

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DIELLE CORRÊA

**ESFEROIDIZAÇÃO EM AÇO SAE AISI 52100: ESFEROIDIZAÇÃO CÍCLICA PARA REDUÇÃO DE
TEMPOS DE PROCESSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

DIELLE CORRÊA

**ESFEROIDIZAÇÃO EM AÇO SAE AISI 52100: ESFEROIDIZAÇÃO CÍCLICA
PARA REDUÇÃO DE TEMPOS**

**A study on cyclic spheroidization in SAE 52100 steel for process times
reduction**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Orientadora: Prof. Dra. Maria Nalu Verona Gomes

PATO BRANCO

2021



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Esferoidização Em Aço SAE AISI 52100: Esferoidização Cíclica Para Redução De Tempos

Dielle Corrêa

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 03/12/2021 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dra. Maria Nalu Verona Gomes
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientadora

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus por ter sido meu socorro, amparo e sustento até aqui, a minha mãe, a meus professores, aos servidores da UTFPR, a meus colegas de curso, a meus amigos, e a todos aqueles que me apoiaram e acreditaram na minha graduação, por vezes, mais do que eu mesma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser meu refúgio, fortaleza e socorro bem presente na angústia; por me sustentar em todos os momentos dessa dura jornada até aqui; por me capacitar e por renovar, todas as manhãs, sua misericórdia sobre minha vida.

Agradeço a minha mãe, Maria Rozane Corrêa, por desde cedo me instruir quanto a importância da educação e do trabalho, por todos os esforços feitos em prol da minha formação como ser humano.

Agradeço a Johnny Robson Picolotto Junior, por todo empenho, amor, cuidado e força, por acreditar em mim mais do que eu mesma.

Agradeço à família Nogueira, cujo apoio foi fundamental para que eu não desistisse nos primeiros anos de graduação e então pudesse concluir essa etapa tão importante.

Agradeço à Roberta Massarollo, por dividir comigo todas as lutas e conquistas, durante todos os anos da graduação, sua constância me deu forças.

Agradeço a Johnny Robson Picolotto e a Elena Adriana Dietrich Picolotto, por todo suporte e amparo, que foram essenciais na conclusão desse trabalho.

Agradeço aos meus colegas de graduação por todo apoio e experiências compartilhadas.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, corpo docente e servidores pela oportunidade de realização de um sonho.

Agradeço à Professora Dra. Maria Nalu Verona Gomes por aceitar ser orientadora de tal e por todo auxílio.

EPÍGRAFE

“Porque eu sei os pensamentos que tenho sobre vós, diz o Senhor, pensamentos de paz, e não de mal, para vos dar o fim que esperais” – Jeremias, 29;11.

“For I know the thoughts that I think toward you, saith the Lord, thoughts of peace, and not of evil, to give you an expected end” – Jeremiah, 29;11.

RESUMO

CORRÊA, Dielle. **Um Estudo Sobre Esferoidização Cíclica em Aço SAE AISI 52100 para Redução de Tempos de Processos**. 2021. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

As indústrias buscam incansavelmente por otimização de processos, visando maior lucratividade, qualidade e competitividade frente ao mercado. A premissa é basicamente a mesma: fazer mais com menos. Quando falamos em aço de alto teor de carbono, estes podem ser muito duros para serem convenientemente usinados ou plasticamente deformados. Para tornar este tipo de material mais trabalhável, esses aços podem ser termicamente tratados ou recozidos para desenvolver a estrutura da esferoidita, que têm maior ductilidade, menor dureza e são facilmente usinados ou deformados. No entanto, os tratamentos térmicos de esferoidização convencionais são longos. Este trabalho tem como objetivo buscar uma forma de acelerar o processo de esferoidização em aço SAE 52100 buscando uma abordagem alternativa à proposta convencional. Foram submetidos corpos de prova (CP) de aço SAE 52100 a um processo de esferoidização cíclica, a temperaturas acima e abaixo da temperatura do eutetóide (727°C) por 3 e 6 ciclos. O material foi então caracterizado quanto a dureza, apresentando dureza de 86,5 HRB após 3 ciclos e 88,5 HRB após 6 ciclos, quanto a resistência à tração, obteve-se 626,45 MPa e 638,60 MPa após 3 e 6 ciclos, respectivamente, e caracterizou-se a microestrutura por microscopia ótica. Foi aplicado tratamento convencional de esferoidização que levou cerca de 16 horas e 21 minutos, enquanto o tratamento de 3 ciclos teve duração de 1 hora e 13 minutos, já a esferoidização por 6 ciclos durou 2 horas e 16 minutos, e com isso apresentou uma redução no tempo de tratamento de 92,56% aplicando 3 ciclos e 86,13% em relação a 6 ciclos.

Palavras-chave: Esferoidização, Tratamento Térmico Cíclico, Aço Alto Teor de Carbono, Otimização de Processos.

ABSTRACT

CORRÊA, Dielle. **A Study on Cyclic Spheroidization in SAE 52100 Steel for Process Times Reduction**. 2021. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

The industries relentlessly search for process optimization, aiming at greater profitability, quality and competitiveness in the market. The premise is basically the same: do more with less. When we talk about high carbon steel, these can be too hard to be conveniently machined or plastically deformed. To make this type of material more workable, these steels can be heat treated or annealed to develop the structure of the spheroidite, which has greater ductility, less hardness and is easily machined or deformed. However, conventional spheroidization heat treatments are lengthy. This work aims to find a way to accelerate the spheroidization process in SAE 52100 steel, seeking an alternative approach to the conventional proposal. Test specimens (CP) made of SAE 52100 steel were subjected to a cyclic spheroidization process, at temperatures above and below the eutectoid temperature (727°C) for 3 and 6 cycles. The material was then characterized for hardness, with hardness of 86.5 HRB after 3 cycles and 88.5 HRB after 6 cycles. As for tensile strength, it was obtained 626.45 MPa and 638.60 MPa after 3 and 6 cycles, respectively, and the microstructure was characterized by optical microscopy. Conventional spheroidization treatment was applied, which took about 16 hours and 21 minutes, while the treatment of 3 cycles lasted 1 hour and 13 minutes, while the spheroidization treatment for 6 cycles lasted 2 hours and 16 minutes, and with this presented a reduction in the treatment time of 92.56% applying 3 cycles and 86.13% in relation to 6 cycles.

