

FÁBIO DOS SANTOS MATHIAS

**Estudo da influência da taxa de redução de área em materiais trefilados na
esferoidização do aço DIN 41Cr4**

Fábio dos Santos Mathias

**Estudo da influência da taxa de redução de área em materiais trefilados na
esferoidização do aço DIN 41Cr4**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP

2019

M431e	Mathias, Fábio dos Santos Estudo da influência da taxa de redução de área em materiais trefilados na esferoidização do aço DIN 41Cr4 / Fábio dos Santos Mathias – Guaratinguetá, 2019. 43 f. : il. Bibliografia : f. 42-43 Trabalho de graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Metais – Tratamento térmico. 2. Microestrutura. 3. Aço de alta resistência. I. Título. CDU 669.018.25
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

FÁBIO DOS SANTOS MATHIAS

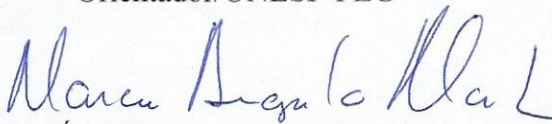
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

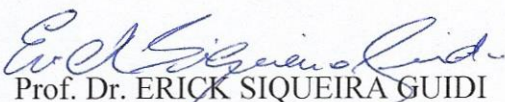
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MÁRCIO AUGUSTO MARTIN
UNESP-FEG


Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG

Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, pela sabedoria, inteligência, perseverança e força dadas a mim.

à minha mãe Cláudia, ao meu pai Antônio e à minha namorada Caroline, que me apoiaram em todos os momentos da minha vida universitária, me encorajaram a lutar pelos meus sonhos, acreditaram em mim e que mesmo distantes permaneceram ao meu lado.

ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva que me orientou, auxiliou e se dedicou para me ajudar a executar este trabalho.

aos meus professores, que me ensinaram dentro e fora da sala de aula e que dedicaram parte de suas vidas à disseminação de conhecimento.

aos funcionários da Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá, pela dedicação, atendimento e excelente trabalho realizado.

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo o estudo da influência da taxa de redução de área no resultado do processo de esferoidização do aço DIN 41Cr4 de materiais trefilados. Foram selecionadas duas linhas de produtos para o presente estudo, a saber: Formac, que representa um material que passa pelo processo de trefila de desbaste (redução de área de 10% à 15%), tratamento térmico de esferoidização e trefila skin-pass (redução de área de aproximadamente 5%), e Calibrado Invertido, que representa um material que passa por um processo de trefila skin-pass e tratamento térmicos. O trabalho elaborado consiste em uma revisão bibliográfica sobre o processo produtivo desses materiais trefilados e suas aplicações, faixa de composição química conforme norma DIN EN 10083-3:2009, tipos de tratamentos térmicos e os fatores que influenciam seus resultados. A avaliação e correlação do parâmetro taxa de redução de área versus grau de esferoidização do material foi realizada através de análise e comparação da microestrutura dos materiais antes da trefilação e após o tratamento térmico. Como conclusão desse estudo são apresentadas algumas considerações e uma equação correlacionando a taxa de redução de área versus grau de esferoidização obtido.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento térmico. Material trefilado. Esferoidização. Microestrutura. Conformação a frio.

ABSTRACT

This work aims to study the influence of the area reduction rate on the result of the spheroidization process of the drawn steel DIN 41Cr4 steel. Two product lines were selected for this study: Formac, which represents a material that goes through the roughing drawing process (area reduction from 10% to 15%), spheroidization heat treatment and skin-pass drawing (approximately 5% reduction in area), and Calibrado Invertido, which represents a material that undergoes a skin-pass drawing process and heat treatment. The study consists of literature review about the production process of these drawn materials and their applications, chemical composition range according to DIN EN 10083-3 revision jan / 2009, types of heat treatments and the factors that influence their results. The evaluation and correlation of the area reduction rate versus material spheroidization rate parameter was made through comparison of the microstructure of the materials before drawing and after the heat treatment. As conclusion of this study some considerations and a equation correlating the area reduction rate versus degree of spheroidization obtained are presented.

KEYWORDS: Heat treatment. Drawn material. Spheroidization. Microstructure. Cold forming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Aplicação de aços especiais em veículos leves.....	12
Figura 2 – Aplicação de aços especiais em veículos agrícolas.....	13
Figura 3 – Aplicação de aços especiais em veículos pesados	13
Figura 4 – Fluxograma de proceso – Usina integrada	14
Figura 5 – Fluxograma de proceso – Usina semi-integrada	15
Figura 6 – Fluxograma de proceso – Usina semi integrada de Pindamonhangaba	16
Figura 7 – Etapas do proceso de conformação do parafuso partindo de um arame	17
Figura 8 – Equipamento de laminação da rosca	17
Figura 9 – Esquema de uma máquina de trefilar com duas feiras.....	19
Figura 10 – Esquema de regiões de uma feira.....	19
Figura 11 – Diagrama de regiões de temperatura para tratamentos térmicos	21
Figura 12 – Amostra exemplo de 41Cr4 esferoidizado (ataque Nital 2%, 500x)	22
Figura 13 – Ciclos térmicos para o processo de esferoidização.	22
Figura 14 – Diagrama de resfriamento contínuo para o DIN 41Cr4.	24
Figura 15 – Diagrama de tempos de esferoidização para espaçamento lamelar fino, médio e grosso em um aço carbono simples eutetóide a 700 ° C.	25
Figura 16 – Comparação entre a esferoidização de um aço carbono e um aço ligado ao cromo.	26
Figura 17 – Efeito de diferentes taxas de deformação na cinética da esferoidização (● 700°C ▲ 650°C).....	28
Figura 18 – Formado de espiras Stelmor para fio máquina.....	29
Figura 19 – Representação do ciclo de tratamento térmico.....	32
Figura 20 - Grau de Esferoidização para o aço COPANT 4140 conforme Norma NBR 14677 (2001)	32
Figura 21 – Microestruturas resultantes após ciclo de esferoidização	36
Figura 22 – Amostra e1 ampliada 1000x com redução de área de 38,81% e GE de 95%.	38
Figura 23 – Amostra g1 ampliada 1000x com redução de área de 3,81% e GE de 60%.....	38
Figura 24 – Relação entre o grau de esferoidização e a redução de área	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapas do processamento na trefila de arames por produto.....	30
Tabela 2 – Especificação da composição do aço 41Cr4.....	31
Tabela 3 – Redução de área (RA) dos materiais analisados.....	33
Tabela 4 – Redução de área (RA) dos materiais analisados.....	35
Tabela 5 – Estimativa de GE [%] em função da RA [%] para arames DIN 41Cr4.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	10
2.1	OBJETIVO GERAL.....	10
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	10
3	JUSTIFICATIVA	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1	FLUXOGRAMA GERAL DE PROCESSO	14
4.2	PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A FRIO DE PARAFUSOS	16
4.3	PROCESSO DE TREFILAÇÃO DOS AÇOS	18
4.4	TRATAMENTO TÉRMICO.....	20
4.4.1	Tratamento térmico de esferoidização.....	21
4.4.2	Ciclos térmicos de esferoidização	22
4.5	FATORES QUE INFLUENCIAM O TRATAMENTO TÉRMICO	23
4.5.1	Efeito de tempo e temperatura	23
4.5.2	Efeito da microestrutura de partida	25
4.5.3	Efeito da adição de cromo ao aço	26
4.5.4	Efeito do trabalho mecânico	26
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
5.1	ROTA DE PRODUÇÃO	29
5.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	30
5.3	CICLO DE TRATAMENTO TÉRMICO	31
5.4	AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO	
	32	
6	RESULTADOS	35
6.1	AVALIAÇÃO DO GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO.....	35
7	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O aço é uma das ligas ferrosas mais utilizadas no mundo. Sua versatilidade de processamento, know-how já consolidado, baixo custo, abundância de matéria prima para sua produção, aliado aos recentes avanços tecnológicos relacionados ao processamento do aço, fornecendo propriedades mecânicas superiores e melhores condições de serviço como resistência a oxidação, desgaste, fadiga etc., são fatores preponderantes a sua escolha em projetos que visam melhor custo-benefício.

A produção de aço até o mês de setembro de 2019 acumula um volume de 24,6 milhões de toneladas, o que reforça sua importância como matéria prima versátil e amplamente utilizada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, 2019).

Sua correta aplicação depende de conhecimentos relacionados as suas características metalográficas, mecânicas, processos de fabricação bem como sua composição química e efeitos de seus elementos de liga e tratamentos térmicos.

Para a aplicação na indústria automotiva se faz necessário o domínio técnico para alcançar um desempenho diferenciado do material aliado a um menor custo de fabricação. As aplicações no setor automotivo são diversas como por exemplo, elementos de fixação, feixes de mola, molas helicoidais, engrenagens, esferas e roletes de rolamentos, barras de direção, virabrequins etc. segundo normas nacionais e/ou internacionais em acordo com as necessidades de projeto e do cliente.

Dentro desse contexto, a influência da redução de área e suas características na estrutura do material que passou pelo processo de trefila, no resultado obtido após o processo de esferoidização foi avaliada nesse trabalho. A proposta compreende uma análise da relação em amostras recentes de resultados do grau de esferoidização e sua taxa de redução de área, levando em conta um mesmo processo produtivo desde a aciaria, laminação a quente, ciclo e tipo de forno de tratamento térmico.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um comparativo prático dos resultados obtidos no processo de tratamento térmico de esferoidização do aço 41Cr4 após serem submetidos a diferentes percentuais de redução de área.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estudar a influência do trabalho a frio em materiais esferoidizados;
- Determinar uma tabela de correlação entre a taxa de redução do material trefilado e o resultado obtido pelo tratamento térmico.

3 JUSTIFICATIVA

A indústria brasileira tem se mostrado bastante competitiva e novos competidores do cenário mundial têm entrado no mercado brasileiro por diversos motivos, entre eles a sobretaxação dos aços importados pelos Estados Unidos e o grande volume de produção de países como a China. Nessa situação, a qualidade e preço se tornam cada vez mais críticos para o sucesso das siderúrgicas nacionais. A fim de conquistar ou manter sua parcela de participação no mercado, as indústrias têm buscado a estabilização, otimização e simplificação de seus processos.

O aço e suas ligas têm ampla utilização na indústria automotiva, com fornecimento de aço para fabricação de componentes e peças para o mercado nacional e internacional. A aplicação para a indústria automotiva exige um desempenho diferenciado do material para suas diversas aplicações como: bielas, virabrequins, barras estabilizadoras, fixadores em geral etc.

