

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JULIANA KAYASIMA

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM
AÇO 1006 EM DIFERENTES CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO EM
FORNO CONTÍNUO INDUSTRIAL**

São José dos Campos

2021

JULIANA KAYASIMA

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM
AÇO 1006 EM DIFERENTES CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO EM
FORNO CONTÍNUO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Profa. Dra. Aline Capella de
Oliveira

Coorientador: Tiago Nisio Gonçalves

São José dos Campos

2021

JULIANA KAYASIMA

ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AÇO 1006 EM DIFERENTES CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO EM FORNO CONTÍNUO INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de São Paulo como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Aline Capella de Oliveira

Universidade Federal de São Paulo

Orientadora

Tiago Nisio Gonçalves

Instituição Gerdau Aços Longos S.A.

Coorientador

Prof. Dra. Ana Paula Fonseca Albers

Universidade Federal de São Paulo

Na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei de direitos autorais nº 9610/98, autorizo a publicação livre e gratuita desse trabalho no Repositório Institucional da UNIFESP ou em outro meio eletrônico da instituição, sem qualquer ressarcimento dos direitos autorais para leitura, impressão e/ou download em meio eletrônico para fins de divulgação intelectual, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFESP São José dos Campos com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Kayasima, Juliana.

Estudo comparativo do comportamento mecânico de um aço 1006 em diferentes ciclos de tratamento térmico em forno contínuo. /Juliana Kayasima. 2021.

36f.

Trabalho de conclusão de curso Engenharia de – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, 2021

Orientador: Aline Capella de Oliveira.

Título em inglês: Comparative study of the mechanical behavior of a carbon steel 1006 in different heat treatment cycles using an industrial oven.

1. Recozimento. 2. Aço. 3. Trefilação. 4. Industrial. I. Oliveira, Aline Capella de. II. Trabalho de conclusão de curso Engenharia de Materiais Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia. III. Estudo comparativo do comportamento mecânico de um aço 1006 em diferentes ciclos de tratamento térmico em forno contínuo.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Monica e Wiliam, a quem devo tudo em minha vida, por proporcionarem o apoio, estrutura e amor durante todos esses anos, e por sempre se fazerem presentes nos momentos difíceis.

As minhas irmãs Mariana e Giovana, por se orgulharem e vibrarem junto comigo em cada vitória.

Ao meu companheiro de todos os momentos Dudu, por me confortar apenas com seu olhar e focinho.

A todas as pessoas da minha família que sempre estiveram torcendo e me motivando a ser alguém cada vez melhor.

A minha orientadora Profa. Dra. Aline Capella, de Oliveira pela paciência e disponibilidade durante todo o projeto.

Ao técnico do laboratório Sandoval, que me auxiliou e ajudou, mesmo que por um curto período nos ensaios para este trabalho.

Ao meu coorientador Tiago Nisio Gonçalves pela empatia, companheirismo, objetividade e por ser um dos grandes responsáveis pelo meu desenvolvimento profissional e pessoal na Gerdau.

Ao Joao Perez Montilla por me tornar parte do seu projeto e me passar ensinamentos que levarei para a vida toda.

A todos os técnicos e colegas de trabalho que me ajudaram de alguma forma na condução deste trabalho mesmo que a distância.

A Gerdau Aços Longos pela confiança, disponibilidade de recursos e suporte técnico.

RESUMO

Levando em conta o cenário econômico do país, existe uma constante necessidade de desenvolvimento e de otimização e redução de custos de processos em empresas do ramo siderúrgico. Para arames recozidos com aplicação na construção civil, observou-se uma oportunidade de redução de custo a partir do ganho em produtividade em uma de suas etapas de fabricação, sendo ela o tratamento térmico. O recozimento é crucial para obtenção das características de ductilidade e resistência mecânica desejáveis para alguns tipos de arames devido à etapa prévia de deformação plástica onde o fenômeno do encruamento é acentuado, como no exemplo de arames trefilados BWG (Birmingham Wire Gauge) para amarração de estruturas de concreto armado. O presente trabalho analisou comparativamente o recozimento de um fio de aço trefilado baixo carbono em dois ciclos de tratamento térmico diferentes, variando-se dois parâmetros, a temperatura e a velocidade. Para um ciclo B foi utilizado uma velocidade 25% superior ao ciclo A e a temperatura média de B foi 0,62% superior ao de A. Após recozido, o arame foi submetido ao ensaio de liberação de tração, apresentando resultado dentro dos parâmetros estabelecidos tanto do padrão de qualidade da empresa quanto conforme norma ABNT NBR 5589:2012. Após aplicação do ciclo B em escala industrial, em cerca de 2 meses foi observada dificuldade em homogeneização da atmosfera entre as zonas de tratamento térmico, devido à redução de intervalo de tempo em que ocorre a abertura e fechamento das portas, dessa forma foi proposto um novo ciclo C, mantendo-se a temperatura média das zonas e alterando o aumento de velocidade para 23% (m/h) superior ao ciclo A. Os resultados de teste para o ciclo C foram aprovados com média de Limite de Resistência a Tração (LRT) de $31,12 \pm 2,61$ kgf/mm² e processo de recozimento consistente, havendo ainda um ganho em redução de tempo equivalente a 8,57% (h) em comparação com o ciclo A.

Palavras-chave: Recozimento. Aço. Trefilação. Industrial.

ABSTRACT

In our country current economic scenario, and the constant need for development, there is a need to optimize and reduce process costs in companies in the steel industry. For annealed wires used in the civil construction there was an opportunity for cost reduction in one of its stages, namely heat treatment. The annealing process is crucial to obtain ductility and mechanical strength, needed for some type of wires due to the previous stage of plastic deformation where hardening is accentuated, as in the example of BWG wires for mooring. The present work comparatively analyzed the annealing of a drawn low carbon steel in two different cycles, varying two parameters, the temperature and the speed. For the B cycle, a speed 25% higher than the A cycle was used, and the average temperature of B was 0.62% higher than A cycle. After annealing, the wire was subjected to the tensile release test, showing satisfactory results and within the parameters established both in quality standard of the company and according to the ABNT NBR 5589:2012 standard. After testing the B cycle on an industrial scale, in 2 months approximately it was observed difficulty in homogenizing the atmosphere between the heat treatment zones, due to the reduction of the time interval in which the opening and closing of the doors occurs, thus it was proposed a new cycle C, maintaining the average temperature of the zones and changing the speed increase to 23% (m/h) higher than that of cycle A. The test results for cycle C were approved with an average limit of tensile strength of $31,12 \pm 2,61$ kgf/mm² and a consistent annealing process with a gain in time reduction equivalent to 8.57% (h) compared to cycle A.

Keywords: Annealing. Steel. Wire drawing. Industry

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arame BWG Recozido 1006 – 1,25mm.....	14
Figura 2 - Microestrutura de material a) Antes da deformação b) Depois da deformação	17
Figura 3 - Redução da fração volumétrica da ferrita durante o resfriamento lento. (Representação: α , γ e P, como ferrita, austenita e perlita, respectivamente).	18
Figura 4 - Transformação de grão durante o processo de recozimento.....	19
Figura 5 - Diagrama de fases: ferro-carbeto de ferro	20
Figura 6 – Gráfico de ciclos de tratamento térmico de recozimento em forno mufla. Utilizando 3 grupos/ciclos de amostras de arame 1,25mm.	21
Figura 7 - Fluxograma geral do projeto.....	22
Figura 8 - Amostra recozida no ciclo C - Aumento de 500x - Ataque Nital 3% (A) CP1 (B) CP2	30
Figura 9 - Amostra recozida no ciclo C – Aumento 500x – Ataque Nital 3% - CP 3.....	31
Figura 10 - Amostra recozida no ciclo C - Aumento 100x - Ataque Nital 3% - CP 3.....	31
Figura 11 - Amostra recozida a 740°C - Ataque Nital 3% (a) com aumento 125x. (b) com aumento de 250x.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ciclos e tipos de tratamentos térmicos de recozimento em forno mufla para avaliação dos grupos de amostras 1,2 e 3 de arame 1,25mm	23
Tabela 2 - Ciclos de tratamento térmico A, B e C para forno industrial.	23
Tabela 3 - Resultados de Limite de Resistência à Tração (LRT) consolidados para os 3 ciclos testes.	26
Tabela 4 - Diâmetro Médio, Força Máxima e Limite de Resistência à Tração Médio para os grupos (1, 2, 3 e NT).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 5 - Tamanho médio de grão para 3 amostras no ciclo C.	28
Tabela 6 - Tamanhos médios de Grão obtidos para os Grupos 1,2 e 3.	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%p Porcentagem em peso de Carbono