Keywords: Spheroidization, Cyclic Heat Treatment, High Carbon Steel, Process Optimization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.1.1 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 TRATAMENTO TÉRMICO	14
2.2 RECOZIMENTO	15
2.2.1 Coalescimento ou Esferoidização	16
2.2.1.1 Esferoidização Cíclica	19
2.3 AÇO SAE 52100	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 MATERIAIS	26
3.2 MÉTODOS	26
3.2.1 Ensaio Mecânicos	26
3.2.2 Tratamentos térmicos: Esferoidização Convencional	30
3.2.3 Tratamentos térmicos: Esferoidização Cíclica	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	36
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	38
4.2.1 Alongamento	38
4.2.2 Dureza	39
4.2.3 Limite de Resistência a Tração	40
4.3 TEMPOS DE PROCESSOS	41
5 CONCLUSÕES	43
5.1 TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	45

APÊNDICE A – PROJETO DO SUPORTE PARA EXECUÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO CONVENCIONAL.....	49
APÊNDICE B – PROJETO DO SUPORTE PARA EXECUÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO CÍCLICO.....	50

1 INTRODUÇÃO

Na busca incessante pela otimização de processos, a Engenharia nos permite descobrir um mundo de possibilidades. Quanto as propriedades dos materiais, alterar microestruturas possibilita uma melhor definição da combinação das propriedades mais adequadas de um material, de acordo com sua aplicação. Para que essas alterações sejam possíveis, são utilizados tratamentos térmicos, que atuam na transformação de fase da estrutura cristalina, controlando a microestrutura do aço, a forma e o tamanho do grão, e conseqüentemente as propriedades desejadas (CARLAN; SILVA; KIECKOW, 2017).

Aplicado com objetivo de aumentar a ductilidade, a usinabilidade e diminuir a dureza, o tratamento térmico de esferoidização é muito importante para indústrias, tais como, aeroespacial, automotiva e de navegação. A esferoidização é um tratamento que visa produzir uma microestrutura esferoidal, constituída de pequenas partículas aproximadamente esféricas de carboneto num fundo ou matriz de ferrita (CHIAVERINI, 2008).

Mais especificamente, o processo de esferoidização convencional consiste em um tratamento de recozimento subcrítico que leva muito tempo. Em uma liga de alto teor de carbono, a esferoidização permanece incompleta mesmo após 100h de manutenção a 700 °C (TIAN; KRAFT, 1987).

Callister (2020) nos indica algumas formas de condução do processo de esferoidização: aquecimento da liga até uma temperatura imediatamente abaixo da eutetóide (até aproximadamente 700 °C) na região $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ do diagrama de fases. Se a microestrutura original contiver perlita, os tempos de esferoidização ficarão geralmente na faixa entre 15 h e 25 h; aquecimento até uma temperatura imediatamente acima da temperatura eutetóide, e então ou um resfriamento muito lento no forno ou a manutenção a uma temperatura imediatamente abaixo da temperatura eutetóide; aquecimento e resfriamento alternados dentro de aproximadamente ± 50 °C da temperatura do diagrama de fases Fe-C mostrada na figura 1.

O aço utilizado neste trabalho foi o SAE 52100, que tem aplicações na fabricação de rolamentos, que por sua vez, devem apresentar elevada resistência ao desgaste e a fadiga, além de uma microestrutura estável em elevadas temperaturas. A usinagem do aço esferoidizado pode aumentar a vida útil das ferramentas de usinagem em até cinco vezes em relação ao material não esferoidizado (GUPTA; SEN, 2006).

Visando aumentar a produtividade, reduzir o consumo energético associado aos longos períodos que convencionalmente o tratamento de esferoidização requer, atendendo a premissa das indústrias de se fazer mais com menos, é que se propõe o tema de estudo em questão. Sabe-se que a aplicação de deformação plástica antes do recozimento subcrítico tem efeito significativo na cinética de esferoidização, e tal observação já foi realizada para aços de baixo e médio carbono (GUO; LI; JIANG, 2010). Desta forma buscou-se, através de esferoidização cíclica, a redução do tempo do processo em aço de alto teor de carbono, bem como bons resultados quanto a microdureza da microestrutura esferoidizada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral reduzir o tempo do tratamento térmico de esferoidização em aço SAE AISI 52100, por meio de esferoidização cíclica.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Investigar a influência da temperatura para esferoidização, em patamares próximos a linha de transformação do eutetóide;
- Determinar a faixa de tempo e temperatura para o processo de esferoidização;
- Determinar as condições de resfriamento;
- Preparar corpo de prova para ensaio de tração e dureza;
- Preparar amostras para análise metalográfica;
- Caracterizar quanto a dureza, a resistência a tração e a metalografia.