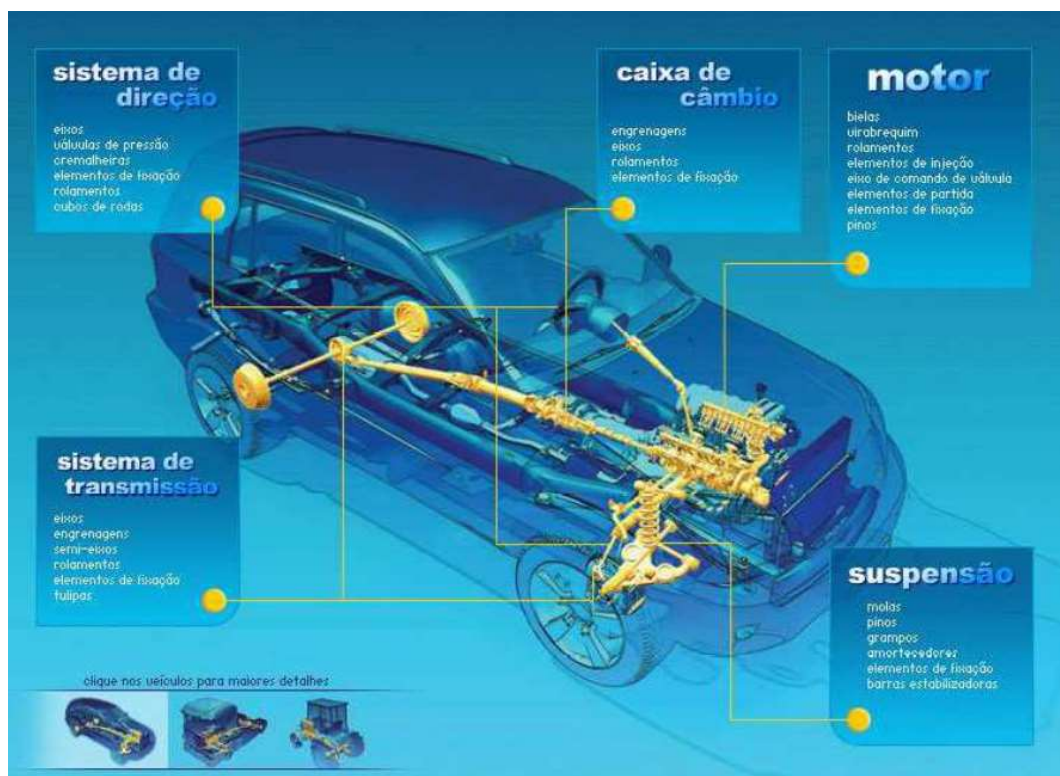
Normalmente, os aços em seu estado bruto de laminação não atendem a essa gama de aplicações. Para tal, suas propriedades devem ser melhoradas e otimizadas pelos mais variados tratamentos térmicos, como o de esferoidização, para a adequação a aplicação final. O sucesso do tratamento térmico depende de vários fatores como composição química, microestrutura de partida, trabalho mecânico/encruamento prévio, curvas e temperatura de aquecimento e resfriamento etc.

O tratamento térmico agrega valor ao produto, mas, em geral, é um processo demorado, impactando no tempo de entrega e diminuindo a margem para erros. Portanto, deseja-se entender melhor a relação entre o trabalho mecânico prévio ao tratamento térmico e o resultado de esferoidização obtido, com um viés prático em escala industrial para que o tratamento térmico possa atender as especificações durante o seu primeiro processamento, evitando retrabalhos e impactos em custo e tempo de entrega.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

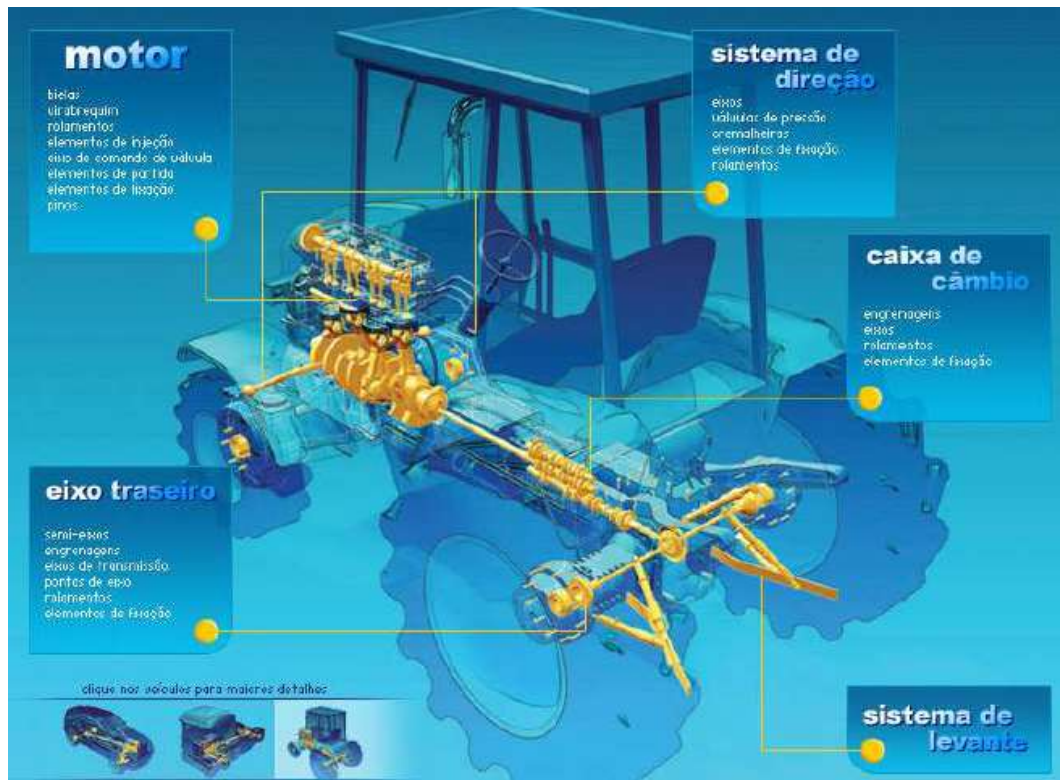
O aço é um material versátil que é empregado em diversas aplicações como por exemplo feixes de mola, fixadores automotivos, componentes de torres eólicas, flanges, de aplicações simples a mais complexas em diversos setores (figuras 1, 2 e 3). As diferentes propriedades mecânicas e microestruturas a que se pode chegar com o aço é um dos fatores que permitem que o aço seja tão competitivo juntamente ao seu custo. Para tal, temos diversos processos mecânico, como a trefilação, e processos de tratamento térmicos que consistem em atingir patamares de aquecimento e resfriamento visando alterar ou melhorar uma ou mais característica do aço. Esses fatores serão apresentados e aprofundados neste capítulo.

Figura 1– Aplicação de aços especiais em veículos leves



Fonte: Viana (2009).

Figura 2 – Aplicação de aços especiais em veículos agrícolas



Fonte: Viana (2009).

Figura 3 – Aplicação de aços especiais em veículos pesados

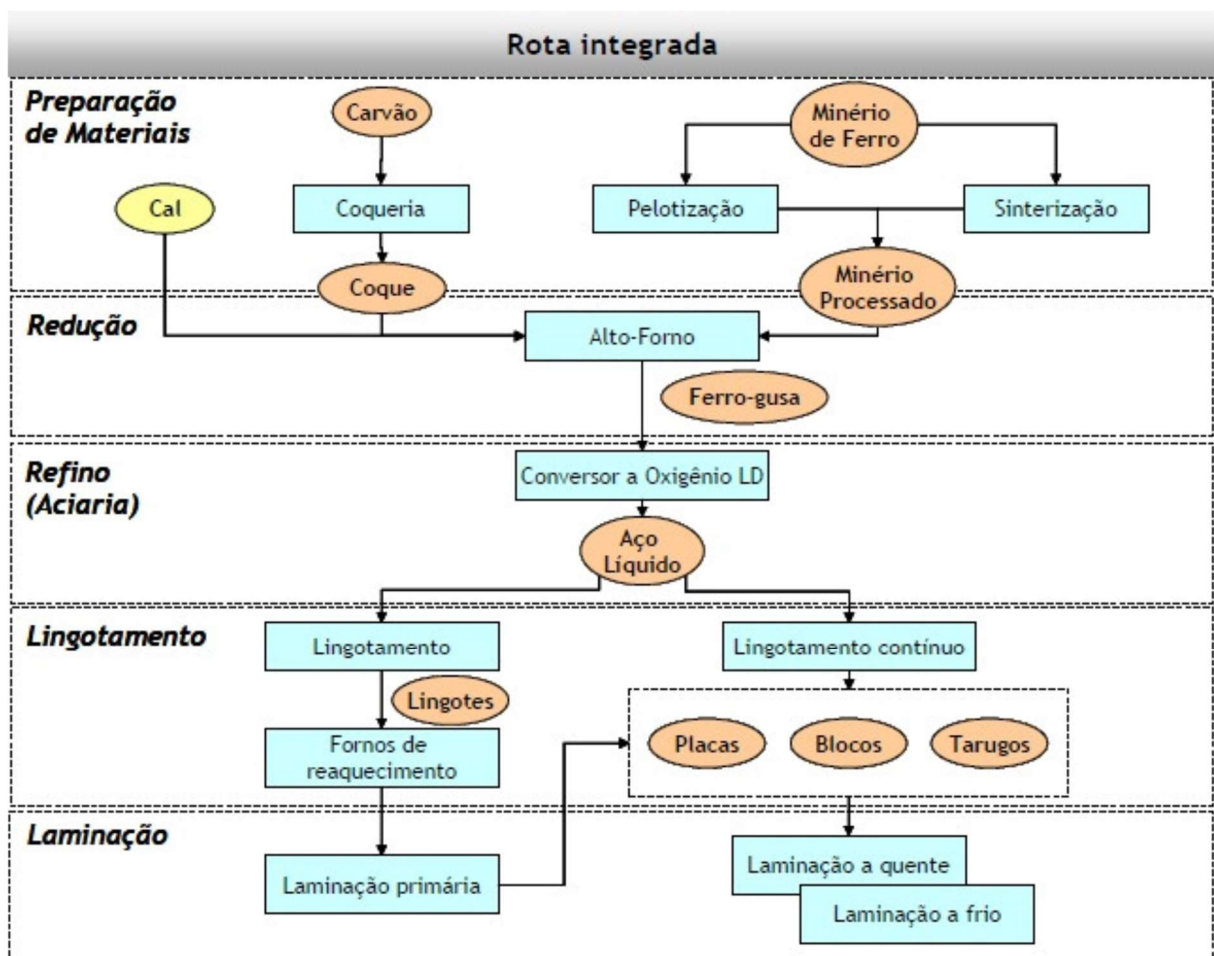


Fonte: Viana (2009).