A_1 Linha da transformação de austenita para ferrita no diagrama Fe-C

A_3 Linha da transformação de austenita para cementita no diagrama Fe-C

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

BWG Birmingham Wire Gauge

CP Corpo de Prova

Fe-C Ferro Carbono

LRT Limite de Resistência a Tração

MO Microscópio Ótico

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

NT Não Tratadas

LISTA DE SÍMBOLOS

μm Micrometro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	15
2.1 Objetivos	15
2.2 Justificativas	15
3. REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 Aços para trefilação de arame	16
3.2 Aspectos metalúrgicos	17
3.3 Tratamentos térmicos empregados	18
3.4 Aplicações do arame recozido	Erro! Indicador não definido.
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 Material	21
4.2 Métodos	21
4.2.1 O projeto	21
4.2.2 Ciclos térmicos do Tratamento de Recozimento	22
4.2.3 Tratamento Térmico de Recozimento em Forno industrial	24
4.2.4 Ensaios mecânicos	24
4.2.5 Caracterização microestrutural	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1 Caracterização Mecânica de Aços Recozidos	25
5.2 Caracterização microestrutural	28
6. CONCLUSÕES	33
7. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

A exigência do mercado para desenvolvimento de processos de maior eficiência e produtividade, mantendo frentes como segurança, qualidade e custo, são grandes desafios das indústrias metalúrgicas para acompanhar o ritmo do mercado (NEUBAUER, 2009). Desta forma, projetos de melhoria de performance estão sendo vistos com prioridade dentro destas empresas.

Dados da produção de aço no mundo mostram o considerável aumento de produção, de 1.230 milhões de toneladas em 2008 para 1.712 milhões de toneladas para 2018, sendo que deste segundo, 34.9 milhões de toneladas são produzidas no Brasil, estando o país em 12º lugar como maior importador e exportador de aço mundial. (WORLDSTEEL, 2019).

A trefilação é um dos processos de conformação do aço, e ocorre geralmente a frio para obtenção de diversos produtos acabados e semiacabados existentes no mercado, como barras, fios elétricos, molas para colchão, lã de aço, além de uma gama diversificada de arames de diferentes diâmetros para inúmeras aplicações, como a construção civil.

A matéria prima para trefilação de arames é geralmente um material laminado chamado de fio máquina, o qual passa pelo processo de decapagem antes da trefilação, sendo ela mecânica ou química, para retirada da carepa prejudicial ao processo. O material sofre redução de diâmetro a cada passe da máquina de trefila, sendo o arame resultante processado e enrolado na forma de rolos (GERBASE FILHO, 1976).

Durante o processo de trefilação há aumento contínuo de tensão no metal em função do aumento de densidade de discordâncias durante sua deformação plástica. À medida que a densidade de discordâncias aumenta, sua movimentação se torna mais limitada, sendo necessário, cada vez mais, maiores valores de tensão para a deformação do material (CALLISTER, 2012). Tal operação influencia, principalmente, nas alterações das propriedades mecânicas do metal, aumentando sua resistência e reduzindo sua ductilidade (DIETER, 1986). Além disso, no trabalho a frio, a movimentação das discordâncias aumenta gradativamente a tensão necessária para que a deformação plástica de fato ocorra, um fenômeno conhecido como encruamento.

É devido ao encruamento durante a trefilação que é dada a importância do processo seguinte de recozimento, que tem como objetivo, aliviar as tensões geradas na deformação plástica do material na etapa anterior, evitando sua ruptura durante as etapas subsequentes de processo (SILVA & MEI, 1988). Assim, o tratamento térmico de recozimento permite a reorganização dos átomos

durante o aquecimento do material, a uma certa temperatura, seguido de um resfriamento lento que irá recuperar e recristalizar o material (CHIAVERINI, 2010).

Neste contexto, o emprego de um ciclo de tratamento térmico correto é crucial para a qualidade do material. A não utilização e o não respeito aos parâmetros críticos do processo geram graves consequências e impactos produtivos, se não identificados. Fenômenos podem ser observados, como o colamento das espiras dos rolos de arame recozido, resultado de atmosfera não homogênea em temperaturas extremamente altas do forno de recozimento. Outra ocorrência fora do padrão é a descarbonetação, devido a reação do oxigênio com o carbono dissolvido no aço, resultando em redução de carbono superficial e, conseqüente, perda de dureza na superfície. (ASM, 1981).

O arame recozido tem como aplicação principal o uso em amarração de vergalhões em estruturas de concreto armado no setor de construção civil. São produzidos com aço baixo teor de carbono, resultando em suas propriedades de elevado grau de maleabilidade, tornando prático e rápido o trabalho no canteiro de obra, os quais exigem dobras e torções. Além disso, apresenta elevada resistência mecânica, com resistência a tração de até 55 kgf/mm² conforme norma ABNT NBR 5589:2012.

Atualmente, são disponibilizados no mercado nacional, pela empresa Gerdau, rolos de 1 kg, 35 kg, 50 kg e 70 kg (GERDAU, 2019). A Figura 4 mostra uma imagem de um rolo de 10 kg de arame recozido, vendido pela empresa.

Figura 1 - Arame BWG Recozido 1006 – 1,25mm



Fonte: Gerdau, 2009

O maior desafio dos projetos de melhoria é além de atender ao cliente com um produto de qualidade e dentro das suas especificações para sua aplicação, obter um processo eficiente, seguro

e com o aumento da sua produtividade com conseqüente redução dos custos associados, mantendo-se competitivos no mercado.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi comparar o comportamento mecânico de um arame trefilado de aço, com baixo teor de carbono, em três ciclos diferentes de tratamento térmico de recozimento pleno, analisando a viabilidade da aplicação dos mesmos em escala industrial, conforme requisitos da norma ABNT NBR 5589:2012 (propriedades mecânicas).

2.2 Justificativas

Dados do Preliminar Estatístico de Outubro de 2019, do Instituto Aço Brasil (2019, p.01) relatam, “As vendas internas recuaram 5,9% frente a setembro de 2018 e atingiram 1,6 milhão de toneladas. O consumo aparente de produtos siderúrgicos foi de 1,8 milhão de toneladas, 6,4% inferior ao apurado no mesmo período de 2018.”

Tratando-se de produtos laminados longos, especificamente, ainda do Preliminar Estatístico (2019, p.02), em relação ao mês de setembro de 2019, houve uma redução de 1,1% em relação ao mesmo mês do ano anterior.

Diante desse cenário do mercado, existe a necessidade de melhoria na produtividade dentro das empresas, tornando o processo mais eficiente e reduzindo o custo associado ao mesmo, de modo a manter-se lucrativo para o negócio em meio a tempos de crise.

Uma das etapas cruciais do processo de produção de arames é o tratamento térmico de recozimento, devido a sua criticidade em termos de propriedades mecânicas do material para a etapa posterior de trefilação, e o gargalo que representa no processo.

Dessa forma, estima-se analisar comparativamente resultados de ensaio de tração em três ciclos de tratamento térmico diferentes em que se variam dois parâmetros, a velocidade e a temperatura. São eles o ciclo de referência A, o B com aumento na média de temperatura de 0,62% e aumento de 25% da velocidade em relação ao ciclo A, e o ciclo C onde mantêm-se a temperatura média por zona e ocorre aumento de 23% da velocidade também em relação ao ciclo A. Os resultados devem atender à especificação da norma ABNT NBR 5589:2012 de limite de resistência a tração máxima do arame recozido de 55 kgf/mm.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aços para trefilação de arame

As características metalúrgicas, correlacionadas com as exigências de operação do produto final, são o fator determinante para a seleção de um determinado aço (SILVA & MEI, 1988). Os aços comerciais, a rigor, não são ligas binárias mas apresentam uma natureza complexa por obter ligas secundárias, derivadas do processo de fabricação. Assim, são definidos como aços, ligas ferro-carbono com percentuais (em peso) de carbono (%p C) entre 0,008%p e 2,11%p e alguns elementos residuais. Os seus limites inferiores e superiores correspondem à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro a 1148° C, respectivamente (CHIAVERINI, 1990).