1.2 JUSTIFICATIVA

O processo de esferoidização consiste em um tratamento de recozimento subcrítico, aplicado com objetivo de aumentar a ductilidade, a usinabilidade e diminuir a dureza de microestruturas, sendo muito importante para várias indústrias, tais como aeroespacial, automotiva e de navegação, porém, sua execução convencional leva muito tempo para ser concluída. Na busca pelo aumento da produtividade, redução do consumo energético associado aos longos períodos requeridos pelo tratamento de esferoidização, atendendo a premissa das indústrias de se fazer mais com menos, é que se justifica esse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizado o levantamento bibliográfico referente ao assunto abordado. Serão apresentadas definições e conceitos referentes ao tratamento térmico de esferoidização, bem como demais assuntos pertinentes ao tema.

2.1 TRATAMENTO TÉRMICO

Operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam afetar as características de aços e ligas especiais, buscando a otimização de suas propriedades, são denominadas tratamentos térmicos. (SILVA; MEI, 2006)

A utilização de ligas metálicas nos mais diversos setores produtivos se baseia em suas propriedades mecânicas. Importantes características devem ser levadas em consideração, tais como resistência a corrosão, resistência ao calor, propriedades elétricas, magnéticas, etc, características essas que dependem grandemente da estrutura cristalina ou granular, e estão intimamente relacionadas com sua composição química e condições de fabricação (CHIAVERINI, 2008).

A microestrutura dos aços é o que determina suas propriedades, e para conseguir as propriedades desejadas em cada aplicação específica, altera-se essa microestrutura por meio dos mais diversos tratamentos térmicos.

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os materiais, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI, 2005).

Os procedimentos convencionais de tratamento térmico para a produção de aços martensíticos envolvem normalmente o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em algum tipo de meio de têmpera, tais como a água, o óleo ou o ar (CALLISTER, 2020).

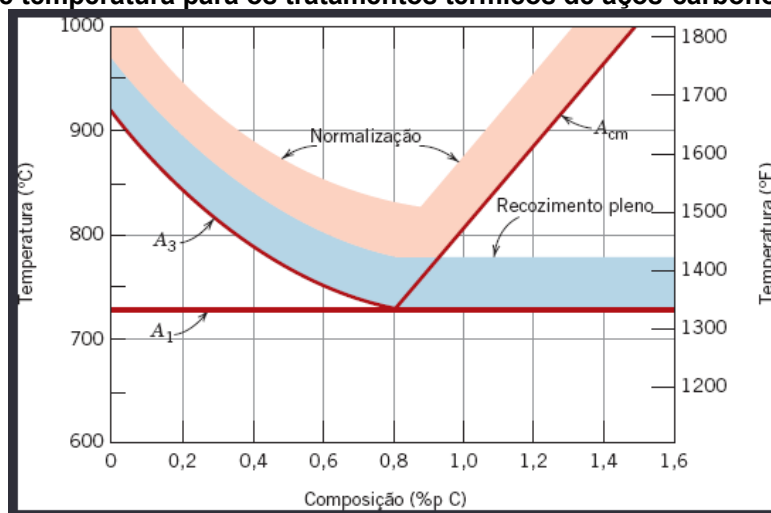
Tratamentos térmicos visam, de modo geral, a remoção de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência ao desgaste e tração, melhorias quanto ductilidade, usinabilidade, propriedades de corte, resistências a corrosão, ao calor, bem como a modificação de propriedades elétricas e magnéticas.

Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. É necessário que o tratamento térmico seja escolhido e realizado adequadamente para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo. Os tratamentos térmicos usuais dos aços são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, coalescimento e os tratamentos isotérmicos (CHIAVERINI, 1955).

2.2 RECOZIMENTO

Vários procedimentos de recozimento diferentes são empregados para melhorar as propriedades dos aços. Entretanto, antes desses métodos serem discutidos, são necessários alguns comentários em relação à identificação das fronteiras entre as fases. A Figura 2 nos traz parte do diagrama de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetoide. A linha horizontal na temperatura eutetoide, identificada como A₁, é denominada temperatura crítica inferior, abaixo da qual, sob condições de equilíbrio, toda a austenita terá se transformado nas fases ferrita e cementita. As fronteiras entre fases identificadas como A₃ e A_{cm} representam, respectivamente, as linhas para a temperatura crítica superior para os aços hipoeutetoides e hipereutetoides. Para temperaturas e composições acima dessas fronteiras, somente a fase austenita prevalecerá (CALLISTER, 2020).

Figura 1 – Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetoide, indicando as faixas de temperatura para os tratamentos térmicos de aços-carbono comuns.



Fonte: Adaptada de Krauss (1990)

Quando um metal é deformado plasticamente a frio, ou sofre a ação do encruamento, ocorre uma deformação tanto maior quanto maior a intensidade de deformação plástica. O resultado é um aumento da resistência mecânica e da dureza, o aumento deste último característico sendo mais rápido no início do processo, e uma queda da ductibilidade. O encruamento exerce uma ação intensa sobre as imperfeições cristalinas (lacunas, discordâncias etc.).

Para reverter essa deformação plástica, é necessário criar condições que ultrapassem a barreira energética criada pelo trabalho realizado no material durante a deformação do material. A barreira pode ser transposta pelo aquecimento do metal a temperaturas e tempos controlados (CHIAVERINI, 2008).

Esse processo de aquecimento é chamado recozimento. Durante o mesmo, acontece um rearranjo e eliminação das configurações produzidas pelos defeitos cristalinos e isso depende dos níveis de temperatura empregados. Em função dessas temperaturas, dependendo dos resultados alcançados tanto na estrutura cristalina como nas propriedades do metal encruado, o recozimento compreende três estágios principais: recuperação, recristalização e crescimento de grão (CHIAVERINI, 2008).

Chiaverini (2005) conceitua recozimento como sendo o tratamento térmico realizado com o fim de remover tensões residuais devido aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, alterar propriedades mecânicas como resistência e ductibilidade, eliminar o efeito do encruamento etc.

