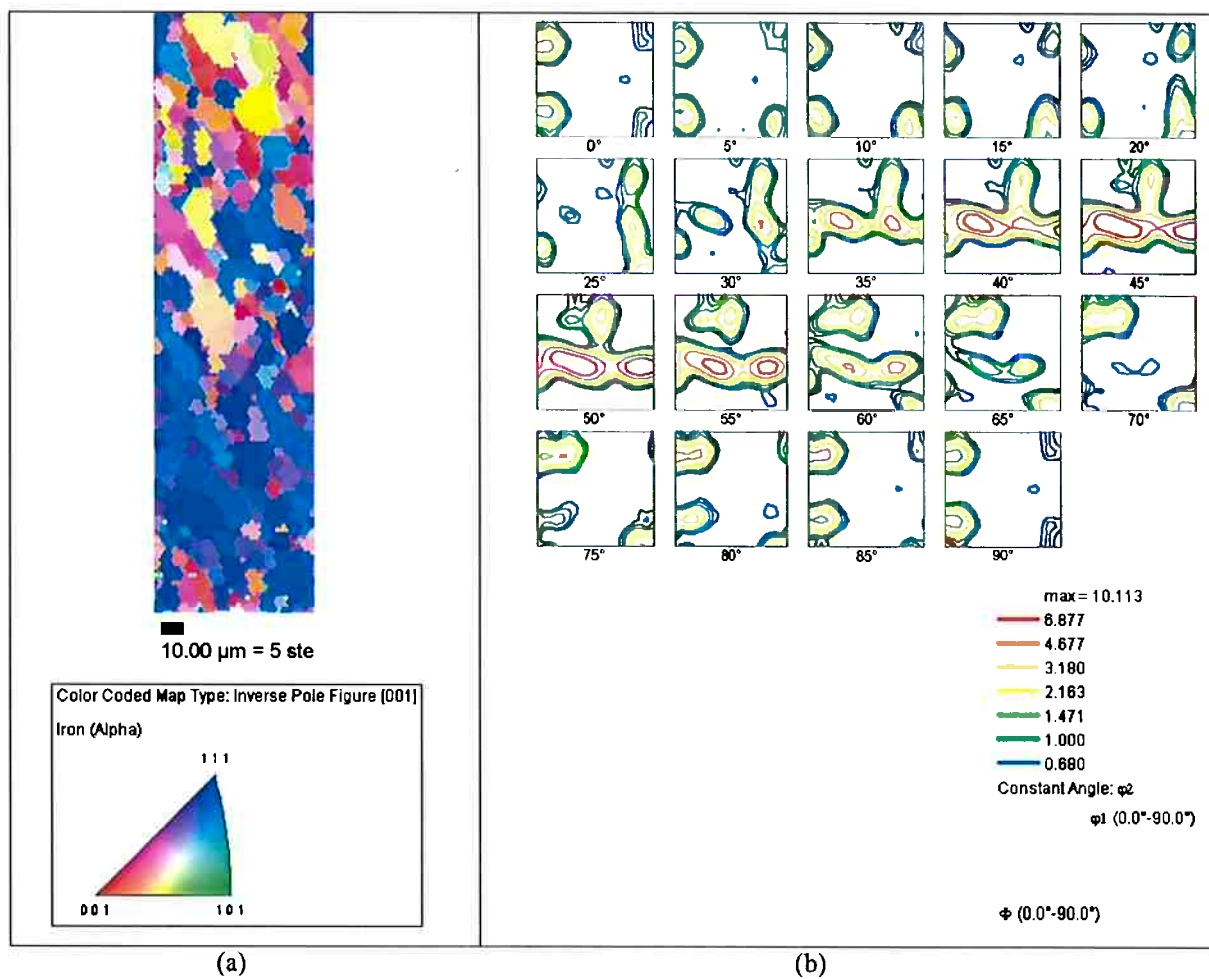


Fig. 4.3.5. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 580°C por 30 minutos, sem recuperação prévia. (b) ODF's correspondentes