Os aços carbono comuns são classificados de acordo com sua porcentagem de carbono, podendo ser de baixo, médio ou alto carbono. Os aços de baixo carbono são produzidos em maiores quantidades devido ao seu baixo custo de produção. Apresentam porcentagem de carbono abaixo de 0,25%p C, baixa dureza e resistência mecânica, alta ductilidade e tenacidade, devido à presença das microestruturas ferrita e perlita (CALLISTER, 2012).

A concentração de carbono entre 0,25%p e 0,60%p C são reservadas para os aços classificados como de médio teor de carbono, os quais possuem baixa temperabilidade. Estes aços, quando tratados termicamente, são mais resistentes que os aços com baixo teor de carbono, com o sacrifício de sua ductilidade e tenacidade. São utilizados no mercado para peças de máquinas e componentes estruturais de alta resistência (CALLISTER, 2012).

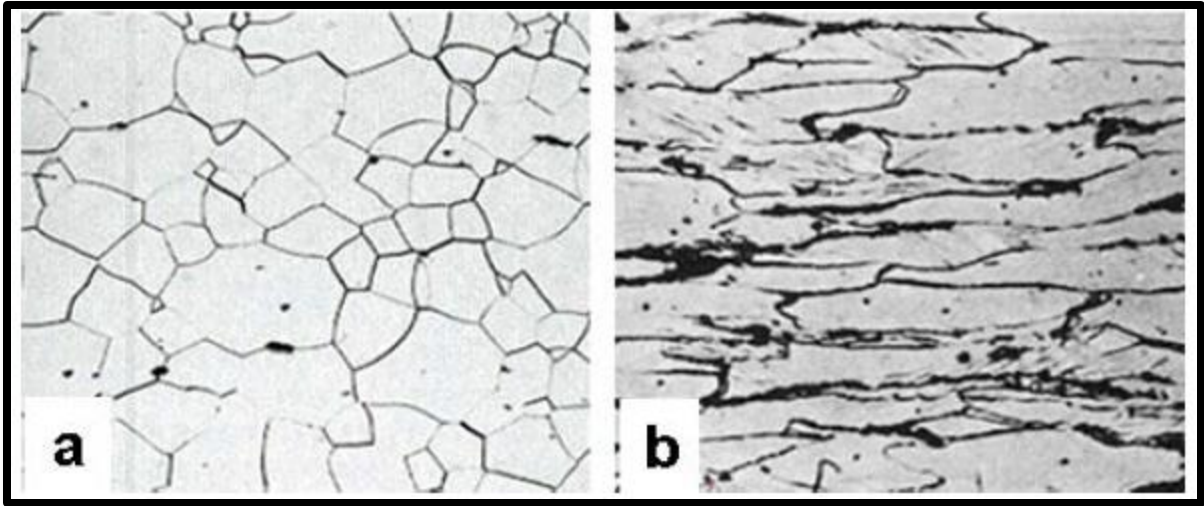
Para os aços de alto teor de carbono, a faixa de concentração de carbono varia entre 0,60%p e 1,40%p C, sendo mais duros e mais resistentes mecanicamente, porém menos dúcteis que os demais aços de menor concentração de carbono. São utilizados como ferramenta de corte, como matrizes de conformação de outros materiais e arames de alta resistência devido a sua alta resistência ao desgaste (CALLISTER, 2012).

Os aços utilizados na produção de arames para construção civil de menor responsabilidade são usualmente baixo carbono com porcentagem de carbono entre 0,08%p C a 0,20%p C. Os produtos são empregados no estado recozido pois apresentam maior uniformidade nas propriedades mecânicas, principalmente para arames de diâmetros menores, pois, ao sofrerem redução de diâmetro se tornam mais frágeis. (CHIAVERINI, 1990)

3.2 Aspectos metalúrgicos

Grande parte da deformação plástica sofrida no processo de trefilação provém dos esforços compressivos resultantes da reação da matriz com o metal (DIETER, 1986). A microestrutura de um metal antes e após a deformação pode ser observada na Figura 1, abaixo:

Figura 2 - Microestrutura de material a) Antes da deformação b) Depois da deformação

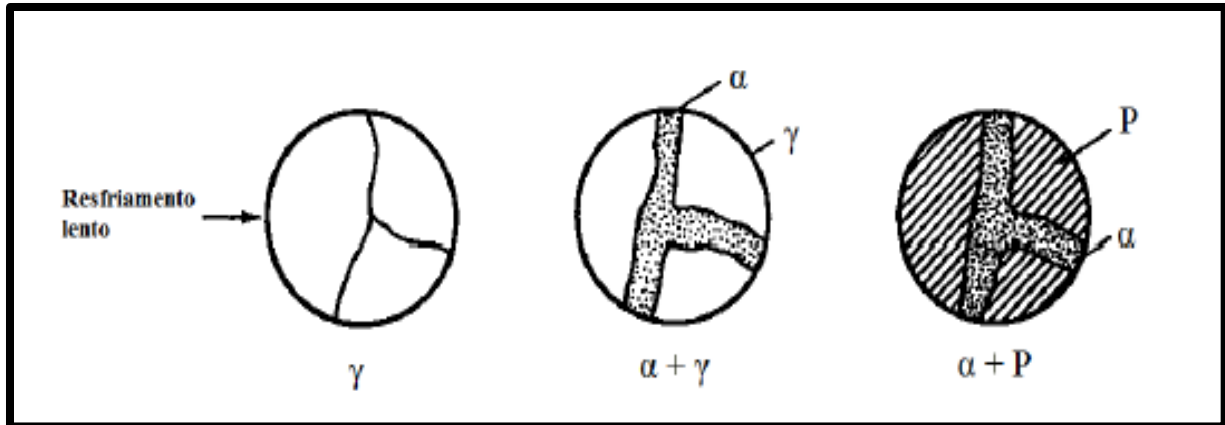


Fonte: Apostila TRE- 008 – Preparação Superficial – Gerdau, 2007

A trefilação via seca de arames para amarração envolve várias etapas. Inicia-se pela decapagem da matéria-prima, a fim de remover a camada de carepa presente em sua superfície, inibindo a formação de defeitos superficiais ou desgaste excessivo da matriz da fieira, além da adição da camada de cal para melhor aderência do lubrificante do processo (DIETER, 1986). Em seguida, o material é processado na máquina de trefilar, onde ocorre a deformação plástica do metal em temperatura ambiente, resultando em redução em seu diâmetro e aumento de seu comprimento a cada passe, através da passagem pela fieira. Em geral, a redução de área entre um passe e outro pode ser de até 30%, podendo haver mais de um passe, dependendo da configuração desejada. Devido ao atrito causado no processo, em cada fieira há um sistema de refrigeração para que o calor gerado seja amenizado, preservando a vida útil da ferramenta, a lubrificação do material e as propriedades finais do produto (EDER, 2006). Por fim, o material é abastecido em um forno contínuo industrial, para o tratamento térmico de recozimento, onde ocorre a redução do limite de escoamento e de resistência do material trefilado e a recristalização dos grãos alongados do material (RODRIGUES, 2012).

Assim, as microestruturas esperadas, após o processo de recozimento do aço de baixo carbono, são a perlita e a ferrita, geradas pelo resfriamento lento que sofrem, após aquecimento e permanência do material no recozimento, em função da difusão dos átomos na austenita, como representado na Figura 2 (SILVA & MEI, 1988).

Figura 3 - Redução da fração volumétrica da ferrita durante o resfriamento lento.
(Representação: α , γ e P, como ferrita, austenita e perlita, respectivamente).