4.1 FLUXOGRAMA GERAL DE PROCESSO

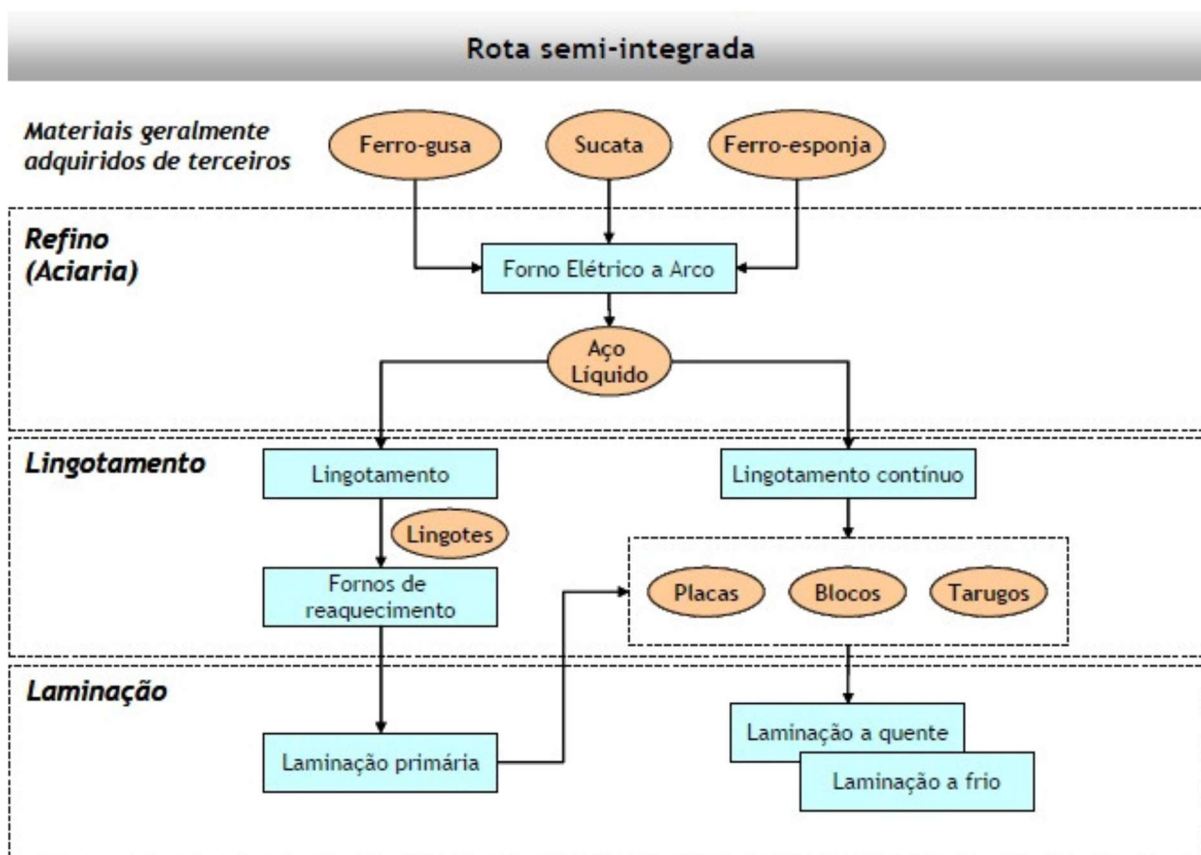
Para Caldas (2011 apud EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009), a diferença entre uma usina integrada e uma semi-integrada é o fato de a usina integrada utilizar como matéria-prima minério de ferro e carvão, de acordo com a figura 4, e a usina semi-integrada utilizar sucata, ferro gusa e ferro-esponja, de acordo com a figura 5.

Figura 4 – Fluxograma de proceso – Usina integrada



Fonte: Caldas (2011) Apud Empresa de Pesquisa Energética (2009).

Figura 5 – Fluxograma de processo – Usina semi-integrada



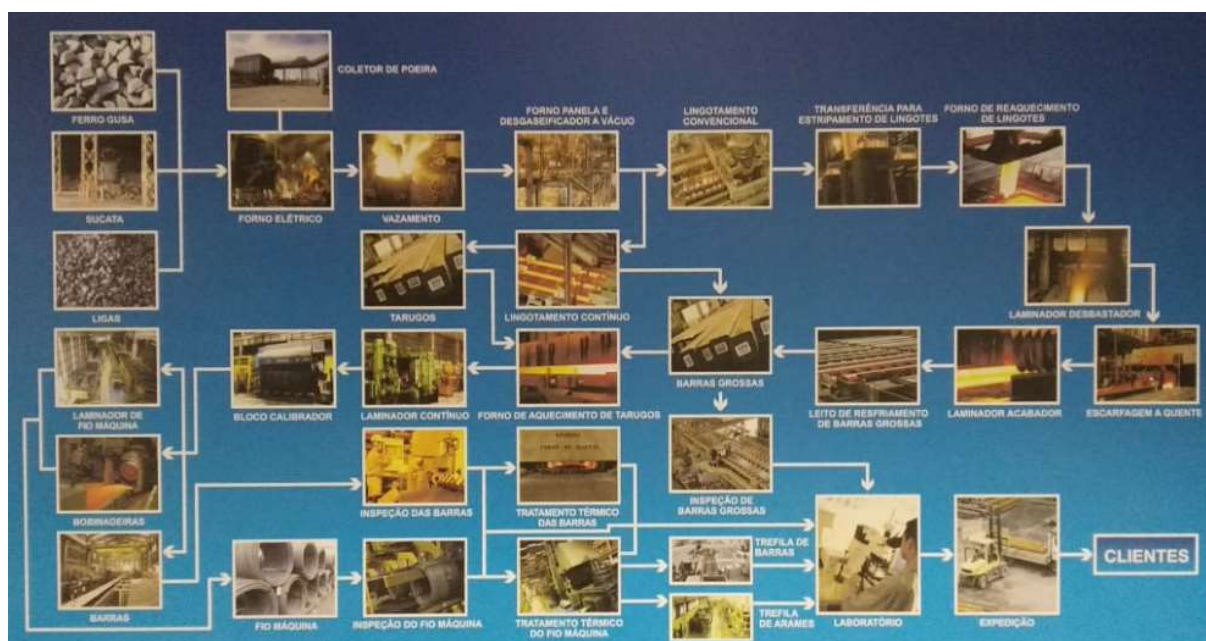
Fonte: Caldas (2011) Apud Empresa de Pesquisa Energética (2009).

Para o caso do presente estudo, o material é processado no Forno Elétrico a Arco partindo de uma carga fria de sucata metálica (sucata de retorno, obsolescência etc.) de aproximadamente 90% do peso da carga e adições de cal, elementos de ligas e gusa, completando os outros 10% da carga. Na sequência, há o processo de ajuste de ligas/refino secundário no Forno Panela e desgaseificação a vácuo, reduzindo conteúdo de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio do aço líquido. No processo seguinte, lingotamento contínuo, o aço líquido é solidificado na forma de tarugos com lado de 155 mm e esmerilhados para retirada de defeitos superficiais. Em seguida, no processo de laminação, o material é reaquecido no forno de encharque e laminado na rota Garret (para bitolas acima de 23,81 mm e sem resfriamento controlado) ou na rota do Bloco Laminador (para bitolas abaixo de 23,81 mm e com resfriamento controlado) e o produto de saída é o que chamamos de Fio Máquina. O Fio Máquina pode ser vendido direto ao cliente ou passar por um processo de tratamento térmico e/ou conformação a frio, trefilação. Tem-se a possibilidade de trefilar em barras ou bobinas de arames. Os arames podem seguir três rotas distintas: Arame Calibrado, que passa por um processo de tratamento térmico na etapa do Fio Máquina e na sequência a trefilação skin pass

(redução de área de 5% à 10%); Arame Calibrado Invertido, que passa pelo processo de trefilação de desbaste (redução de área de 10% à 15%) e posterior tratamento térmico na etapa do arame; e Arame Formac, que passa por um processo de trefilação de desbaste (redução de área de 15% à 20%), tratamento térmico na etapa do arame e um segundo passe de trefila skin pass.

A figura 6 mostra o fluxograma da usina de aços especiais localizada na cidade de Pindamonhangaba, a qual é uma usina semi-integrada.

Figura 6 – Fluxograma de proceso – Usina semi integrada de Pindamonhangaba



Fonte: Usina Semi-integrada de Pindamonhangaba (2019).

4.2 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A FRIO DE PARAFUSOS

Uma das aplicações do arame trefilado é na fabricação de fixadores para o setor automotivo. O arame passa por dois processos de conformação: forjamento a frio da cabeça do fixador e laminação a frio dos filetes que, segundo Bussoloti (2014), garante um aumento da vida em fadiga do fixador em comparação a um material de filete usinado.

De acordo com Galdino (2015 apud BUENO, 2012), o processo de fabricação do fixador pode ser resumido entre 4 e 5 etapas:

- 1) Corte e endireitamento do arame;

- 2) Conformação da cabeça;
- 3) Extrusão que prepara a região onde a rosca será laminada;
- 4) Laminação da rosca;
- 5) Corte ou não da cabeça do parafuso.

Figura 7 – Etapas do processo de conformação do parafuso partindo de um arame



Fonte: Galdino (2015) Apud Bueno (2012).

A figura 8 ilustra o equipamento de laminação da rosca. À esquerda um processo manual com rolos e à direita o processo automático com pentes.

Figura 8 – Equipamento de laminação da rosca



Fonte: Bussoloti (2014) Apud Metaltork (2013).

4.3 PROCESSO DE TREFILAÇÃO DOS AÇOS

Segundo Filho Bresciani *et al.* (2011), o processo de trefilação consiste em um processo de deformação a frio no qual o fio máquina, ou barra ou tubo, passa por uma ferramenta (fieira) que contém um furo decrescente em seu centro, apresentando um formato de funil.

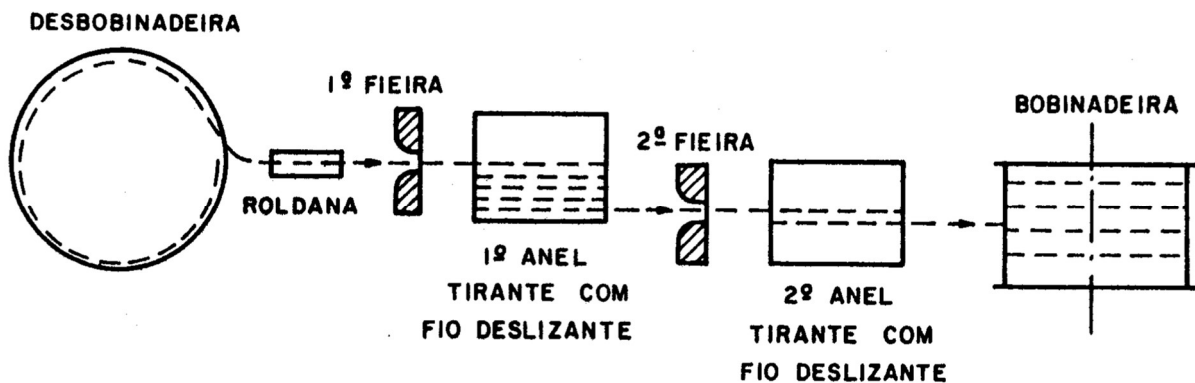
O material resultante apresenta uma seção transversal menor do que a de partida e é chamado comumente de arame para o material em estudo. Essa operação de redução de área geralmente é realizada a frio, ou seja, abaixo da temperatura de recristalização do material. O arame resultante apresenta uma perda de ductilidade, um aumento na resistência mecânica e propriedades mecânicas desejadas juntamente (FILHO BRESCIANI *et al.*, 2011) com uma qualidade superficial e tolerância dimensional melhoradas em relação ao fio máquina.

Não raramente, faz-se necessário um processo de recozimento do material antes, entre ou após os passes de trefilação para que seja possível impor ao material mais trabalho mecânico ou para atingir as propriedades desejadas. Para os materiais do presente estudo, o Arame Calibrado Invertido recebe tratamento térmico após passe de trefilação, permitindo que o cliente submeta o material a processos adicionais de conformação a frio ou o Arame Formac que recebe tratamento térmico antes do passe acabador ou skin pass e normalmente não passa por nova redução de área no cliente.

O equipamento de trefilação utilizado na Usina de Pindamonhangaba é uma máquina de trefilar com deslizamento, com uma ou duas fieiras. Essas máquinas apresentam os seguintes princípios de funcionamento (FILHO BRESCIANI *et al.*, 2011):

- 1) O Fio parte da desbobinadeira, passando por uma roldana e se dirige em direção à primeira fieira;
- 2) Na saída da fieira, o fio é tracionado por um anel tirante. O número de voltas no anel tirante é em função da força de atrito necessário para atingir a força de trefilação. O tipo do equipamento vem do fato de o fio deslizar longitudinalmente ao longo do anel tirante até que seja direcionado a outra fieira;
- 3) O fio adquire um ganho de velocidade devido ao aumento de seu comprimento. O anel tirante seguinte ou a rotação da bobinadeira devem compensar esse ganho de velocidade. O processo se repete por quantas forem as fieiras.