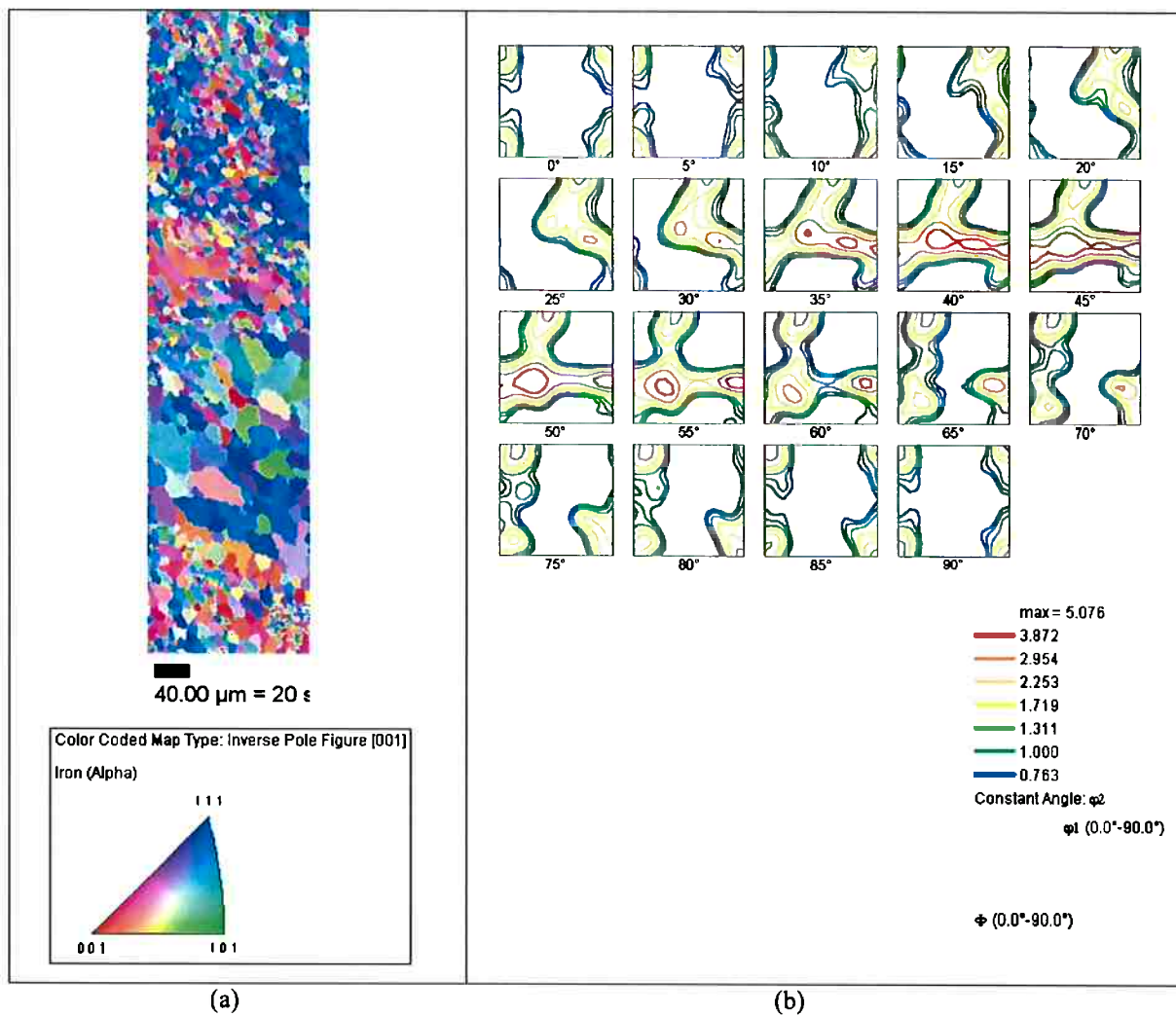


Fig. 4.3.6. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 580°C por 20 horas, com recuperação prévia a 450°C por 2 horas. (b) ODF's correspondentes