É um tratamento genérico, que abrange os tratamentos específicos de recozimento para alívio de tensões ou subcrítico, recozimento intermediário, normalização, recozimento total ou pleno, recozimento isotérmico ou cíclico e esferoidização.

2.2.1 Coalescimento ou Esferoidização

O tratamento térmico de esferoidização é realizado nos aços perlíticos com o objetivo de aumentar a sua ductibilidade. Essa condição é atingida com a transformação de carbonetos lamelares, formados sob velocidades baixas de resfriamento, em carbonetos aproximadamente esféricos em matriz ferrítica (BRAMFITT; HINGWE, 1991).

Os aços com médio e alto teor de carbono e com microestrutura composta por perlita grosseira ainda são muito duros para serem usinados ou plasticamente deformados. Esses aços podem ser termicamente tratados ou recozidos para desenvolver a estrutura da esferoidita, o que concede maior ductilidade e menor dureza e permite que sejam usinados ou deformados com facilidade. O tratamento térmico de esferoidização pode ser conduzido por diferentes métodos (CALLISTER, 2020).

Normalmente, na produção de aços de alto carbono, o tratamento térmico de esferoidização é realizado após a laminação ou o forjamento, nos chamados semiprodutos, exigindo um grau de esferoidização específico para seu processamento posterior, por exemplo, de 80% a 90% de carbonetos globulares (TOTTEN, 2007).

A força motriz para a esferoidização da cementita é a redução da energia interfacial ferrita/carbonetos pela formação de partículas esféricas de cementita, visto que essas possuem a menor relação área superficial/volume (KRAUSS, 2005).

Zhu e Zheng (2008) estudaram um processo de esferoidização direta durante a laminação do aço hipereutetóide GCr15, e concluíram que a esferoidização é promovida por uma combinação de baixa temperatura de deformação, e lenta taxa de resfriamento, que aumenta a reação da transformação eutetóide divorciada.

Os atuais processos de esferoidização disponíveis podem ser divididos em quatro classes:

- Recozimento Isotérmico em uma temperatura ligeiramente abaixo da temperatura A1 (VEDULA; HECKEL, 1977);
- Ciclagem térmica perto da temperatura A1 (PAYSON; HODPAPP; LEEDER, 1940);
- Recozimento isotérmico com auxílio de prévio trabalho a frio; (HOLTZMAN; DENKO; STOUT, 1958; KALDOR, 1962; LUPTON; WARRINGTON, 1972; GOODCHILD, 1972);
- Deformação a quente antes, durante ou após a transformação de austenita em Perlita; (ROBBINS; SHEPARD; SHERBY, 1964; SHERBY; HARRIGAN; CHAMAGNE; SAUVE, 1969; PAQUETON; PINEAU, 1971; CHATTOPADHYAY; SELLARS, 1982);

A esferoidização convencional de aços é um processo que consiste em um tratamento de recozimento subcrítico que leva muito tempo (TIAN; KRAFT, 1987; MONDAL; DEY, 1984; HERNANDEZ; MORALES; CABANAS, 1992).

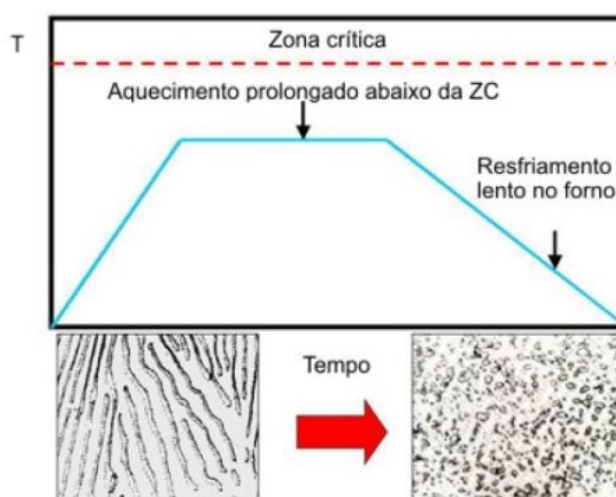
Em uma liga recozida de Fe-C com 0,79% de carbono, a esferoidização permanece incompleta mesmo após 100h de manutenção a 700°C (TIAN; KRAFT, 1987).

Uma liga de aço carbono, com 0,72% de carbono, com estrutura perlítica fina e recozimento isotérmico a 680°C, requer 72h de retenção para que ocorra quase 100% de esferoidização, enquanto, com uma estrutura perlítica grosseira, 50h de retenção ocasionam apenas 50% de esferoidização (MONDAL; DEY, 1984).

De acordo com Hewitt (1982), dois tipos de processo são utilizados para esferoidização: recozimento esferoidal continuamente resfriado - austenitização por no mínimo 1h a 1103K, resfriar a 1023K com uma taxa não excedente a 25K/h, Resfrie a 690 K a uma taxa não superior a 10 K / h. Ar frio de 953 K; Recozimento esferoidal isotérmico: Austenitizar por um mínimo de 1 h em 1103 K. Resfriamento rápido a 973 K e mantenha por um mínimo de 2 h. Frio para 963 K em 1 h e resfriamento do ar de 953 K. Ambas as abordagens precisam de 10-20 h para realizar a esferoidização.

Geralmente, o método mais eficiente de obtenção de partículas sutis de cementita em aços perlíticos compreende uma combinação de severa deformação a frio e recozimento – (FURUHARA; MIZOGUCHI; MAKI, 2005) – deformação a quente pesada – (OH; SON; JUNG; KIM; LEE; IM, 2011) – e tratamento térmico cíclico. Investigações recentes estabeleceram o potencial das técnicas de tratamento térmico cíclico para acelerar os processos de esferoidização em aços (HERNANDEZ; MORALES; CABANAS, 1992; SAHA; MONDAL; BISWAS; MAITY, 2012).