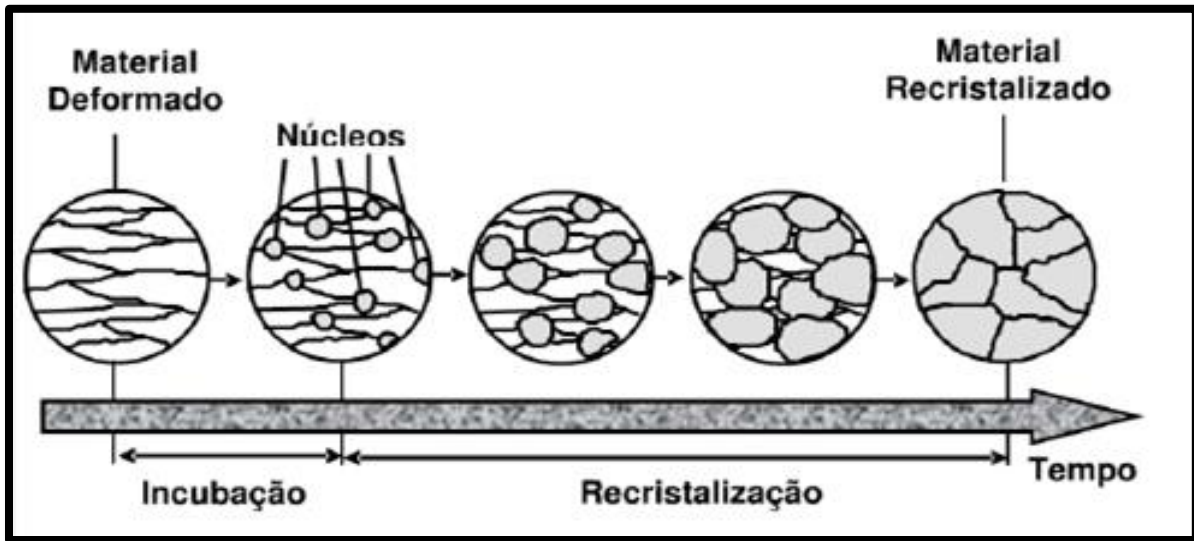
Fonte: (SILVA & MEI, 1988).

3.3 Tratamentos térmicos empregados

Como mencionado, o encruamento sofrido pelo material trefilado exerce uma ação intensa sobre as discordâncias do metal. Essa força de trabalho é consumida em forma de calor, sendo 10% deste armazenado no material em forma de energia. A condição cinética favorável ao retorno do sistema às suas condições iniciais é alcançada pelo emprego do tratamento térmico de recozimento (CHIAVERINI, 2008).

O recozimento consiste no aquecimento do material a uma certa temperatura, por um determinado período para homogeneização da temperatura e rearranjo atômico, eliminando as configurações dos defeitos cristalinos (CHIAVERINI, 2008). Seu principal objetivo é recuperar as propriedades do material, antes da deformação plástica, reduzindo os limites de escoamento e de resistência mecânica do metal, além de recristalizar os grãos alongados durante seu processamento. Tal processo é representado pela Figura 3 (RODRIGUES, 2012).

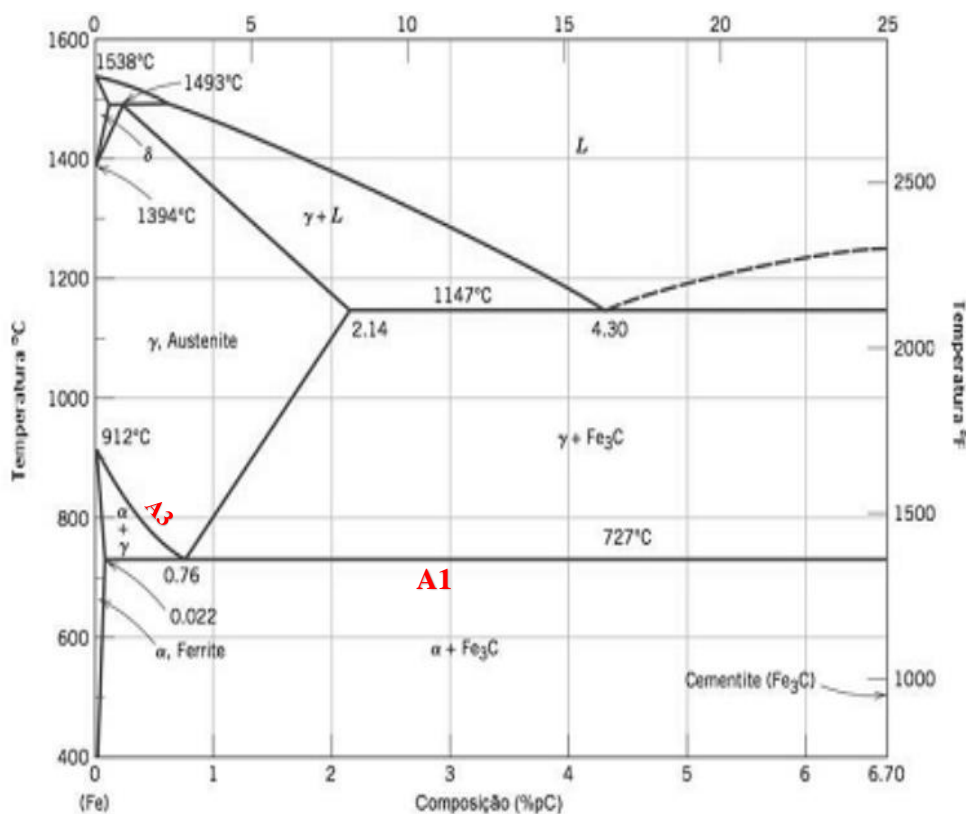
Figura 4 - Transformação de grão durante o processo de recozimento.



Fonte: Apostila TRE – 008 – Preparação Superficial – Gerdau, 2007

Existem três tipos de recozimento, sendo eles o pleno, o subcrítico e a esferoidização. No recozimento pleno ou apenas recozimento, as propriedades do material têm características de baixa dureza e boa ductibilidade devido a presença da microestrutura de perlita grosseira, originada pela austenitização do aço em temperaturas aproximadamente 50°C acima da linha A3 (Linha da transformação de austenita para cementita no diagrama Fe-C) para hipoeutetóides, e para hipereutetóides 50°C acima de A1 (Linha da transformação de austenita para ferrita no diagrama Fe-C) (SILVA & MEI, 1988).

Figura 5 - Diagrama de fases: ferro-carbeto de ferro



Fonte: Callister, 2012.

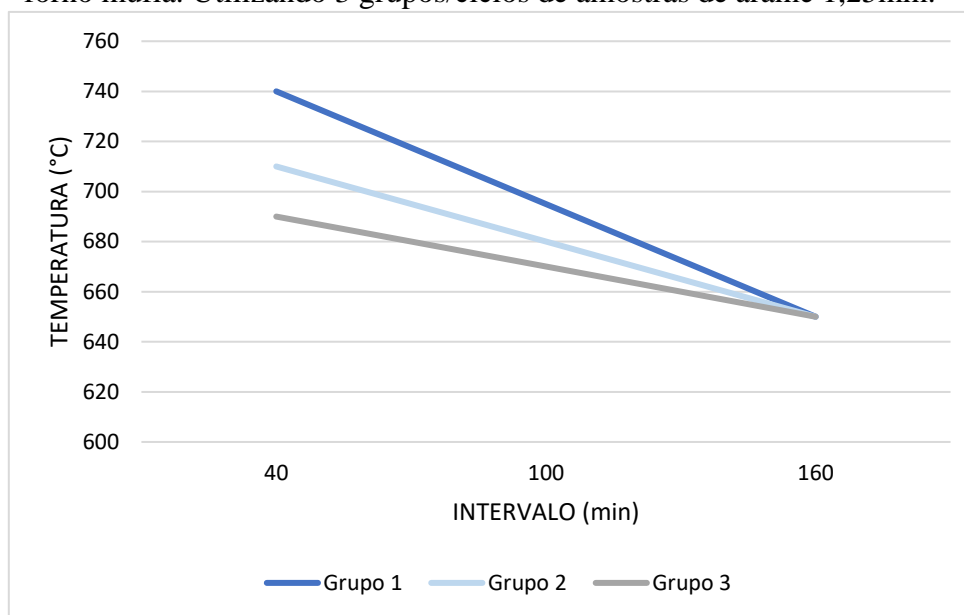
A característica do recozimento subcrítico é a recuperação da ductibilidade do aço encruado, aquecendo o material a temperaturas abaixo de A1, indicada na Figura 5, entre 600°C e 680°C, seguido de resfriamento ao ar. Nesse, não ocorre transformação austenítica e as principais transformações que ocorrem são a recuperação e a recristalização das fases (SILVA & MEI, 1988).