Figura 9 – Esquema de uma máquina de trefilar com duas fieiras



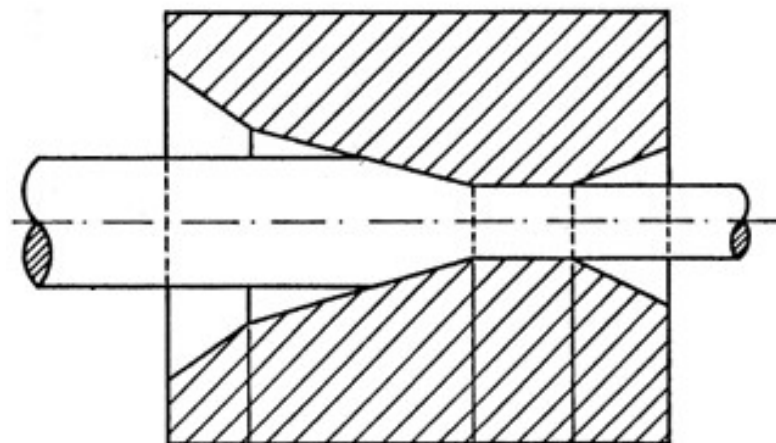
Fonte: Filho Bresciani *et al.* (2011).

Um segundo fator extremamente importante para o processo de trefilação é a fieira, a qual impacta diretamente na qualidade final do produto.

Pode ser dividida em quatro regiões distintas:

- Região de entrada, responsável por o fio máquina em sua entrada na fieira;
- Região de trabalho, onde ocorre o forjamento a frio com a redução de área;
- Região de calibração, onde o material tem seu diâmetro ajustado. Quando mais apertada a tolerância do material, melhor deve ser a usinagem dessa região;
- Região de saída, onde ocorre a saída do material da fieira. Deve ser aberto o suficiente para que não cause nenhuma marca ao material trefilado.

Figura 10 – Esquema de regiões de uma fieira



Fonte: Filho Bresciani *et al.* (2011).

De modo geral, a fieira deve permitir a trefilação de grandes quantidades de material sem perder o ajuste dimensional, trefilando na maior velocidade possível para aumento de produtividade e a obtenção de uma superfície lisa e brilhante ao longo de todo o arame.

Segundo Filho Bresciani *et al.* (2011), o material trefilado sofre um processo de aumento de sua resistência mecânica e redução de sua ductilidade devido à deformação plástica sofrida, denominada encruamento. Uma condição de encruamento acentuado pode tornar o material frágil, impossibilitando processos posteriores. É melhor o processamento do material em vários passes de fieira com baixa redução de área que uma alta redução em um único passe, causando regiões com diferentes graus de encruamento dentro do material, ou seja, um material menos homogêneo e com possibilidade de trinca interna.

Por fim, os arames geralmente são submetidos ao processo de tratamento térmico que deve ser escolhido criteriosamente pois, em geral, a melhora de uma ou mais propriedades vem em detrimento da piora de outras. Deve-se, portanto, ter bem claro as condições de aplicação final para que possam atingir características mecânicas e metalúrgicas favoráveis à sua utilização.

4.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é um conjunto de parâmetros controlados de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento com o objetivo de alterar sua microestrutura, impactando diretamente em suas propriedades (CHIAVERINI, 1996).

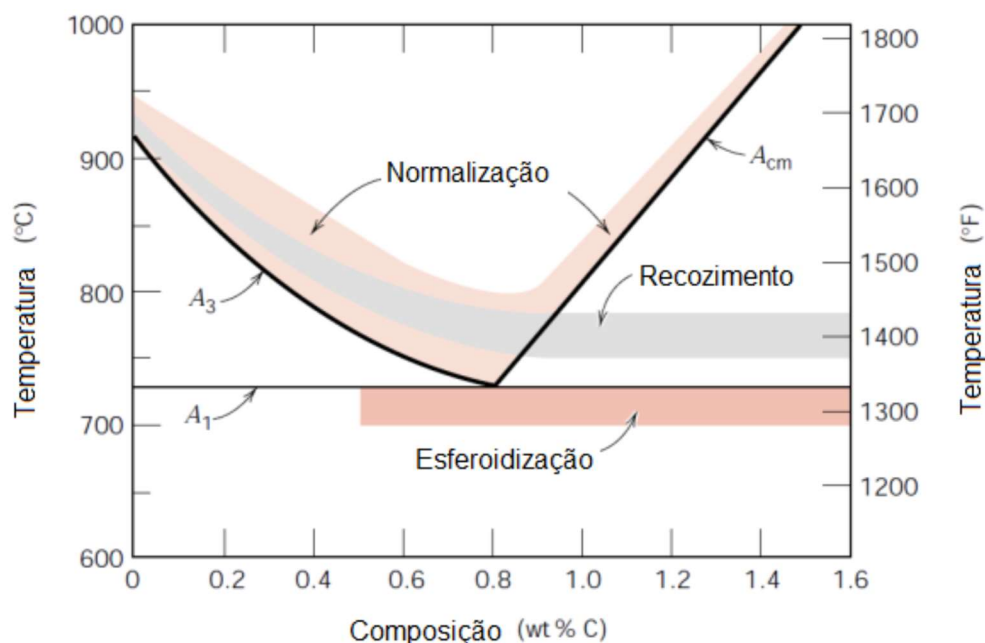
Segundo Chiaverini (1996), os principais objetivos dos tratamentos térmicos são:

- Remoção de tensões residuais;
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Melhora da resistência mecânica;
- Melhora de usinabilidade;
- Aumento da resistência ao desgaste e corrosão.

Os tratamentos térmicos mais usuais são os de têmpera, revenimento, normalização e esferoidização. São utilizados também tratamentos termoquímicos como cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação etc. Para esse trabalho, vamos aprofundar nos conceitos

da esferoidização, também conhecido como coalescimento. A figura 11 ilustra as regiões de temperatura de trabalho para alguns tratamentos térmicos.

Figura 11 – Diagrama de regiões de temperatura para tratamentos térmicos



Fonte: Callister (2005).

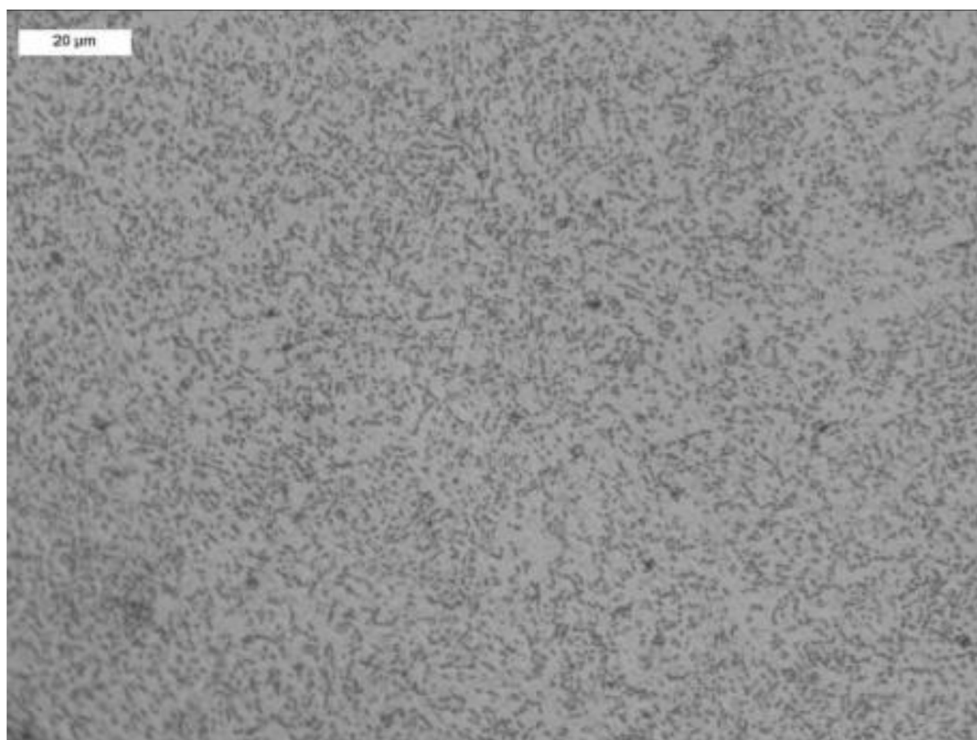
4.4.1 Tratamento térmico de esferoidização

O tratamento térmico de esferoidização tem como objetivo melhorar a usinabilidade do material e sua capacidade de conformação a frio. Ele consiste em aquecer a liga até temperatura logo abaixo ou logo acima da temperatura eutetóide, na região da ferrita + cementita (Fe_3C), seguido de um resfriamento controlado. Se a microestrutura de partida for perlita, então o tempo de esferoidização deverá variar entre quinze e vinte e cinco horas (BECKER, 2012).

Este é um processo de modificação da microestrutura, que ocorre através de energia superficial, através da evolução microestrutural da perlita pelo mecanismo de coalescimento, com a formação de carbeto globulares em uma matriz ferrítica. Tem-se elevada energia no contorno das partículas de cementita lamelar devido à sua relação superfície por unidade de volume muito grande. Para reduzir esse estado de alta energia para um estado mais estável de menor energia, as lamelas de cementita tendem a se dividir em partículas menores que eventualmente assumem forma esférica (FAGUNDES, 2006).

A formação dessas partículas esféricas tem papel determinante no resultado de propriedades mecânicas dos materiais médio carbono, conforme pode ser observado na figura 12.

Figura 12 – Amostra exemplo de 41Cr4 esferoidizado (ataque Nital 2%, 500x)

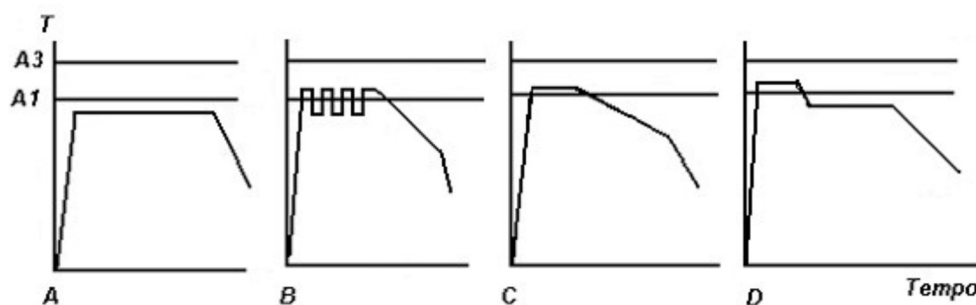


Fonte: Becker (2012).

4.4.2 Ciclos térmicos de esferoidização

De acordo com Fagundes (2006), para se obter o estado esferoidizado do material, pode-se proceder das seguintes formas, conforme figura 13 abaixo:

Figura 13 – Ciclos térmicos para o processo de esferoidização.