Figura 2 – Esquemático do tratamento térmico de esferoidização e a estrutura de esferoidita formada após o tratamento



Fonte: Adaptada de Erdal (2007)

A esferoidização é comumente aplicado em aços hipereutetóides e aços ligados. A perlita é envolvida por uma rede de cementita, dificultando usinagem e deformações plásticas. O tratamento consiste em aquecer e manter por um longo tempo o material em temperaturas um pouco abaixo da formação da austenita e resfriar em tempos controlados (ERDAL, 2007). O resultado é uma estrutura globular de cementita em uma matriz de ferrita, o que facilita a usinagem e outros trabalhos. Esta estrutura é denominada esferoidita (DINI, 2017). Um aspecto micrográfico típico é mostrado na parte direita da Figura 2.

Pode-se avaliar o grau de esferoidização de um material a partir da forma de cada esferoide e da distribuição de partículas conforme essa forma, utilizando a circularidade, a partir da obtenção de micrografias com bom contraste, seguido da binarização das imagens (HERNANDEZ; FONSECA; DICK, 2010)

2.2.1.1 Esferoidização Cíclica

O processo de esferoidização cíclica completa consiste em austenitizar e, em seguida, resfriar rapidamente até a temperatura ligeiramente acima da temperatura de transformação de martensita, resfriando para uma temperatura ligeiramente abaixo da temperatura A1 para recozimento térmico (PARUSOV; DOLZHENKOV; EVSYUKOV, 1978).

Sahay, Malhotra e Kolhede (2003) descobriram que o recozimento cíclico acelerou o crescimento de grãos em aços de grau de alumínio descobriram que o recozimento cíclico acelerou o crescimento do grão em aços inox com adição de alumínio e também acelerou a transformação da bainita durante o processo cíclico de austêmpera.

Saha, Mondal, Biswas e Maity (2012) estudaram a estrutura e propriedades mecânicas características de aços de baixo, médio e alto teor de carbono após tratamentos térmicos cíclicos. Cada ciclo leva alguns poucos minutos acima de Acm seguido de resfriamento com ar forçado à temperatura ambiente.

Foi investigado anteriormente o rápido comportamento de esferoidização da cementita em aço de alto teor de carbono durante o tratamento térmico cíclico acima e abaixo da temperatura A1 (LV; WANG; WANG; SUN; FU, 2013).

Tabela 1 – Condições de esferoidização cíclica previamente estudadas

Nome	Ano	Aço	Etapas							Resultado
			Tempo Aquecimento	Temperatura de Austenitização	Condições de Resfriamento	Ciclos	Temperatura Aquecimento	Resfriamento Final		
Guilherme V Herter	2017	SAE 52100	45 min.	850°C	Rápido em Óleo SAE 15W40 moderada agitação	5 X acima de A1 4 X abaixo de A1 Barras a diferentes ciclos: 1, 3, 5 e 8	5 X 795°C, por 45 min 4 X 700°C por 45 min	Desligar mufla e manter CP por 1h para resfriar lentamente	Eficiente	
Atanu Saha Et Al	2010	Aço Carbono Recozido - 0,6%C					810°C por 6 min (Acima de AC3 = 760°C)	Ar forçado por 4 min, fluxo de 6m³/h	Eficiente	
James M. O'Brien	2002	AISI 4037, 0,37%C				Subcrítico	704°C por 30min	em 30min chega em 540°C	Subcrítico requer menos tempo	
		AISI 1541, 0,37%C				Intercrítico	748°C por 2h	em 10min chega em 688°C		
Zhi-qing LÜ	2014	Aço 0,42% C	30 min.	860°C	Ar a Temp. Amb.	Barras a diferentes ciclos: 1 a 12	750°C por 5 min	Ar forçado por 3 min, fluxo de 3K/s até 620°C e depois resfriados até T. Amb.	Eficiente	
Z.Q. Lv Et Al	2013	Aço 0,8% C	30 min.	900°C	Mantido a 650°C por 30min, e resfriado a T. Amb.	Barras a diferentes ciclos: 1, 3, 5 e 7	770°C por 5 min	Ar forçado por 3 min, fluxo de 2K/s até 680°C e depois resfriados até T. Amb.	Eficiente	
Mirelle Oliveira	2019	SAE 52100					Intercrítico	não cita	Taxa = ao dobro da convencional	
							Subcrítico	não cita	Taxa = 8 X maior que convencional	
							3 amostras com tempos de encharque de 1, 2		Ineficiente	

Nome	Ano	Aço	Etapas					
			Tempo Aquecimento	Temperatura de Austenitização	Condições de Resfriamento	Ciclos	Temperatura Aquecimento	Resfriamento Final
Chen-Chia Chou	1986	AISI 1045	15 min	950°C	Banho de Sal por 8s, seguida de têmpera para um banho de chumbo a 700°C para recozimento isotérmico e resf. a ar		e 3h (não cita temp.)	Eficiente
			15 min	950°C	Banho de Sal por 8s, seguida de têmpera para um banho de chumbo a 650°C para recozimento isotérmico e resf. a ar			

Fonte: (Adaptado de Herter, 2017; Saha, 2010; O'Brien, 2002; Lü, 2014; Lv et al, 2013; Oliveira, 2019; Chou, 1986)

Sista, Nash e Sahay (2007) aplicaram uma técnica de austêmpera cíclica para acelerar a transformação bainítica em aço 1080.

Sahay, Malhotra e Kolkhede (2003) observaram um comportamento acelerado de crescimento de grãos em um aço carbono laminado a frio e submetido ao recozimento cíclico.