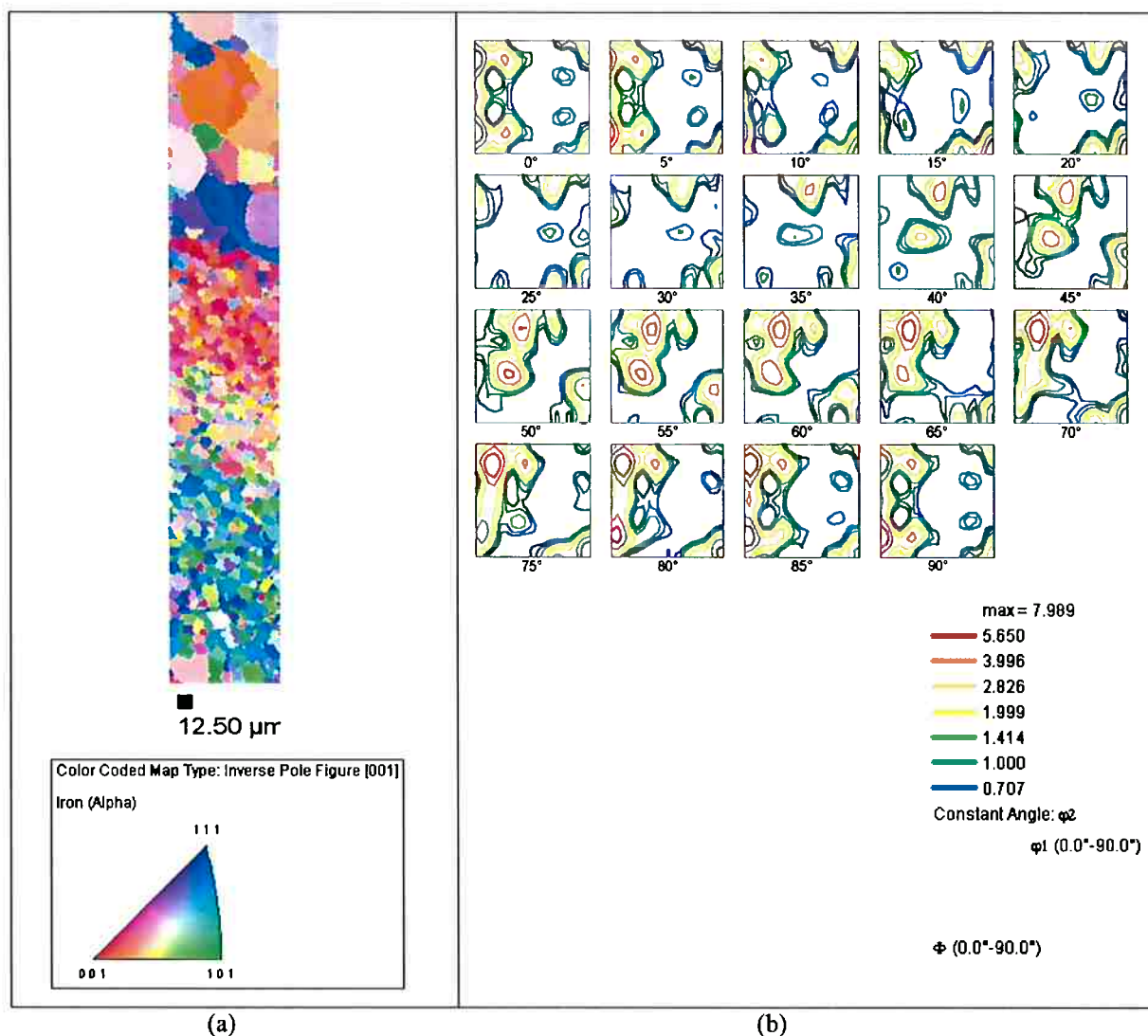


Fig. 4.3.7. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 580°C por 20 horas, com recuperação prévia a 450°C por 2 horas. (b) ODF's correspondentes

A figura 4.3.8. reforça a idéia de que a orientação $\langle 001 \rangle$ é uma das últimas a se recrystalizar. Temos uma região ainda não recrystalizada ((região 'A', no topo da figura), cuja orientação é $\langle 001 \rangle$, e muitos grãos recrystalizados com orientação $\langle 111 \rangle$ (região 'B').