Fonte: Fagundes (2006).

a) Recozimento subcrítico: O material é aquecido até uma temperatura abaixo da temperatura eutetóide (15 °C a 30°C) e mantido por um longo período com posterior resfriamento até a temperatura ambiente. Nesse caso não há mudança de fase;

b) Recozimento cíclico: O material tem a sua temperatura alternada diversas vezes ao longo do seu ciclo de tratamento térmico em torno da temperatura eutetóide e seguido de resfriamento lento. Quando a temperatura fica acima da eutetóide, os carbeto mais finos se dissolvem e quando a temperatura fica abaixo da eutetóide, acontece a precipitação da cementita que não se dissolveu;

c) Resfriamento controlado: Consiste em aquecer o material a um patamar de 10°C a 30°C acima da temperatura eutetóide, seguido de um resfriamento controlado de aproximadamente 5-10°C/h. Nesse caso, ocorre a dissolução incompleta da cementita que durante o resfriamento atuam como pontos de nucleação;

d) Recozimento isotérmico: realizado através do aquecimento do material na zona crítica, mantendo por curto período de tempo o material nesse patamar e resfriando até um patamar de temperatura ligeiramente abaixo da eutetóide (de 10 °C a 30°C) e mantendo até que se tenha a completa transformação da austenita e o coalescimento da cementita (duração de 4h a 8h) com posterior resfriamento até a temperatura ambiente.

4.5 FATORES QUE INFLUENCIAM O TRATAMENTO TÉRMICO

4.5.1 Efeito de tempo e temperatura

Para Chiaverini (1996), os fatores que devem ser considerados inicialmente são: aquecimento, tempo de permanência a temperatura e seu resfriamento assim como a atmosfera no qual o material foi tratado.

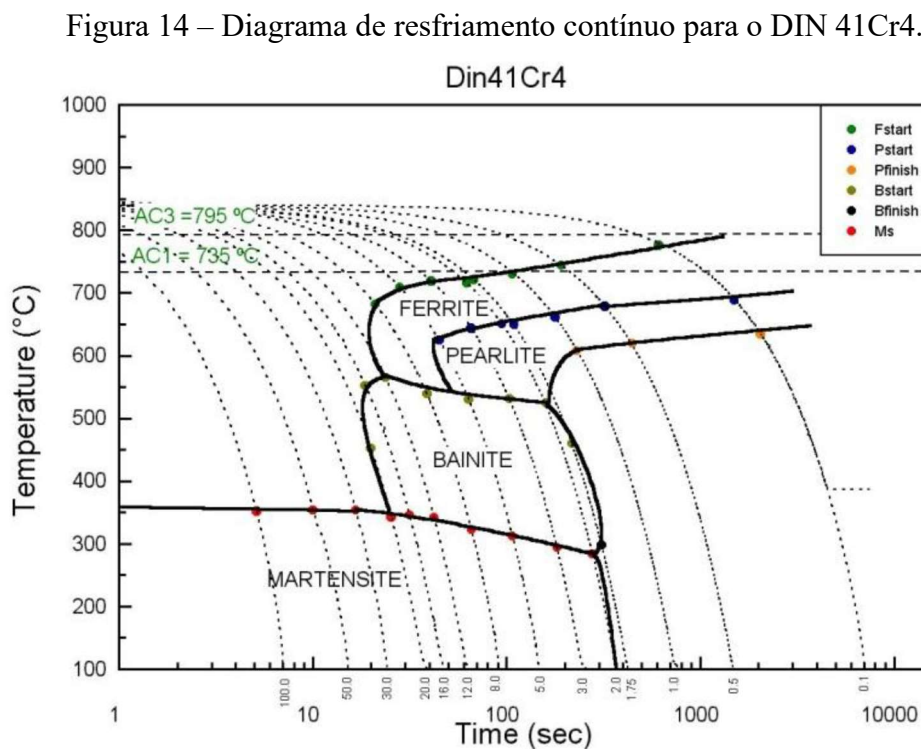
A influência desses fatores pode ser descrita como:

- Aquecimento: normalmente relacionado a uma mudança de microestrutura. Sendo assim, é comum que o tratamento térmico seja realizado a temperaturas acima da temperatura crítica, onde se tem a completa austenitização do material, sendo este o ponto de partida para transformações de microestrutura posteriores. A temperatura é mais ou menos um fator fixo, dependendo da microestrutura e propriedades finais desejadas. Quanto mais alta a temperatura, maior a segurança de dissociação das outras fases na austenita; por outro lado, maior o crescimento do grão de austenita. Em geral, as desvantagens de um tamanho de grão excessivo são maiores do que a

não dissolução completa de outros elementos na austenita. Portanto, deve-se evitar temperatura muito acima da temperatura de austenitização, visando um máximo de 50°C acima da linha A3 no diagrama Fe-C para aços hipoeutetóides e temperaturas inferiores a Acm para hipereutetóides;

- Tempo de permanência a temperatura: o tempo no qual o material permanece na temperatura tem influência parecida com a temperatura de aquecimento. Quanto maior o tempo de permanência a temperatura de austenitização, maior a dissolução das fases na austenita e maior o crescimento de grão. Por esse motivo, procura-se evitar tempos prolongados que além do efeito de crescimento de tamanho de grão resulta em oxidação ou decarbonetação do material. Admite-se que uma temperatura ligeiramente mais elevada traz mais resultados do que o efeito de manter o material em uma temperatura por mais tempo;
- Resfriamento: esse é o fator determinante para a microestrutura e propriedades finais do material. Influenciam na escolha do meio de resfriamento a forma da peça, composição química, profundidade desejada da microestrutura, empenamento do material e fissuras que podem resultar de esfriamento abrupto do material. Abaixo segue a figura 14, a qual mostra o diagrama de resfriamento contínuo para o DIN 41Cr4. (CHIAVERINI, 1996)

A figura 14 ilustra o diagrama de resfriamento contínuo para o DIN 41Cr4.

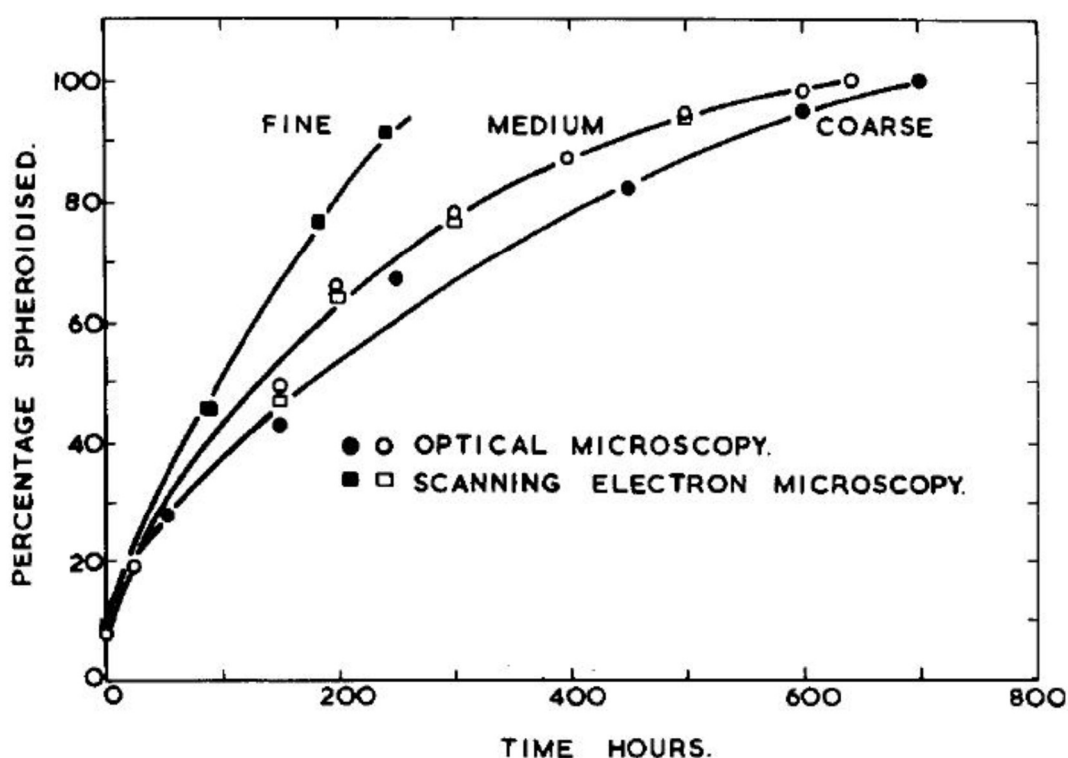


Fonte: Becker (2012).

4.5.2 Efeito da microestrutura de partida

De acordo com Becker (2012), a microestrutura de partida é outro fator relevante. A microestrutura padrão para a maioria dos aços laminados a quente é uma estrutura de ferrita mais perlita fina o que é mais favorável ao processo de esferoidização do que uma estrutura com perlita grosseira (FAGUNDES, 2006). Schaneman (2009 apud CHATTOPADHYAY; SELLARS, 1982) mostra a diferença de tempo para de esferoidização para diferentes microestruturas de perlita, conforme figura 15.

Figura 15 – Diagrama de tempos de esferoidização para espaçamento lamelar fino, médio e grosso em um aço carbono simples eutetóide a 700 ° C.



Fonte: Schaneman (2009) Apud Chattopadhyay; Sellars (1982).

Para Fagundes (2006 apud ROCHA, 2000) uma característica que acelera o processo de esferoidização é a presença de estrutura bainíticas e/ou martensíticas, devido a uma fina distribuição de carbeto nessas estruturas, servindo de sítios para o coalescimento.

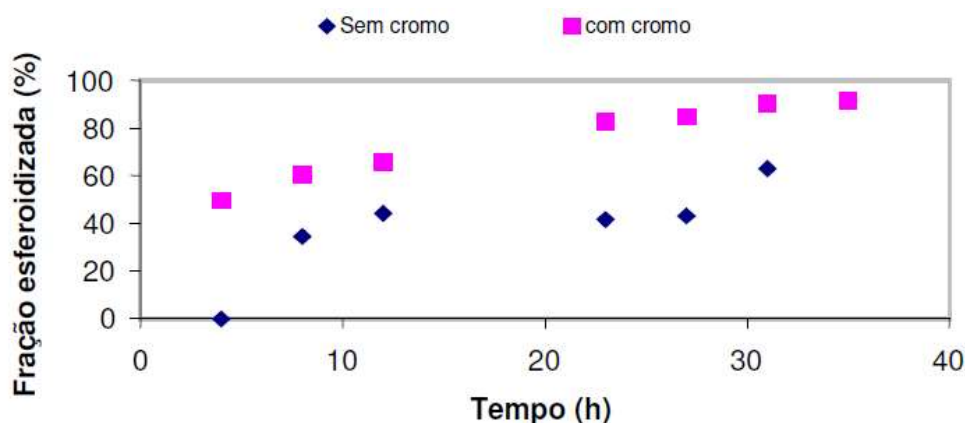
Schaneman (2009 apud KARADENIZ, 1982) comparou a esferoidização de uma amostra do aço AISI 4140 normalizado, partindo com microestrutura perlítica em relação a uma amostra

do mesmo aço, partindo com uma microestrutura martensítica. O aço martensítico apresentou a formação mais rápida de esfera de carbeto e em maior quantidade do que a amostra normalizada.

4.5.3 Efeito da adição de cromo ao aço

Fagundes (2006 apud COUTINHO, 1990) mostra um teste comparativo entre um aço carbono e um aço ligado ao cromo, mostrando o efeito do cromo no resultado de esferoidização, conforme figura 16.

Figura 16 – Comparação entre a esferoidização de um aço carbono e um aço ligado ao cromo.



Fonte: Fagundes (2006) Apud Coutinho (1990).

Fica evidente que a adição de cromo influencia no resultado da esferoidização.