O recozimento intercrítico ou de esferoidização visa obter uma estrutura de carbonetos esferoidizados, aplicado a temperaturas entre A1 e A3, também indicada na Figura 5, com microestrutura ferrítica e martensítica (SILVA & MEI, 1988).

Os ciclos A, B e C serão os objetos de estudo do presente trabalho, são definidos como ciclo A, apresentando uma média de temperatura por zona de aproximadamente 711°C e ciclo B e C com temperatura média por zona de aproximadamente 716°C, representando um aumento de 0,62% em relação a A. Em relação a velocidade, o ciclo B apresenta velocidade 25% superior ao ciclo A e o C 23%.

Os ciclos propostos B e C foram baseados no trabalho apresentado por Oliveira (2019), em que 3 grupos de amostragem de arame foram recozidos em um forno mufla experimentalmente em ciclos de tratamento térmico diferentes, como mostra a Figura 6 a seguir. Dos 3 ciclos, o ciclo B e C foi baseado no Grupo 1, que apresenta as maiores temperaturas de recozimento.

Figura 6 – Gráfico de ciclos de tratamento térmico de recozimento em forno mufla. Utilizando 3 grupos/ciclos de amostras de arame 1,25mm.



Fonte: Oliveira, 2019

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

O aço com baixo teor de carbono empregado neste estudo foi o 1006, trefilado até 1,25 mm de diâmetro e atestado conforme norma NBR 5589:2012, fornecido pela Gerdau Aços Longos S.A.

4.2 Métodos

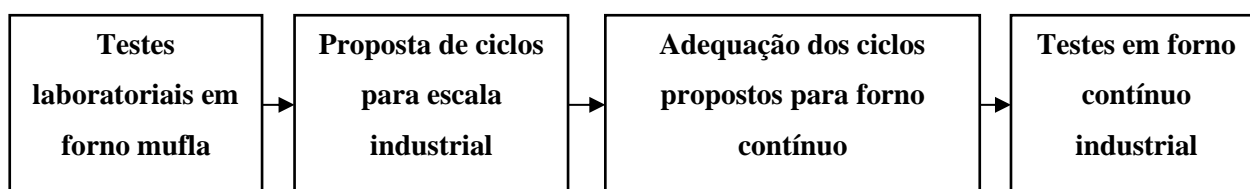
4.2.1 O projeto

O objetivo geral deste trabalho se deu pela necessidade de aumento de capacidade do forno industrial, da empresa Gerdau Aços Longos S.A. Neste contexto, foram levantadas duas frentes de trabalho: o tratamento térmico de recozimento em escalas laboratorial e a industrial.

Dessa forma, para a frente laboratorial foram realizados tratamentos térmicos de recozimento, em forno tipo mufla, visando simular as condições de um forno contínuo industrial e suas temperaturas máximas atingíveis. Os resultados obtidos em escala laboratorial foram divulgados no Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Materiais do ICT-UNIFESP, de autoria de Oliveira, O.

No presente trabalho, foram considerados procedimentos em escala industrial, considerando dados obtidos a partir do ciclo de melhor desempenho conforme identificado no estudo laboratorial, visando o ganho em produtividade. Um fluxograma do projeto está representado na Figura 5.

Figura 7 - Fluxograma geral do projeto.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.2 Ciclos térmicos do Tratamento de Recozimento

Os ciclos térmicos de recozimento propostos foram previamente analisados no trabalho realizado por Oliveira (2019), realizados para o mesmo arame, empregado no presente trabalho, SAE 1010 1,25mm. A Tabela 1 apresenta os ciclos propostos pela autora. Como o objetivo do presente trabalho é o ganho de produtividade em escala industrial, optou-se pelo ciclo do Grupo 1, devido a suas temperaturas serem mais elevadas.

Tabela 1 - Ciclos e tipos de tratamentos térmicos de recozimento em forno mufla para avaliação dos grupos de amostras 1,2 e 3 de arame 1,25mm

Grupo	1	2	3
Tipo de Recozimento	Intercrítico	Subcrítico	Subcrítico
Intervalo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
40	740	710	690
60	695	680	670
60	650	650	650

Fonte: Oliveira, 2019

Assim, o ciclo intercrítico do Grupo 1 proposto por Oliveira (2019) foi adaptado ao tratamento térmico realizado em forno industrial que, além de atmosfera inerte, apresenta 8 zonas de tratamento térmico e um tempo mais longo de exposição à temperatura.

Sendo assim, foram propostos inicialmente 2 ciclos de tratamento térmico para realização dos testes, denominados ciclos A e B, sendo o ciclo A já empregado pela empresa com temperatura média por zona de 711°C e velocidade padrão representada como Y, e B, criado a partir da referência do Grupo 1 da Tabela 1. Porém, após análises levantadas a longo prazo, optou-se também pela observação dos resultados, considerando um novo ciclo, denominado ciclo C, adaptado às condições necessárias para atendimento dos requisitos de propriedades mecânicas. Por questões de estratégia de negócio os parâmetros não podem ser definidos de forma objetiva, sendo assim, serão apresentados na Tabela 2.

Os parâmetros críticos do processo se mantiveram os mesmos para todos os testes.

Tabela 2 - Ciclos de tratamento térmico A, B e C para forno industrial.

CICLO	TEMPERATURA MÉDIA DE RECOZIMENTO (°C)	VELOCIDADE (m/h)
A	711	Y
B	716	1,25Y
C	716	1,23Y

Fonte: Elaboração própria

4.2.3 Tratamento Térmico de Recozimento em Forno industrial

Para o recozimento dos aços, nos ciclos propostos, foi utilizado o forno industrial da empresa Gerdau Aços Longos S.A, que consiste em 8 zonas de tratamentos térmicos contínuos com soleira de rolos e atmosfera controlada. Para isto,

O material, em estocador, foi abastecido em uma grelha e posicionado na entrada do forno com auxílio de uma empilhadeira. Em seguida, foi acionada a soleira de rolos que move o material para o interior do forno, em direção à primeira zona. O processo é contínuo e é finalizado com a retirada da última grelha da esteira.

Após o recozimento, para amostragem e análise do material tratado termicamente, foram retiradas 10 amostras, a partir da entrada da primeira grelha no ciclo C, alternando os estocadores por grelha, de forma a obter amostras do começo, meio e fim do tratamento. Essa amostragem representa 40% da capacidade de grelhas de um ciclo completo ao longo do forno.

A estruturação do método comparativo se deu em algumas etapas:

- I. realização de ensaios de tração uniaxial das amostras retiradas do ciclo A.
- II. Análise dos resultados obtidos dos ensaios mecânicos para atendimento às especificações do mercado para o produto.
- III. Realização do teste no novo ciclo B em escala industrial.
- IV. Análise dos resultados dos ensaios mecânicos no ciclo B.
- V. Realização do teste para ciclo C em escala industrial.
- VI. Análise dos resultados dos ensaios mecânicos do ciclo C.
- VII. Análise da viabilidade do emprego do novo ciclo no processo industrial, a partir dos resultados obtidos.

4.2.4 Ensaios mecânicos

Para obtenção do limite de resistência mecânica (LRT) dos materiais tratados termicamente, foram realizados ensaios mecânicos de tração utilizando a máquina DL20.000 EMIC, seguindo a norma NBR ISO 6892.

As amostras de arame recozido foram cortadas com auxílio de alicate universal, no tamanho de 10 cm aproximadamente, suficiente para realização do ensaio. A velocidade de ensaio utilizada foi mantida fixa, em de 100 mm/min.

4.2.5 Caracterização microestrutural

Para caracterização da microestrutura do material, foi realizada microscopia óptica (MO) utilizando a Olympus, modelo BX51M.

Primeiramente, as amostras foram preparadas primeiramente com o corte, seguido do embutimento com resina polimérica, polimento e ataque químico.

O corte foi realizado com auxílio do alicate e o embutimento foi feito em resina polimérica de cura a frio para melhor manuseio da amostra. O lixamento foi realizado em uma politriz semiautomática com lixas de granulometrias de 60, 220, 400 e 600, respectivamente, com baixa rotação, força moderada e fluxo constante de água para lubrificação. O polimento foi realizado com pano de polimento e alumina em solução de 1 μm . A última etapa consistiu no ataque químico para revelação microestrutural utilizando solução de Nital 3% seguido de neutralização para revelação microestrutural.