Estabeleceu-se que a austenita contendo partículas finas de carbonetos pode sofrer reação de transformação eutetóide divorciada que produz uma estrutura esferoidizada em aço austenitizado a 830 °C e abaixo (VERHOEVEN; GIBSON, 1998).

Investigou-se a microestrutura e propriedades mecânicas de aços carbono com 0,16 0,6 e 1,24% de C durante tratamento térmico cíclico, obtendo acelerado processo de esferoidização (SAHA; MONDAL; BISWAS; MAITY, 2012).

Analisou-se a influência de deformação entre 873 K e 973 K em esferoidização, e o resultado demonstrou que deformação e taxa de resfriamento lenta são benéficos para o processo de esferoidização (ZHANG; SUN; DONG, 2006).

2.3 AÇO SAE 52100

52100 é um aço relativamente simples com 1% de carbono e 1,5% de cromo e pequenas quantidades de Mn e Si. O aço 52100 está em uso desde pelo menos 1905 (HENGERER, 1987).

O aço SAE 52100 consiste em um aço hipereutetóide ligado ao cromo, que apresenta elevada dureza (60 ± 2 HRC) após tratamento térmico adequado de têmpera seguido por revenimento (RAMESH *et al.*, 2005). A composição química do aço SAE 52100 é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química nominal do aço SAE 52100. Porcentagem por peso

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	O
0.93 - 1.05	0.25 - 0.45	≤ 0.025	≤ 0.015	0.15 - 0.35	1.35 - 1.60	≤ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.050	≤ 0.0015

Fonte: ASTM – A295 (1998)

A diferença entre o 52100 e outros aços com alto teor de carbono é seu alto teor de cromo. A adição de cromo é feita por várias razões, e um dos objetivos dessa adição é a temperabilidade, uma medida de quão rápido o aço deve ser resfriado em altas temperaturas para atingir a dureza total. Um aço carbono simples como o 1095 requer uma têmpera em água muito rápida para endurecer totalmente, onde uma fase de aço duro chamada martensita é formada. 1095 tem quase 1% de carbono como 52100, mas sem a adição de cromo. Se temperado em óleo lento ou resfriado ao ar, alguma quantidade de perlita se forma, o que reduz a dureza do aço em relação à martensita total. A perlita é uma combinação de 0,02% em peso de ferrita de carbono e 6,67% em peso de cementita de carbono (Fe_3C) que se forma em bandas alternadas, portanto, com um aço carbono simples, o carbono deve se difundir em uma distância curta para que as bandas de ferrita e cementita se formem. O cromo também é enriquecido na cementita, portanto, em um aço com liga de cromo, o cromo também deve se difundir na cementita para formar a perlita. O cromo é um átomo muito maior do que o carbono, por isso se difunde mais lentamente. Portanto, com a adição de cromo, a formação de perlita é suprimida e a temperabilidade é aumentada.

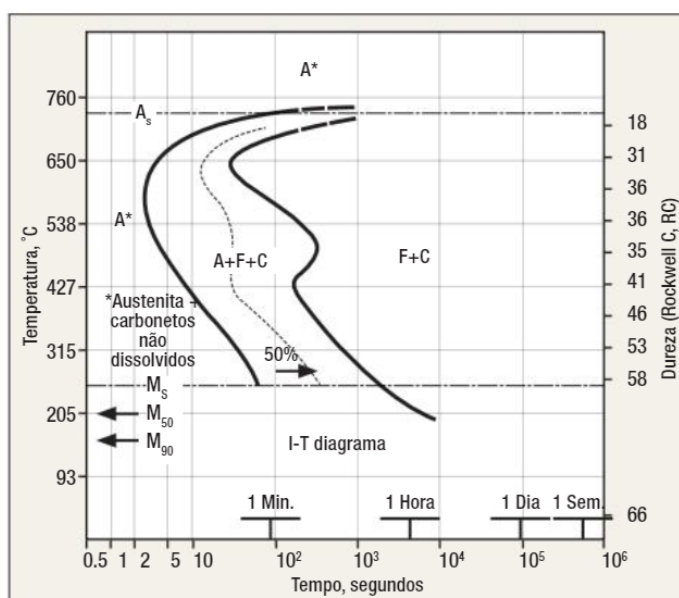
Uma versão superior de Mn foi introduzida em meados da década de 1930, e uma versão com liga de Mo após a Segunda Guerra Mundial (CAPPEL; JÜRGEN; WEINBERG; FLENDER, 2004).

A cementita em 52100 contém cerca de 9% em peso de cromo (STICKELS, 1974). Segundo (CHIAVERINI, 1988), o cromo (Cr) tem a função de aumentar a resistência à corrosão e à oxidação, aumentar a temperabilidade, melhorar a resistência a altas temperaturas e ainda a resistência ao desgaste. O elemento de liga manganês (Mn) permite controlar a fragilidade devida ao enxofre (S) e também confere aumento da endurecibilidade. Por fim, o elemento o silício (Si) atua como desoxidante, aumentando, também, a resistência à oxidação e endurecibilidade do aço.

Dentre os diversos tipos de aço de elevado carbono, o que apresenta maior predominância no mercado mundial para a fabricação de rolamentos, é o SAE 52100.

O aço SAE 52100 normalmente é fornecido na condição laminada a quente, com uma microestrutura perlítica incluindo a presença de cementita proeutetóide, oriunda dos contornos de grão da austenita. Em experimentos realizados por (BHADESHIA, 2001) pode-se notar que a cementita proeutetóide, quando formada nos contornos de grão da austenita, demonstrou afetar negativamente a vida em fadiga de rolamentos em testes conduzidos a tensões superiores a 5GPa.