4.5.4 Efeito do trabalho mecânico

A deformação plástica do material pode ocorrer de quatro maneiras distintas: deslizamento de planos cristalinos causados por movimentação de discordâncias, maclação mecânica, difusão e transformação de fases acompanhadas de grande variação de volume (PADILHA; SICILIANO, 2005).

Durante a deformação plástica, ocorrem alguns eventos importantes:

- Os grãos mudam de forma;

- A orientação dos grãos muda, geralmente com uma orientação preferencial;
- A área dos contornos de grão por unidade de volume aumenta;
- Variam as quantidades de defeitos puntiformes e discordâncias por unidade de volume.

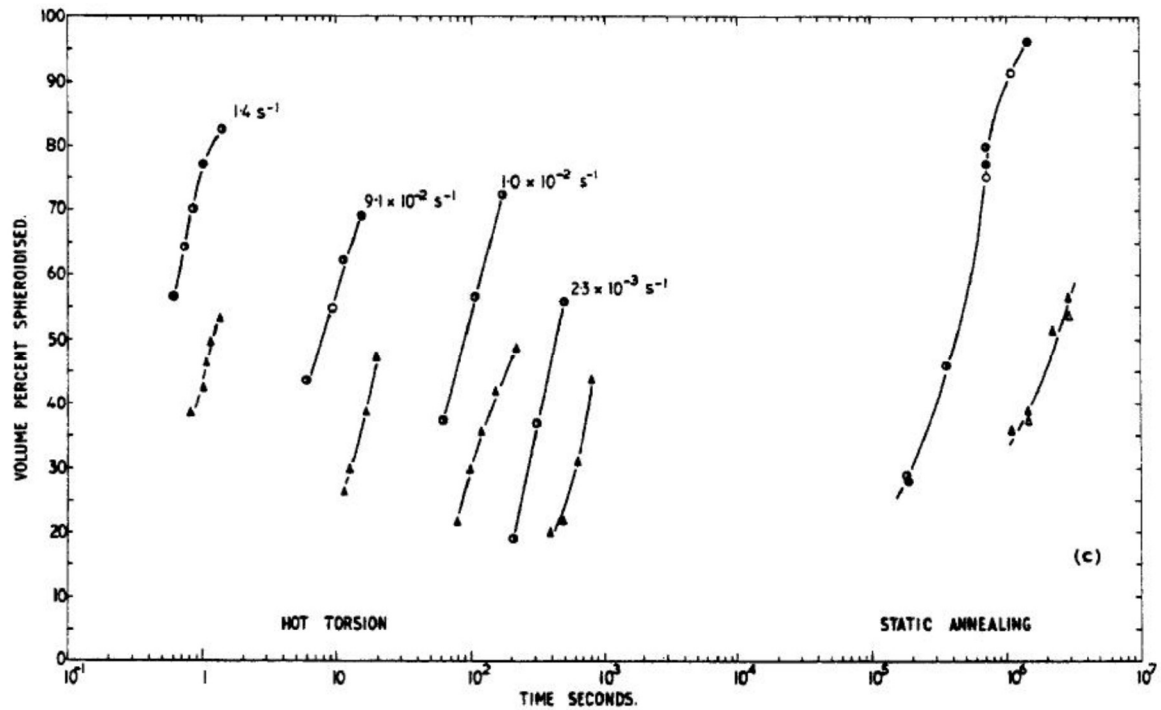
Durante a conformação a frio dos metais, grande parte da energia empregada é perdida na forma de calor para ou pelo aumento da temperatura do material. Aproximadamente 2 a 10% da energia utilizada na deformação é armazenada no material na forma de defeitos cristalinos (PADILHA; SICILIANO, 2005).

A densidade dos defeitos gerados depende de alguns fatores como a estrutura cristalina do material, temperatura de conformação, quantidade e velocidade de deformação; pureza do material e sua energia de defeito de empilhamento (PADILHA; SICILIANO, 2005).

Schaneman (2009) cita a importância do encruamento do material no resultado de tratamento térmico de esferoidização.

Na figura 17, as linhas representam taxas diferentes deformação do material. Pode-se ver que maior a taxa de deformação, melhor o percentual esferoidizado e menos o tempo de esferoidização, ou seja, as placas de cémentita para o começo do processo de coalescimento. Conforme Schaneman (2009 apud CHATTOPADHYAY; SELLARS, 1982), o processo de coalescimento se mostra ainda mais dependente da temperatura (● 700°C ▲ 650°C) se comparado a taxa de redução, ou seja, o processo de coalescimento é melhorado pela deformação do material, mas é não controlada por ela.

Figura 17 – Efeito de diferentes taxas de deformação na cinética da esferoidização (● 700°C
▲ 650°C)



Fonte: Schaneman (2009) Apud Chattopadhyay; Sellars (1982).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão discutidos os materiais e métodos de análise para estudo da influência da taxa de redução no resultado do tratamento térmico de esferoidização em materiais trefilados do aço DIN 41Cr4. Os testes foram conduzidos em escala industrial em uma usina semi-integrada.

5.1 ROTA DE PRODUÇÃO

O arame esferoidizado do aço DIN 41Cr4 estudado neste trabalho é obtido a partir da fusão de sucata por um processo de fusão em um Forno Elétrico a Arco (FEA). Nessa etapa ocorre a fusão da sucata e o refino primário do aço, na sequência o material é levado ao Forno Panela (FP) onde é feita a etapa de ajuste/adição de ligas, refino secundário e, em seguida, desgaseificação. O aço líquido é então levado para o lingotamento contínuo para ser lingotado em tarugos quadrados de lado 155 mm. Após o tarugo ser resfriado, ele é esmerilhado para retirar defeitos superficiais. Esse tarugo é então reaquescido até o ponto de encharque (momento no qual a temperatura do material é homogênea ao longo de toda sua seção). O tarugo encharcado é laminado em fio máquina pela rota *Stelmor*, conforme figura 18.

Figura 18 – Formado de espiras *Stelmor* para fio máquina



Fonte: Galdino (2015).

O fio máquina é embalado e transferido para a trefila de arames. Na etapa de trefilação, o material em estudo, possui duas rotas possíveis: calibrado invertido ou formac. Abaixo a tabela 1 ilustra as etapas na trefila de arames. Esta tabela representa a sequência de operações, da esquerda para a direita, apenas os quadros pintados.

Tabela 1 – Etapas do processamento na trefila de arames por produto

Produto/ Equipamento	Decapagem mecânica	Decapagem química	Trefila desbaste	Tratamento térmico	Decapagem química	Trefila final	Embalagem
Calibrado invertido	x	x	x	x			x
Formac	x	x	x	x	x	x	x

Fonte: Autor (2019).

Como podemos observar na tabela 1, ambos os materiais são encruados por um passe de trefilação antes do tratamento térmico.

As amostras foram escolhidas de modo a minimizar possíveis ruídos do efeito da taxa de encruamento no resultado de esferoidização. Foram escolhidas as bobinas produzidas na mesma planta siderúrgica, ou seja, partiram a mesma receita de sucatas utilizadas para entrada no forno elétrico a arco, tiveram o ajuste de composição química para a mesma faixa respeitando a norma 10083 parte 3 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2009), foram lingotados os tarugos pela rota do lingotamento contínuo e laminados na mesma rota de laminação. Por fim, tratados no mesmo tipo de forno de tratamento térmico (forno do tipo campânula) seguindo uma receita de tratamento fixa.

5.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química desse material é conforme norma 10083 parte 3 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2009). Os valores de especificação dos elementos são representados na tabela 2.

Tabela 2 – Especificação da composição do aço 41Cr4.

Elemento	Especificação (%)	
	min.	máx.
C	0,380	0,450
Si	0,000	0,400
Mn	0,600	0,900
P	0,000	0,025
S	0,000	0,035
Cr	0,900	1,200

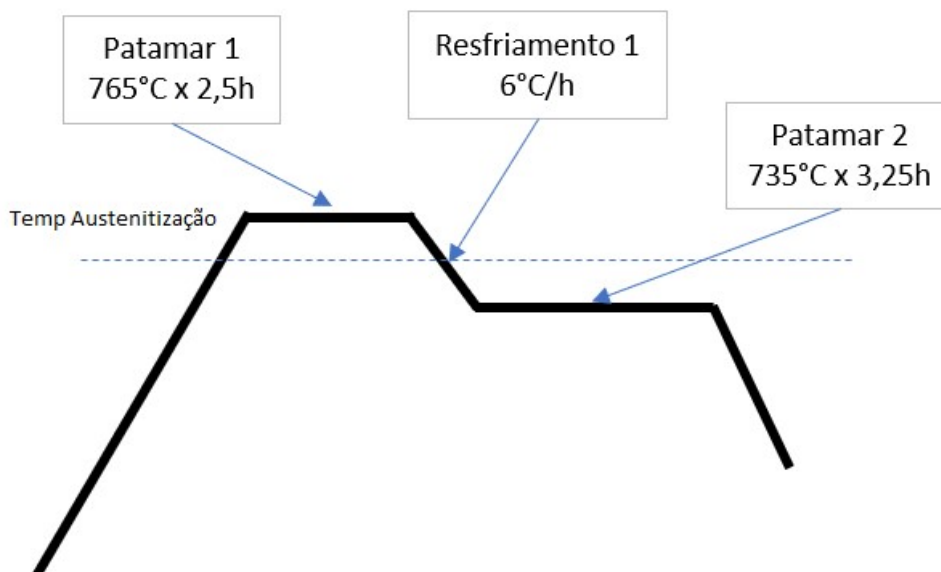
Fonte: Adaptado da Deutsches Institut Für Normung (2006).

5.3 CICLO DE TRATAMENTO TÉRMICO

O ciclo de tratamento térmico para este estudo é de escala industrial, tratado em um forno de campânula de alta convecção, com atmosfera controlada. O ciclo de tratamento é um ciclo isotérmico conforme classificação apresentada por Fagundes (2006).

Conforme figura 19, o material é aquecido até chegar a uma temperatura de 765°C, uma temperatura 20°C acima da temperatura de austenitização que é de 745°C, e mantido a nesse patamar por 2 horas e meia. Na sequência, o material passa por um resfriamento controlado de 6°C/h até atingir o segundo patamar de 735°C por 3,25 horas, logo abaixo da temperatura de austenitização. Após esse segundo patamar o material é resfriado dentro do forno até a temperatura de 680°C, durando aproximadamente 7 horas, e então, resfriado ao ar. Esse resfriamento controlado é importante para que ocorra o coalescimento dos carbeto. O tempo total de ciclo é de aproximadamente 25 horas.

Figura 19 – Representação do ciclo de tratamento térmico.