Finalmente, para análise de tamanho de grãos, foi empregado o *software* de processamento de imagens, Image J. Para isto, primeiramente, foi realizada a calibração da escala com uma medida conhecida, seguida da medição de no mínimo duas direções para cada grão, a fim de obter uma média real dos tamanhos de grãos, totalizando 50 medidas para cada imagem. As análises foram realizadas seguindo a norma ASTM E 112.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Mecânica de Aços Recozidos

O primeiro teste se deu no ciclo A com temperatura média de recozimento de aproximadamente 711°C e velocidade Y (m/h). No teste seguinte para o ciclo B foi utilizada a temperatura média por zona de 716°C e aumento de 0,25% na velocidade (m/h). Para o ciclo C foi mantida a temperatura média por zona de 716°C, com aumento de 0,23% na velocidade (m/h), com leve redução em relação ao ciclo B. Para todos os testes foram retiradas 10 amostras em cada.

Os resultados de ensaio de LRT, para os diferentes tipos de ciclos empregados, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de Limite de Resistência à Tração (LRT) consolidados para os 3 ciclos testes.

CICLO	CICLO A		CICLO B		CICLO C	
	Diâmetro (mm)	LRT (kgf/mm ²)	Diâmetro (mm)	LRT (kgf/mm ²)	Diâmetro (mm)	LRT (kgf/mm ²)
1	1,25	34,33	1,25	33,76	1,25	32,91
2	1,25	36,04	1,27	34,78	1,28	27,12
3	1,25	34,47	1,25	34,62	1,26	33,10
4	1,26	34,91	1,26	34,20	1,26	32,53
5	1,27	29,79	1,26	33,23	1,29	31,58
6	1,25	35,33	1,28	34,51	1,31	31,01
7	1,25	34,75	1,26	34,35	1,29	31,58
8	1,25	30,18	1,25	34,75	1,27	33,56
9	1,26	34,35	1,24	35,03	1,28	25,74
10	1,26	33,23	1,25	35,47	1,28	32,07
Média	1,26 ± 0,01	33,74 ± 2,11	1,26 ± 0,01	34,47 ± 0,64	1,28 ± 0,02	31,12 ± 2,61

Fonte: Elaboração própria

Os resultados para o ciclo A para média de LRT foi de 33,74 kgf/mm², com valor máximo de 36,04 kgf/mm² e valor mínimo de 29,79 kgf/mm², os quais estão de acordo com a norma ABNT NBR 5589:2012, que leva em consideração critério de aceitação de LRT o valor máximo de 55 kgf/mm² para o aço recozido. Como mencionado, este ciclo é empregado convencionalmente nos processos industriais já utilizado pela produção, portanto os resultados já eram esperados. Observa-se pequeno aumento, da ordem de 2,16%, no valor médio de LRT para o ciclo B, ainda dentro dos critérios pré-estabelecidos pela referida norma (55 kgf/mm²), com valor médio de LRT de 34,47 kgf/mm², valor máximo de 35,47 kgf/mm² e valor mínimo de 33,23 kgf/mm². Esse resultado contradiz a literatura consultada (CHIAVERINI, 1990), quando analisado somente o critério de aumento temperatura média aplicada no ciclo, porém, outra variável que também foi alterada e deve ser considerada é a velocidade.

Desta forma, o ciclo foi, inicialmente, validado e se mostrou eficiente para o objetivo do trabalho, com ganho referente à redução de tempo de recozimento em 20,0%. Porém, foi observado após alguns meses, que as amostras do material submetidas aos ensaios de liberação internos, as quais trabalham com uma redução de aproximadamente 20% em relação a norma NBR 5589, estavam sendo reprovados.

Com o intuito de averiguar as possíveis causas da variação no limite de resistência à tração, foram consideradas algumas variáveis do processo, como: funcionamento irregular dos termopares, dos recirculadores de ar quente dentro das zonas de tratamento e vazão do gás nitrogênio ao longo do forno. Entretanto, tais parâmetros se mostraram eficazes, não sendo identificada nenhuma influência dos mesmos, não sendo necessária manutenção.

Neste contexto, foi concluído que a abertura e o fechamento das portas dos fornos, em um intervalo de tempo menor que o anterior, devido à maior velocidade de processo empregada, causam a contaminação das zonas posteriores com o ar das zonas anteriores e ao longo dos ciclos não permitia o alcance da temperatura ideal para que o recozimento ocorresse de maneira satisfatória.

Existe também a possibilidade que esse intervalo de tempo reduzido, de movimentação das cargas dentro do forno, não estivesse propiciando ao material, tempo hábil para que houvesse descontaminação do ar atmosférico por nitrogênio. De qualquer forma, o tratamento térmico se mostrou menos eficiente.

Além disso, com a redução do aumento da velocidade para 0,23% em relação à velocidade do ciclo A, no ciclo C, foi observado resultados de LRT médio 2,62% menores que os dados obtidos para o primeiro teste, em que o maior valor de LRT obtido foi 33,56 kgf/mm² e o menor foi 25,74 kgf/mm². Conclui-se, portanto, que a velocidade de processo tem um impacto na ductilidade do material. Uma análise comparativa pode ser feita com o trabalho apresentado por Oliveira (2019), onde é possível notar pouca variação entre os resultados obtidos de LRT médio para o Grupo 1 (740° C), grupo escolhido como referência para criação do ciclo B e C, em relação ao teste do ciclo C, conforme Tabela 4.

Em suma, os resultados positivos para o ciclo C eram esperados e condizem com os testes laboratoriais realizados previamente. Portanto, em relação às propriedades mecânicas, e tendo como parâmetro a norma NBR 5589:2012, o ciclo C foi considerado aprovado para emprego no processo industrial da empresa.

Tabela 4 - Diâmetro Médio, Força Máxima e Limite de Resistência à Tração Médio para os grupos (1, 2, 3 e NT).

Grupo	Diâmetro Médio (mm)		Força Máxima Média (kgf)		Limite de Resistência à Tração Médio (kgf/mm ²)	
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Desvio Padrão	Valor	Desvio Padrão
1 (740°C)	1,27	0,01	38,58	1,65	30,26	1,52
2 (710°C)	1,26	0,01	41,76	1,26	33,70	1,08
3 (690°C)	1,26	0,01	43,42	1,14	34,92	0,96
NT	1,25	0,00	113,18	2,62	92,43	2,24

Fonte: Oliveira, 2019

5.2 Caracterização microestrutural

Foi realizada caracterização microestrutural em 3 corpos de provas retirados do terceiro teste, no ciclo C, com a finalidade de comparar com os resultados prévios obtidos laboratorialmente.

Os dados para tamanho de grão médio assim como seus respectivos desvios estão exemplificados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tamanho médio de grão para 3 amostras no ciclo C.

CP	Tamanho Médio de Grão (mm)	Desvio Padrão
1	0,024	4,81
2	0,027	5,71
3	0,027	5,04

Fonte: Elaboração própria

No trabalho de Oliveira (2019) foram analisados 3 tipos de tratamento térmico de recozimento em forno mufla para escala laboratorial e realizada a medição de tamanho médio de grão, conforme exemplificado na Tabela 6.

Tabela 6 - Tamanhos médios de Grão obtidos para os Grupos 1,2 e 3.

Grupo	Tamanho Médio de Grão (μm)	Desvio Padrão
1 (740°C)	37,93	8,94
2 (710°C)	27,52	7,82
3 (690°C)	17,29	4,14

Fonte: Oliveira, 2019.

Realizando a conversão para micrômetros, no que se refere ao Grupo 1 (740°C), o tamanho médio de grão foi de 0,038 mm aproximadamente, valor 36,8% maior do que o obtido para o teste no ciclo C. Em contrapartida, o desvio padrão para o ciclo C é 46,2% menor do que os resultados obtidos laboratorialmente.

Sendo assim, podem ser feitas duas considerações. A primeira se refere ao comportamento dos grãos no ciclo C, os quais obtiveram menor tamanho de grão durante o processo de recozimento em escala industrial, o que justifica o aumento do limite médio de resistência a tração observado anteriormente, uma vez que o aumento na dureza e LRT estão diretamente relacionados com o tamanho de grão, pois, quanto menores os tamanhos de grãos, maior a quantidade de barreiras que impedem a movimentação das discordâncias e esse bloqueio conseqüentemente causa um menor empilhamento das discordâncias nos contornos de grão, criando baixa concentração de tensão que dificulta a liberação de novas fontes de discordâncias nos grãos vizinhos (ABBASCHIAN, 2010).