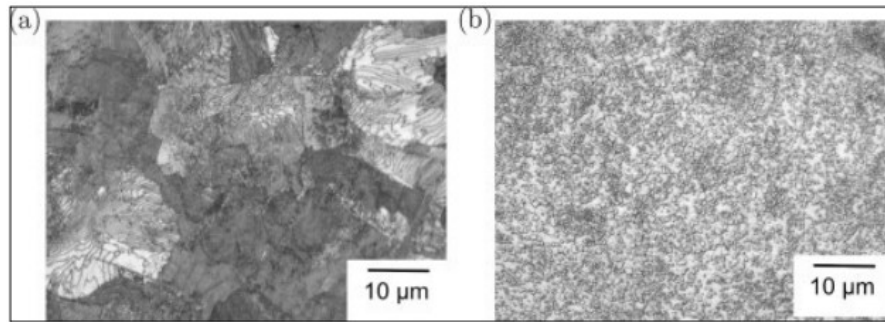
Figura 3 – Diagrama TTT Aço SAE 52100 Austenitizado a 844 °C



Fonte: Revista Industrial Heating (2016)

A microestrutura de um aço SAE 52100 pode ser observada na Figura 4. Em (a) a microestrutura após o processo de laminação e em (b), a microestrutura após a esferoidização.

Figura 4– Microestrutura aço SAE 52100 antes e após processo de esferoidização.



Fonte: Bhadeshia (2001)

Os aços SAE 52100 são facilmente temperáveis (óleo ou sal) e na sequência revenidos. Após esses tratamentos sua microestrutura típica passa a ser de matriz martensítica, com carbonetos primários (não dissolvidos durante austenitização) e austenita retida entre 5 e 15%. A dureza ao longo da seção de um aço rolamento temperado é normalmente de 60 a 64 HRC (GEMBALOVA; BORUTA; GRYCZ; CMIEL, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para realização deste trabalho, foi utilizado o aço SAE 52100, inicialmente fornecido em tarugos de ½ polegada, com composição química conforme estabelece a norma ASTM A295 - 98.

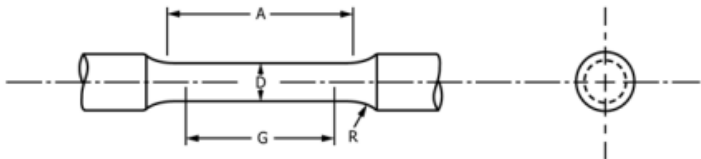
3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ensaio Mecânicos

Inicialmente foram usinados 12 corpos de prova (CP) para ensaio de tração, de acordo com as especificações da norma ASTM A370 (Figura 5) sendo 3 CP para caracterização de cada uma das etapas: do material sem a aplicação de tratamentos térmicos, do tratamento de esferoidização convencional, e para ambos os tratamentos cíclicos a serem executados. Desses corpos de prova usinados (Figura 6) foram retiradas amostras de aprox. 5 mm de espessura da seção, por meio de uma policorte (Figura 7) com disco de Carbetto de Silício tipo 230 X 1,5 X 19 mm, para metalografia e ensaio de dureza.

Todos os equipamentos utilizados nessa etapa são do laboratório de materiais H005 da UTFPR – campus Pato Branco.

Figura 5 – Dimensões dos corpos de prova recomendadas pela ASTM A370/ASME SA-370.



Nominal Diameter	DIMENSIONS									
	Standard Specimen				Small-Size Specimens Proportional to Standard					
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gauge length	2.00±	50.0 ±	1.400±	35.0 ±	1.000±	25.0 ±	0.640±	16.0 ±	0.450±	10.0 ±
	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10
D—Diameter (Note 1)	0.500±	12.5±	0.350±	8.75 ±	0.250±	6.25 ±	0.160±	4.00 ±	0.113±	2.50 ±
	0.010	0.25	0.007	0.18	0.005	0.12	0.003	0.08	0.002	0.05
R—Radius of fillet, min	3/8	10	1/4	6	3/16	5	5/32	4	3/32	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	60	1 3/4	45	1 1/4	32	3/4	20	5/8	16

Fonte: ASTM A370/ASME SA-370 (2019)

As dimensões utilizadas nos CPs estão em destaque na Tabela da Figura 5.

Figura 6 – Corpo de prova usinado



Fonte: Autoria Própria (2021)

Os CPs apresentaram em média massa, em gramas, de $86 \pm 0,25$. A usinagem dos CPs foi realizada em torno ROMI, utilizando uma rotação de 1000 rpm, para obter uma superfície o mais lisa possível. Após a usinagem os CPs foram lixados em lixa 200 para eliminar possíveis imperfeições do processo de usinagem.

Figura 7 – Policorte Arotec utilizada para retirada das amostras para caracterização metalográfica e ensaio de dureza



Fonte: Autoria Própria (2021)

Após obtenção das amostras, foram executados os ensaios de dureza Rockwell B e C (HRB e HRC) , por meio de equipamento de medição Digimess, mostrado na figura 8. Foram feitas 5 medidas para obtenção da média e desvio padrão.

Figura 8– Equipamento Digimess utilizado para medição de dureza



Fonte: Autoria Própria (2021)

Na sequência, as amostras foram submetidas a embutimento a quente, com baquelite, em uma embutidora metalográfica da arotec, modelo PRE – 30 S. A figura 9 nos mostra o equipamento utilizado, bem como algumas das amostras já embutidas.