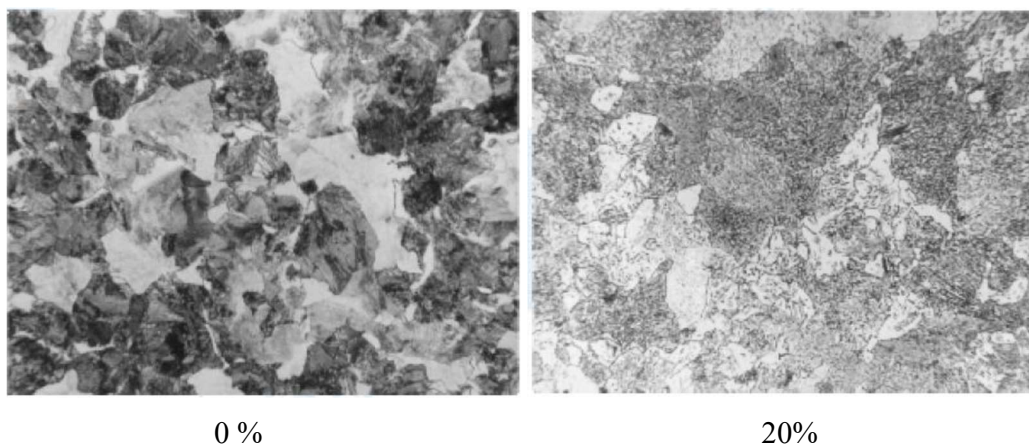


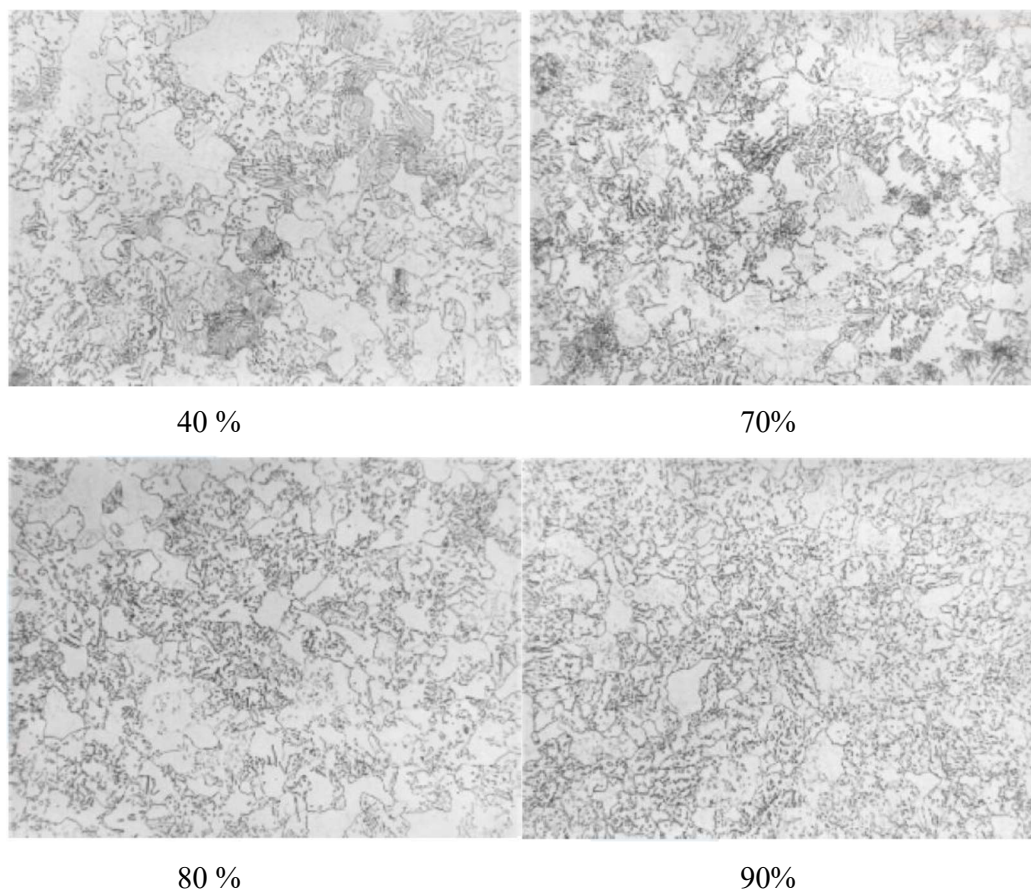
Fonte: Autor (2019).

5.4 AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO

Para determinação do grau de esferoidização foi utilizado como referência a norma 14677, representada na figura 20, que mostra referências de amostras com diferentes graus de esferoidização, conforme a norma 14677 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). O método é comparativo em relação as figuras da norma. Seguem abaixo as figuras referência da norma. Para a análise, as amostras são atacadas com Nital e ampliadas 500x.

Figura 20 - Grau de Esferoidização para o aço COPANT 4140 conforme norma 14677





Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001).

A seleção dos materiais amostrados buscou cobrir o range de taxa de redução de área usual da linha de arames tratados no forno de campânula, que varia de 5% a 20% de redução de área. Foi amostrado também um caso especial que está fora da linha de produtos padrão, com taxa de redução de área de 38,81%. Ao todo, os testes foram realizados em duas amostras para cada uma das dez ordens de produção, totalizando vinte amostras. Segue tabela 3 com os cálculos da taxa de redução, em ordem decrescente.

Tabela 3 – Redução de área (RA) dos materiais analisados

(continua)			
Amostra	Área final	Área inicial	RA
e1	17,60	22,50	38,81%
e2	17,60	22,50	38,81%
d1	19,39	21,76	20,60%
d2	19,39	21,76	20,60%
i1	18,45	20,64	20,10%
i2	18,45	20,64	20,10%

Tabela 4 – Redução de área (RA) dos materiais analisados

(conclusão)			
Amostra	Área final	Área inicial	RA
j1	25,03	26,99	14,00%
j2	25,03	26,99	14,00%
f1	28,03	30,16	13,63%
f2	28,03	30,16	13,63%
h1	28,03	29,50	9,72%
h2	28,03	29,50	9,72%
b1	18,80	19,60	8,00%
b2	18,80	19,60	8,00%
c1	21,82	22,50	5,95%
c2	21,82	22,50	5,95%
a1	17,76	18,25	5,30%
a2	17,76	18,25	5,30%
g1	28,03	28,58	3,81%
g2	28,03	28,58	3,81%

Fonte: Autor (2019).

6 RESULTADOS

6.1 AVALIAÇÃO DO GRAU DE ESFEROIDIZAÇÃO

As amostras foram retiradas em regiões diferentes da bobina e analisadas com ataque ao Nital e ampliados 500x, conforme norma 14677 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). A tabela 4 informa os resultados obtidos e organizados em ordem decrescente por redução de área. As amostras foram selecionadas para arames trefilados e tratados entre os meses de outubro a dezembro, visando minimizar o impacto de diferenças no forno de tratamento térmico devido à manutenção. A numeração das amostras indica a posição de retirada das amostras sendo 1 o começo da bobina e 2 ao final da bobina (exemplo: a1 representa o começo da bobina e a2 representa o final da bobina).

Tabela 5 – Redução de área (RA) dos materiais analisados

Amostra	Área final	Área inicial	RA	GE (%)
e1	17,60	22,50	38,81%	95
e2	17,60	22,50	38,81%	95
d1	19,39	21,76	20,60%	80
d2	19,39	21,76	20,60%	80
i1	18,45	20,64	20,10%	85
i2	18,45	20,64	20,10%	85
j1	25,03	26,99	14,00%	80
j2	25,03	26,99	14,00%	80
f1	28,03	30,16	13,63%	80
f2	28,03	30,16	13,63%	85
h1	28,03	29,50	9,72%	80
h2	28,03	29,50	9,72%	80
b1	18,80	19,60	8,00%	75
b2	18,80	19,60	8,00%	80
c1	21,82	22,50	5,95%	70
c2	21,82	22,50	5,95%	70
a1	17,76	18,25	5,30%	70
a2	17,76	18,25	5,30%	75
g1	28,03	28,58	3,81%	60
g2	28,03	28,58	3,81%	60

Fonte: Autor (2019).

A figura 21 contém as amostras, ampliadas 500x, retiradas no começo das bobinas.

Figura 21 – Microestruturas resultantes após ciclo de esferoidização



Amostra e1



Amostra d1



Amostra i1



Amostra j1



Amostra f1

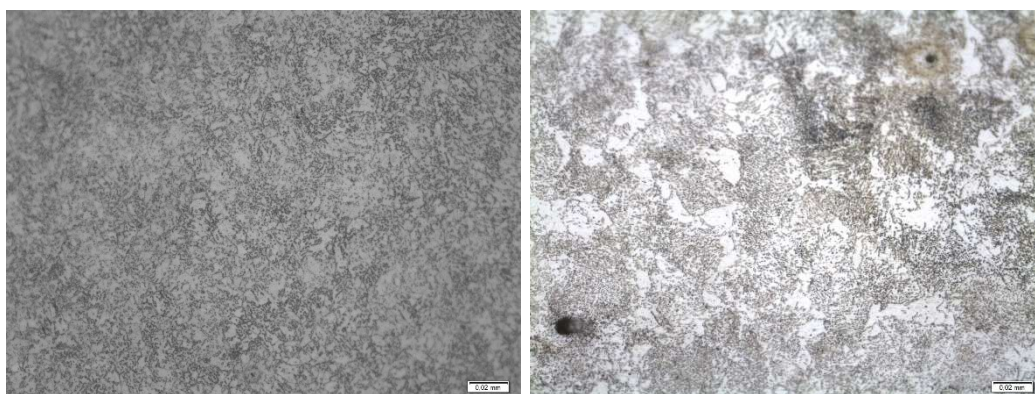


Amostra h1



Amostra b1

Amostra c1



Amostra a1

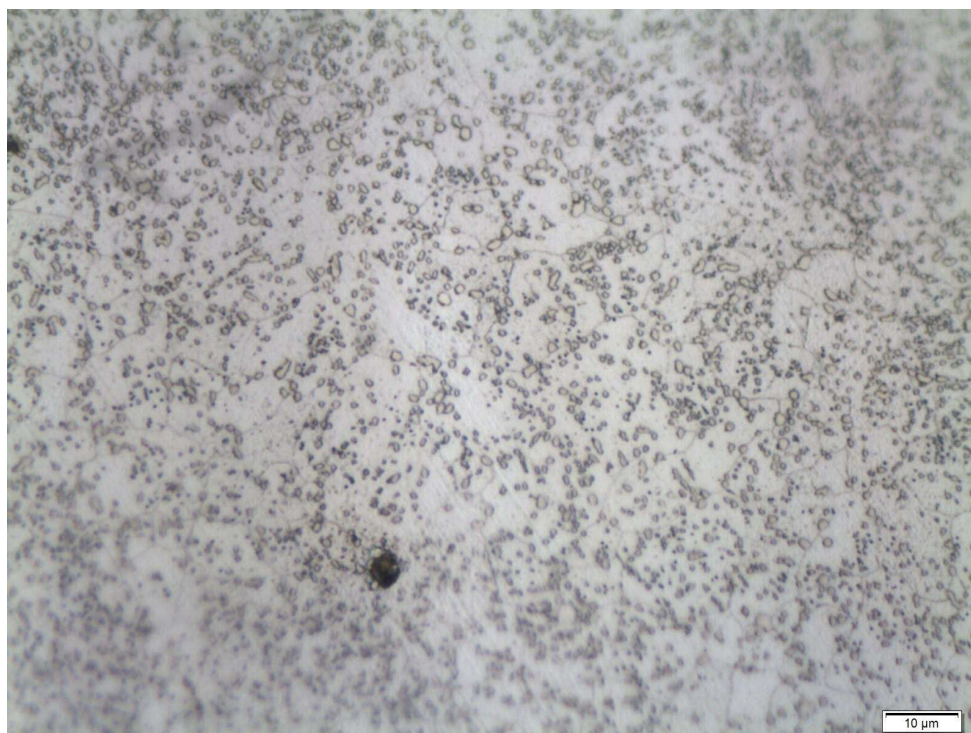
Amostra g1

Fonte: Autor (2019).

As imagens acima (figura 21) mostram as diferenças entre um material mais esferoidizado, onde os carbeto adota um formato mais esférico e com pouca presença de estrutura lamelar. As figuras 22 e 23 mostram as amostras e1 e g1, com ataque ao Nital e ampliadas 1000x, que foram trefiladas com redução de área de 38,81% e 3,81% respectivamente.