Figura 8 - Amostra recozida no ciclo C - Aumento de 500x - Ataque Nital 3% (A) CP1
(B) CP2

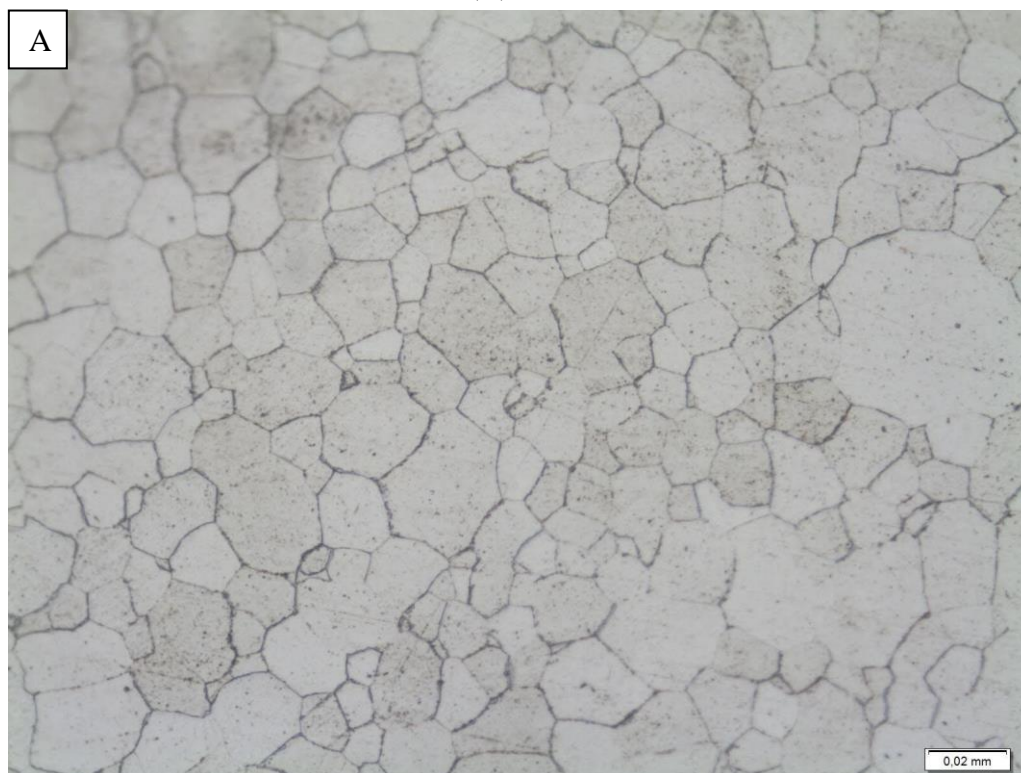
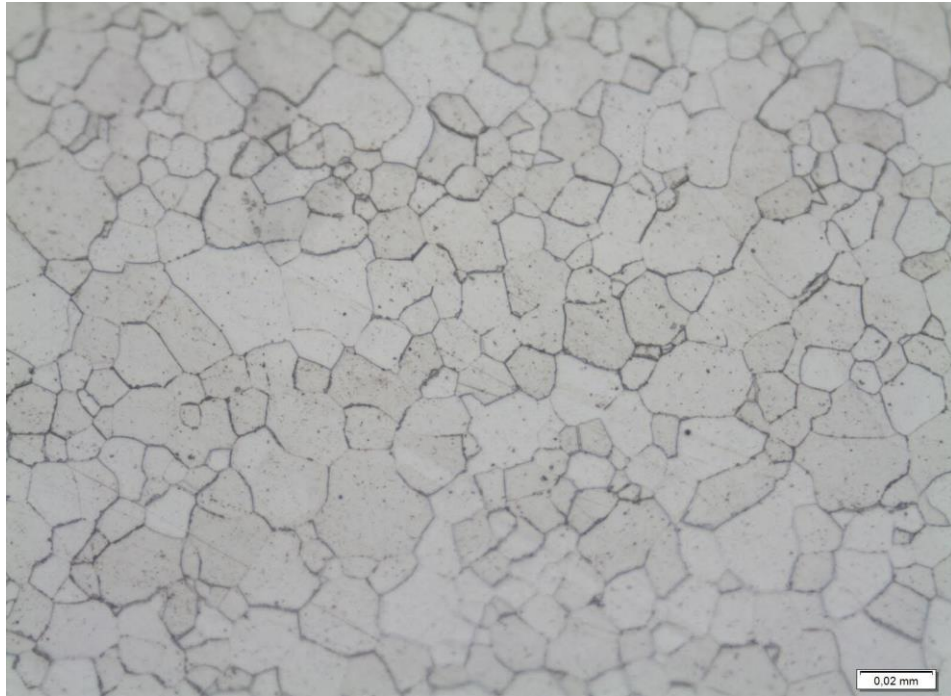
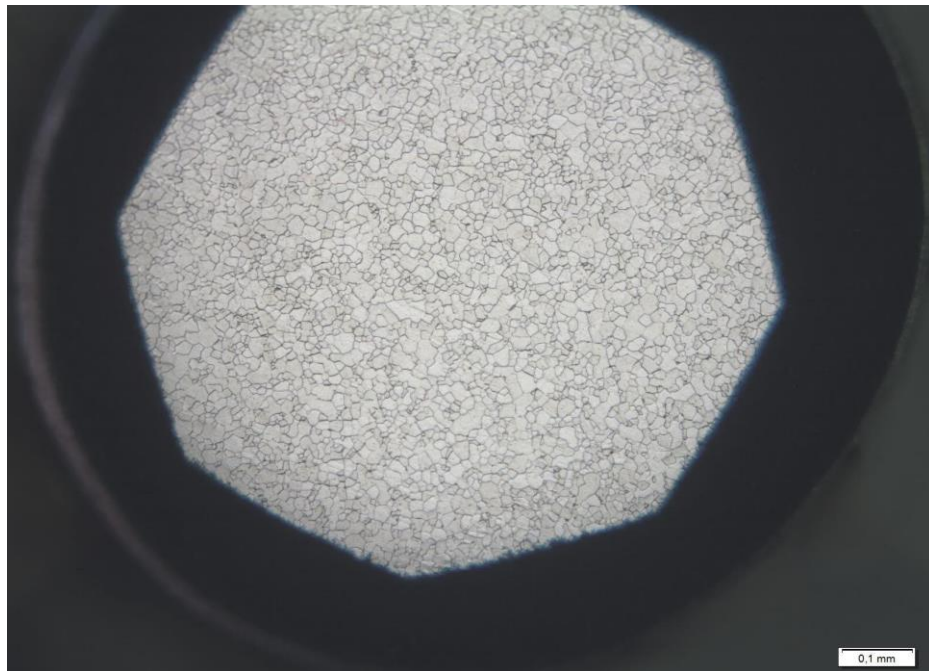


Figura 9 - Amostra recozida no ciclo C – Aumento 500x – Ataque Nital 3% - CP 3.



Fonte: Elaboração própria

Figura 10 - Amostra recozida no ciclo C - Aumento 100x - Ataque Nital 3% - CP 3.