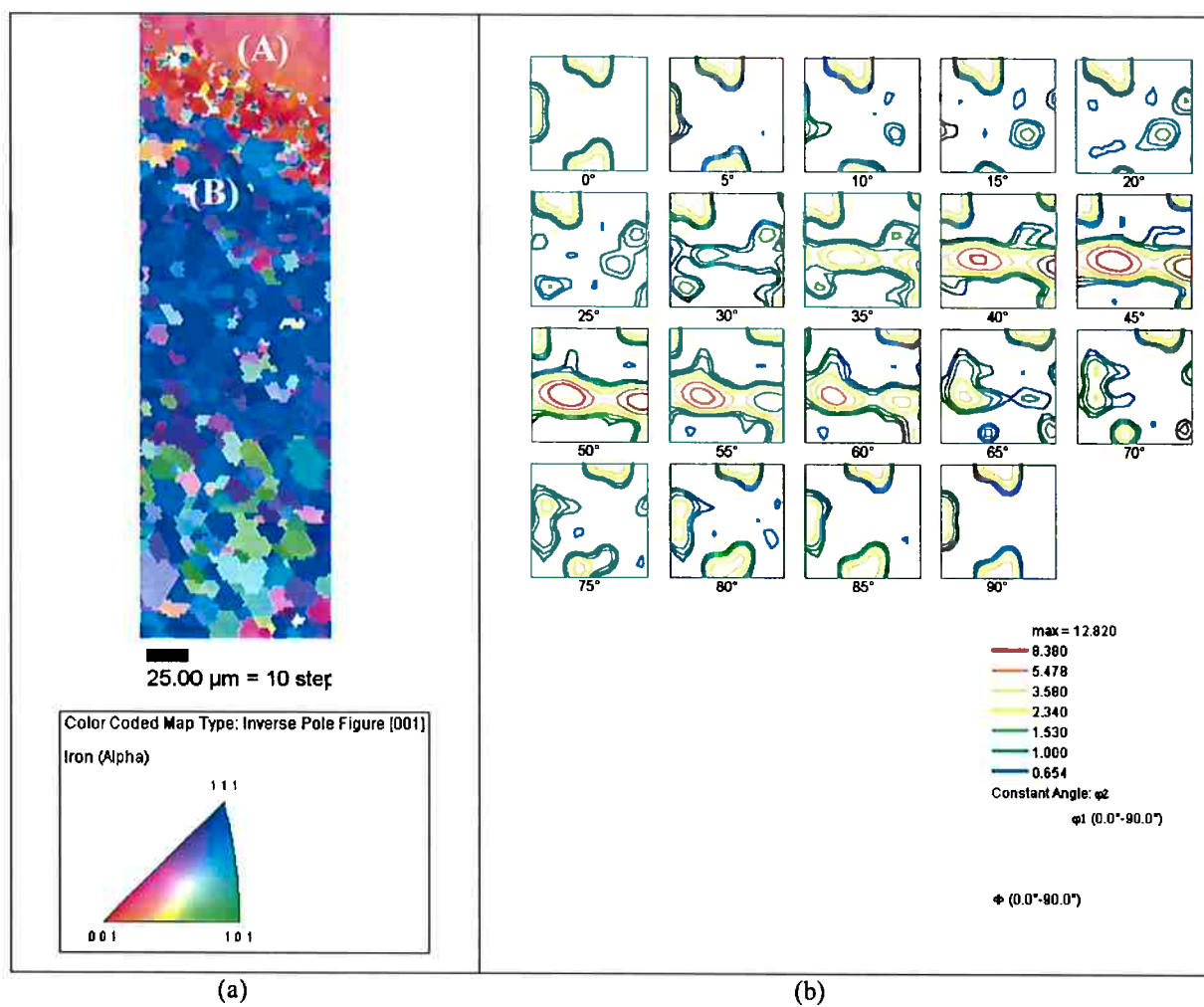


Fig. 4.3.8. (a) Análise por EBSD de uma amostra recozida a 550°C por 30 minutos, sem recuperação prévia. (b) ODF's correspondentes.