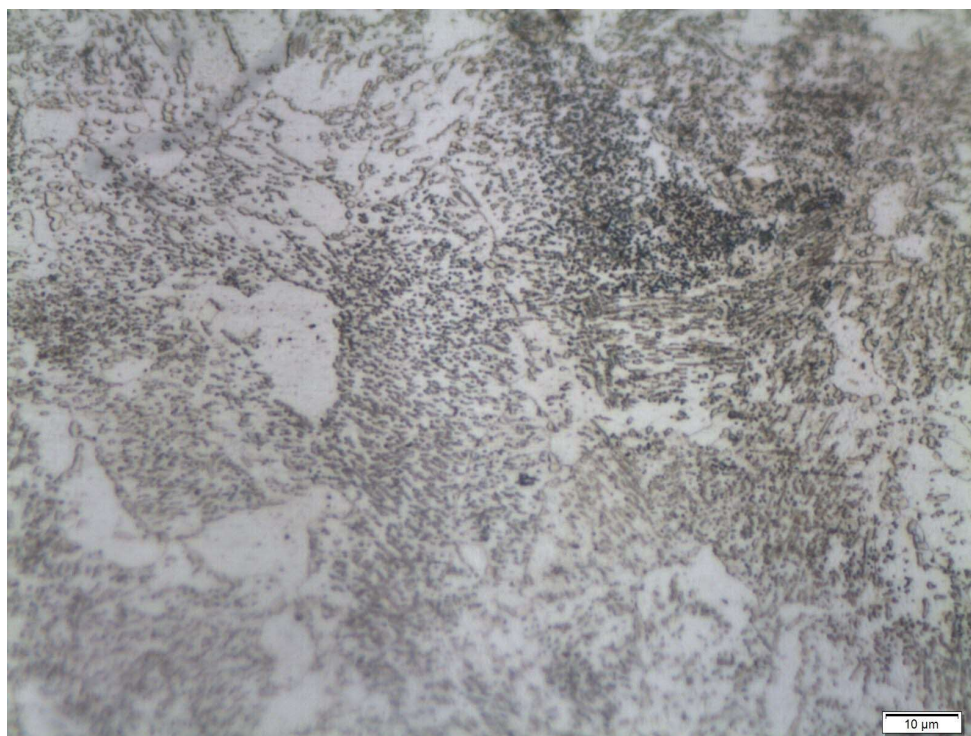
Ao compararmos a amostra com a menor taxa de redução, partindo de um fio máquina bitola 28,58 mm para um arame trefilado bitola 28,03 mm, resultando em uma taxa de redução de área de 3,81%, podemos ver que a amostra tratada apresenta campos com estrutura lamelar em sua maioria, com alguns pontos de início de coalescimento dos carbeto. Se compararmos com a amostra de maior taxa de redução de área, um arame trefilado bitola 17,6 mm que partiu de um fio máquina bitola 22,50 mm, resultando em uma redução de 38,81% em área, podemos ver que está mais esferoidizada, com carbeto em forma esférica e poucos pontos de carbeto com processo de coalescimento incompletos.

Figura 22 – Amostra e1 ampliada 1000x com redução de área de 38,81% e GE de 95%



Fonte: Autor (2019).

Figura 23 – Amostra g1 ampliada 1000x com redução de área de 3,81% e GE de 60%

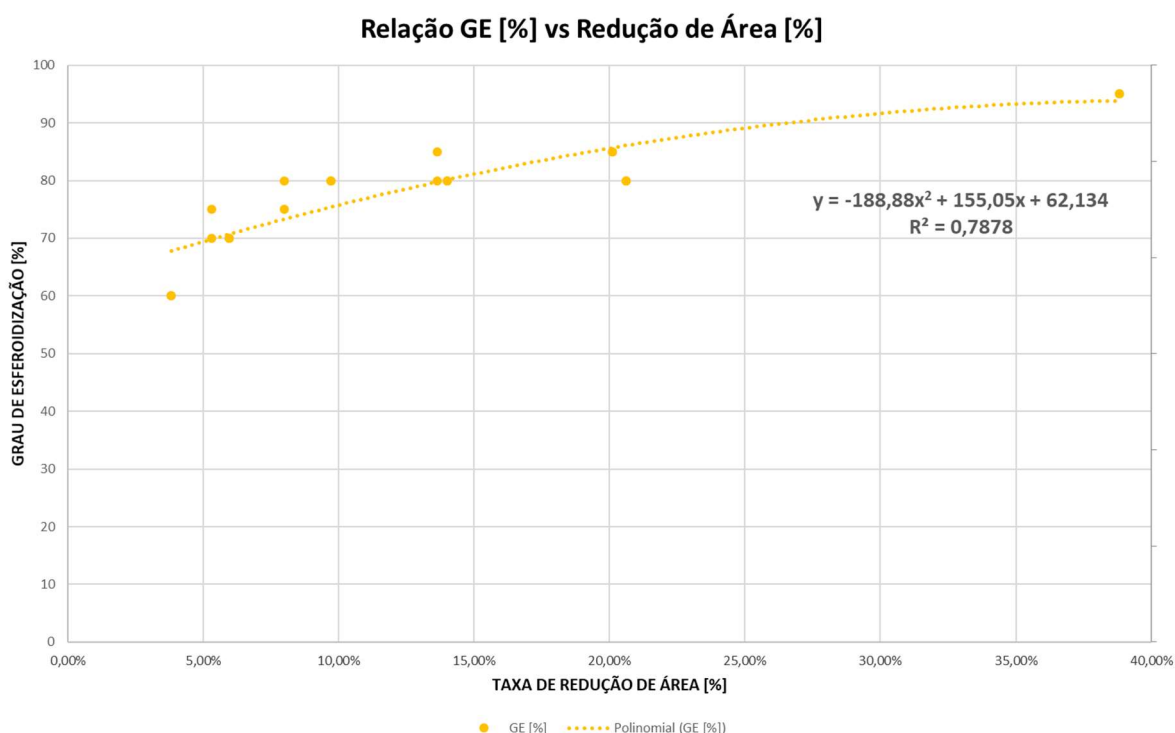


Fonte: Autor (2019).

Podemos observar que a amostra e1 apresenta boa homogeneidade e carbeto esférico em sua maioria diferentemente do que vemos na amostra g1, a qual apresenta estrutura lamelar e se nota apenas o início da decomposição desta estrutura para o coalescimento dos carbeto.

Os resultados foram plotados em um gráfico, representado na figura 24, e realizou-se uma regressão polinomial de grau 2 utilizando o *software* Microsoft Excel.

Figura 24 – Relação entre o grau de esferoidização e a redução de área



Fonte: Autor (2019).

Pode-se perceber que o resultado do grau de esferoidização teve um aumento conforme a taxa de redução foi sendo incrementada. Com a regressão linear obtivemos a equação (1) e um Coeficiente de Determinação (r^2) de 0,7878, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é a aderência do modelo matemático aos valores apresentados (MONTGOMERY, 2004).

$$y = -188,88x^2 + 155,05x + 62,134 \quad (1)$$

$$r^2 = 0,7878$$

Portanto, ao se utilizar a equação (1) com um Coeficiente de Determinação (r^2) de 0,7878, podemos estimar o resultado do processo de esferoidização para diferentes taxas de redução de área conforme tabela 5.

$$y = -188,88x^2 + 155,05x + 62,134 \quad (1)$$

Tabela 6 – Estimativa de GE [%] em função da RA [%] para arames DIN 41Cr4

RA (%)	GE (%)
35	93
30	92
25	89
20	86
15	81
10	76
5	69
3	67

Fonte: Autor (2019).

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Pode-se notar que o encruamento prévio do material resulta em um melhor resultado de coalescimento dos carbeto conforme mostrado em Schaneman (2009 apud CHATTOPADHYAY; SELLARS, 1982) e conforme citado por Fagundes (2006), a energia no contorno de grão é a força motriz para o coalescimento dos carbeto que buscam um estado de energia mais estável, diminuindo a energia no contorno de grão. Essa energia é armazenada durante o processo de encruamento do material (PADILHA; SICILIANO, 2005).

Alguns pontos que podem impactar como ruído na análise e ficam de sugestões para melhoria em trabalhos futuros:

- A composição química segue um limite de elementos conforme norma 10083 parte 3 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2009) entretanto, ainda assim tempo uma variação permissível dos elementos e que pode influenciar no resultado. Sugere-se a utilização de uma única bobina ou bobinas de uma mesma corrida para eliminar essa influência.
- A velocidade de deformação tem influência na quantidade de energia armazenada internamente durante a conformação do material (PADILHA; SICILIANO, 2005). Sugere-se que as amostras sejam todas trefiladas com a mesma velocidade de trefilação para eliminar essa influência.
- O grau de esferoidização da amostra é medido conforme norma 14677 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). O método é comparativo e a norma tem referências de materiais variando de 10% em 10% o grau de esferoidização. Sugere-se que seja feita uma comparação mais detalhada em uma variação de 2% em 2% do grau de esferoidização e se possível a utilização de um *software* para uma análise automática, sem a influência do ser humano na determinação do grau por comparação.
- As amostras representam um range de taxa de redução padrão da usina de Pindamonhangaba, variando entre 5% e 20%. As amostras analisadas com valores menores ou maiores a essa faixa padrão, foram eventos pontuais devido a necessidade de entrega do material. Sugere-se que sejam retiradas mais amostras com taxa de redução menor do que 5% e principalmente com taxas maiores do que 20% de redução.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **Produção brasileira de aço bruto tem queda de 7,3% até setembro.** Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/producao-brasileira-de-aco-bruto-tem-queda-de-7-3-ate-setembro>. Acesso em: 30 out. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14677: aços: determinação do grau de esferoidização de carbonetos: método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- BECKER, Renata Helena Santer. **Estudo da influência da taxa de resfriamento e temperatura nos últimos passes de laminação de fio máquina sobre a resposta ao tratamento térmico de esferoidização em um aço DIN 41Cr4.** 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- BUSSOLOTI, Robson Silva. **Ferrita delta em parafusos tratados termicamente – caracterização e consequências.** 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- CALDAS, José Augusto de Castro. **Análise de duas rotas tecnológicas na siderurgia brasileira com foco na eficiência energética.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5.ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos.** 6.ed. São Paulo: ABM, 1988. 576 p.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 10083-3: steels for quenching and tempering.** Berlim: DIN EN, 2009.
- FAGUNDES, Edson José. **Análise da influência do recozimento de esferoidização nas propriedades mecânicas do aço SAE 1050.** 2006. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- FILHO BRESCIANI, Ettore *et. al.* **Conformação plástica dos metais.** 6.ed. São Paulo: EPUSP, 2011. 254 p.
- GALDINO, Rafael Stella. **Desenvolvimento de ciclos de esferoidização de aços para Cold Heading: otimização da microestrutura de partida na laminação termomecânica.** 2015. Dissertação (Pós-graduação Lato Sensu da Escola de Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** 4.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004. 513 p.

PADILHA, Angelo Fernando; SICILIANO, Fulvio. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3.ed. São Paulo: ABM Livros, 2005. 232 p.

SCHANEMAN, Allen. **The effects of prior microstructure on spheroidizing kinetics and cold workability in bar steels**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica) – Faculty and Board of Trustees, Colorado School of Mines, Colorado, 2009.

VIANA, Márcio Costa. **Análise de defeitos superficiais com origem no processo de laminação de aços especiais para a cadeia automotiva e implementação de soluções**. 2009. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.