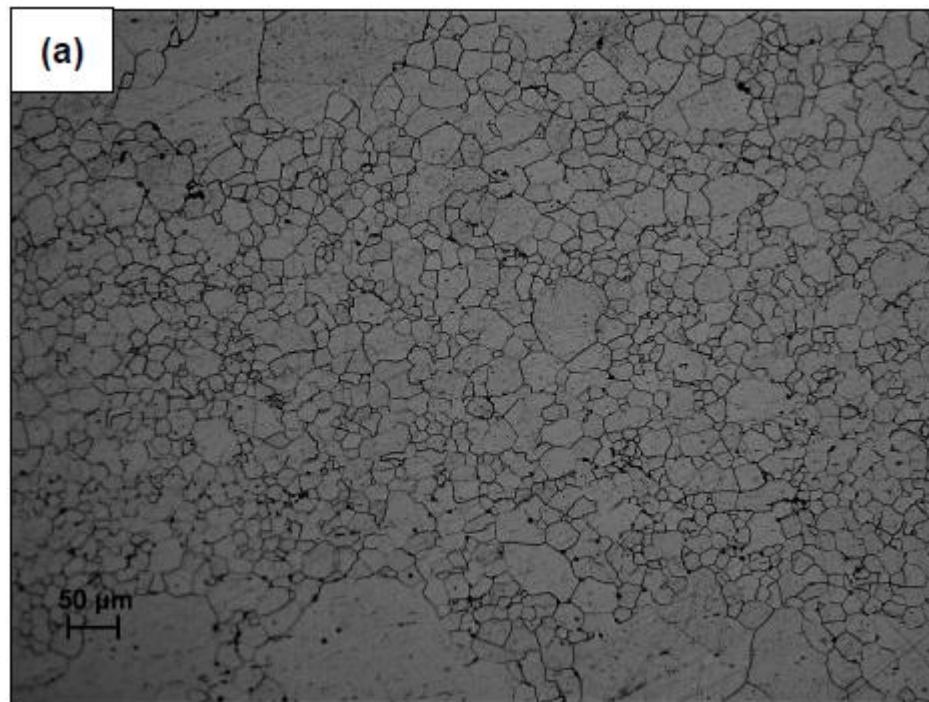


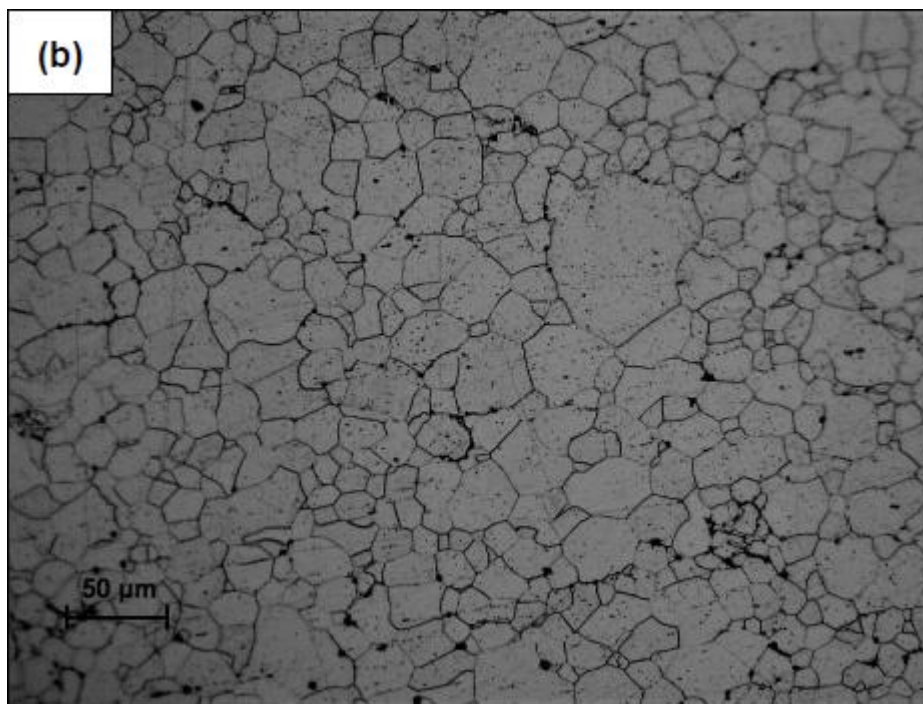
Fonte: Elaboração própria

A segunda análise foi embasada na distribuição uniforme dos grãos, que pode ser representada pelo menor desvio padrão. A distribuição uniforme dos grãos pode estar relacionada com as variáveis de controle utilizadas no processo de recozimento com o forno industrial. O experimento laboratorial, não permitia a homogeneização completa do material devido a inexistência da atmosfera inerte pela utilização do gás nitrogênio

Na Figura 8 é possível comparar a distribuição uniforme dos grãos para o CP retirado do teste no ciclo C, em relação a Figura 9 recozida no Grupo 1 dos ensaios laboratoriais em forno mufla. Tal comportamento pode ser comprovado com os resultados de desvio padrão de tamanhos de grãos salientados na Tabela 6 e 7..

Figura 11 - Amostra recozida a 740°C - Ataque Nital 3% (a) com aumento 125x. (b) com aumento de 250x.





Fonte: Oliveira, 2019

6. CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos para os três ciclos de tratamento térmico propostos se mostraram eficazes em relação aos parâmetros pré-estabelecidos de propriedades mecânicas, levando em consideração a norma NBR 5589:2012, que tem como referência 55kgf/mm^2 o valor máximo de LRT.
- Para o ciclo A o resultado de LRT médio foi $33,74 \pm 2,11 \text{ kgf/mm}^2$, para o ciclo B foi $34,47 \pm 0,64 \text{ kgf/mm}^2$ e para o ciclo C foi de $31,12 \pm 2,61 \text{ kgf/mm}^2$.
- Inicialmente haviam-se proposto apenas dois ciclos (A e B) para realização dos testes, sendo o ciclo A utilizado anteriormente pelo processo e o ciclo B com alterações significativas. Porém devido a uma necessidade não prevista, foi proposto um terceiro ciclo C. Nos 3 ciclos varia-se além da temperatura média por zona ($^{\circ}\text{C}$), a velocidade (m/h) da carga entre as zonas de processamento térmico.
- Apesar do ciclo B ter sido aprovado com seu baixo valor de LRT e atender às especificações do produto, foi observado que no longo prazo o aumento da velocidade dificulta a homogeneização das zonas de tratamento térmico do forno, resultando em instabilidade e variação de propriedades mecânicas, o que o torna inviável do ponto de vista de processo.

- O ciclo C foi aprovado para uso industrial, mantendo um ganho em redução de tempo equivalente a 8,57% em relação ao ciclo antigo (ciclo A). Isso equivale em volume de produção a um ganho de 9,37%.

7. REFERÊNCIAS

ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED-HILL, R.E.; Principles of Physical Metallurgy. CL-Engineering; 4 Edition, 2010.

ASM (American Society of Metals). Heat Treating. Metals Handbook. Vol. 4, 9ª Edição, 1981.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5589 – Arames de aço baixo teor de carbono – Requisitos, 2012.

BRASIL, AÇOS. Estatística Preliminar. Instituto Aços Brasil. Nº 054. 2019.

CALLISTER, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 8ª edição, 2012.

CHIAVERINI, V.; Aços e Ferros Fundidos. 6º Edição, 1990.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica Volume II. 2ª ed. SP, Brasil: McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. Tratamento Térmico das Ligas Metálicas. São Paulo: Abm - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPAERT, Hubertus; SILVA, André Luiz V. da Costa e. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

DIETER, G. E.; Metalurgia Mecânica. 2º Edição, 1981.

EDER, Alexandre Ernesto. Influência do Teor de Nitrogênio na Trefilação do Aço Equivalente ao ABNT 1013. 2006. 69 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GERBASE FILHO, José. Método de Medição de Força de Trefilação de Arames: Avaliação da Variação da Força de Atrito em Trefilação de Arames de Aço. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1976.

GERDAU. Apostila TRE 008 – Preparação Superficial. 2007

GERDAU; Catálogo Construção Civil. 2019. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/arames-recozido>>. Acesso em: 29/10/2019.

NEUBAUER, T. An empirical study about the status of business process management. Business Process Management Journal, v.15, n. 2, p. 166-83, 2009.

OLIVEIRA, Olívia. Análise do comportamento microestrutural e das propriedades mecânicas de aços baixo carbono submetidos a diferentes temperaturas de recozimento. Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2019.

RODRIGUES, Ricardo Adornes. Comparativo Entre o Fio Máquina Produzido com Aço SAE 1005 e SAE 1405 Modificados Para Produção De Arames Recozidos. 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, André Luiz C.; MEI, Paulo R. Aços e Ligas Especiais. 2ª ed. SP, Brasil: Eletrometal S.A Metais Especiais, 1988.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO. Manual de normalização de trabalhos acadêmicos. Biblioteca da Escola de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. 2. ed. - Guarulhos: Biblioteca da Escola de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, 2012.

WORLDSTEEL.; World Steel in Figures 2018. Brussels, 2019.