5. CONCLUSÕES

Os dados do estudo de recristalização do material mostram que a cinética de recristalização tem forma próxima à sigmoideal, isso ocorre para as amostras com e sem recuperação prévia.

Não foram encontrados resultados mostrando que a recuperação prévia tem alguma influência sobre a taxa de recristalização do material.

Tanto as análises feitas por microscopia óptica como a por EBSD mostram um material heterogêneo, independente dos tempos e temperaturas de tratamento a que foram submetidas as amostras.

Um resultado que é observado em todas as amostras analisadas é a presença da textura $\langle 111 \rangle$ (fibra γ), uma orientação não desejada em aços elétricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOER, B; WIETING, J. Formation of Near $\{001\}<110>$ Recrystallization Texture in Electrical Steels. **Scripta Materialia**, v.37, n.6, p.753-760, 1997.

FALLEIROS, I.G.S; CAMPOS, M.F. Nucleação da Recristalização. In: WORKSHOP DE TEXTURA E RELAÇÕES DE ORIENTAÇÃO, 1., São Paulo, 2001. **Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão**. São Paulo: EPUSP, 2001, p.39-48.

HANSEN, N. Polycrystalline strengthening. **Met. Trans. A**, v.16A, p.2167-2190, 1985.

HILLIARD, J. E. Applications of Quantitative Metallography in Recrystallization Studies. **Recrystallization, Grain Growth and Textures**. ASM Seminar, p. 267-287, 1966.

HUMPHREYS, F.J.; HATHERLY, M. **Recrystallization and Related Annealing Phenomena**. U.K: Pergamon, 1996.

HUTCHINSON, W.B. Development and Control of Annealing Textures in Low-Carbon Steels. **International Metals Reviews**. v. 29, n. 1, p. 25-42, 1984.

HUTCHINSON, W. B. Deformation Microstructures and Textures in Steels. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. A**. vol. 357, p. 1471-1485, 1999.

LANDGRAF, F. J. G. et al. The origin of grain size inhomogeneity in semi-processed electrical steels. **J. Mag. Mag. Mat.**, vol. 215-216, pp. 92-93, 2000.

LI, J. C. M. Recovery Processes in Metals, in **Recrystallization, Grain Growth and Textures**. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA, 1966, p. 45-97.

PADILHA, A. F. e FALLEIROS, I. G. S. Cinética de Recristalização de uma Liga de Alumínio Contendo Dispersão de Precipitados. **Metalurgia-ABM**, vol.35, p. 587-590, 1979.

PINTO, A.L; LOPES, A.M. A Utilização da Técnica de EBSD em Estudos de Microtextura e Mesotextura. In: WORKSHOP DE TEXTURA E RELAÇÕES DE

ORIENTAÇÃO, 1., São Paulo, 2001. **Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão**. São Paulo: EPUSP, 2001, p.297-311.

SHEWMON, P.G. **Transformations in Metals**. McGraw-Hill, New York, 1969. p.69-119

SPEICH, G.R.; FISHER, R.M. Recrystallization of a Rapidly Heated 3¹/₄% Silicon Steel. In **Recrystallization Grain Growth and Textures**. Metals Park: ASM, 1966.

TAKANOHASHI, R. et al. Grain Orientation Clusters in the Primary Recrystallization of Non-oriented Electrical Steels. In Proceedings of the 21st. Risø International Symposium on Materials Science, 21., Denmark, 2000. **Recrystallization - Fundamental Aspects and Relations to Deformation Microstructure**. Roskilde: 2000, p.601-606.