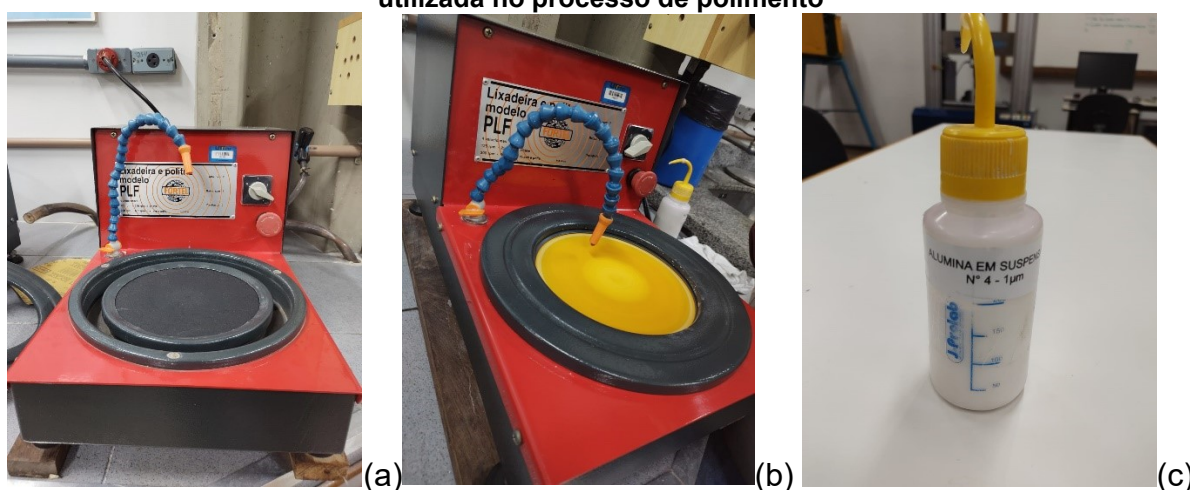
Figura 9 – Equipamento utilizado para embutimento a quente e amostras embutidas



Fonte: Autoria Própria (2021)

Posteriormente, através de uma lixadeira e politriz modelo PLF, da Fortel (figura 10), foram aplicados os processos de lixamento e polimento. As lixas usadas tinham granulometrias de 320, 400, 600 e 1200. Para o polimento, utilizou-se pano para polimento metalográfico e alumina em suspensão, 1 μ e 4 μ .

Figura 10 – Lixadeira e politriz utilizada (a) para lixamento (b) para polimento e (c) alumina utilizada no processo de polimento



Fonte: Autoria Própria (2021)

As amostras foram submetidas a ataque químico de Nital 3% em álcool isopropílico para viabilizar a análise metalográfica, feita por meio de microscópio óptico (Union Tokyo), com imagens capturadas por câmera para microscopia 5MP (Precision) e foi ainda utilizado um software para análise de imagens (TCapture), localizados no laboratório de ensaios dos materiais na Universidade, H005.

Os corpos de prova foram submetidos ensaios de tração, realizados em máquina universal de ensaios, conforme mostra a figura 11.

Figura 11 – Máquina universal de ensaios



Fonte: Aatoria Própria (2021)

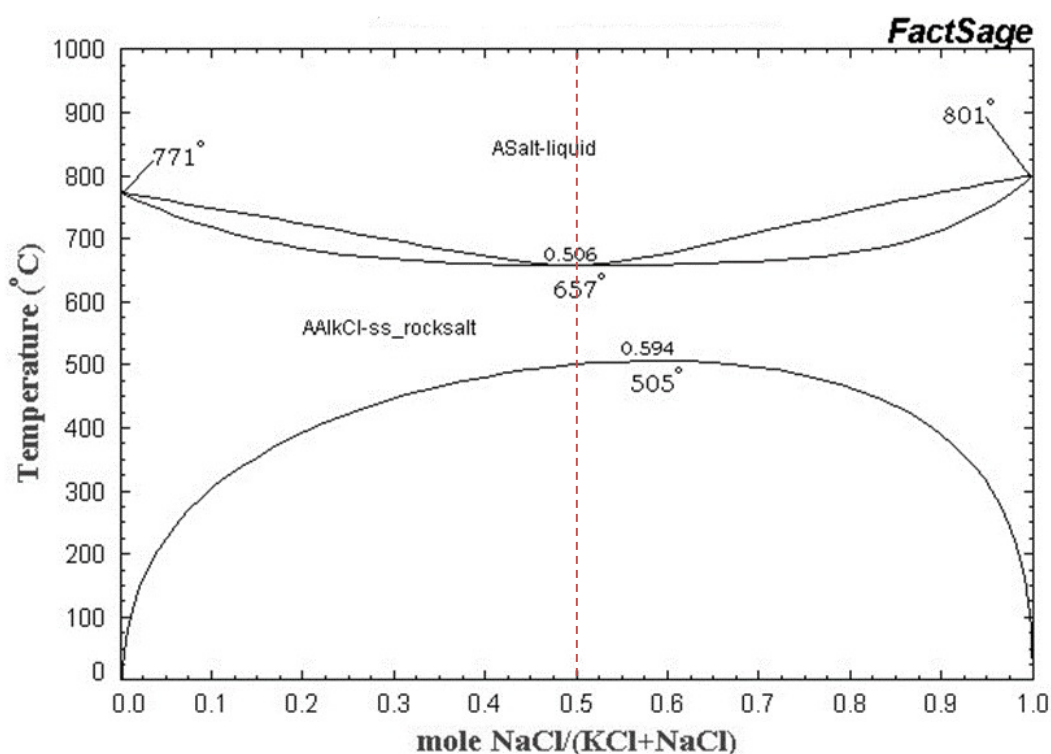
Vale ressaltar que foi feita a caracterização do material antes da aplicação dos tratamentos térmicos, visando ter um material de comparação após o processo de esferoidização. Todas as caracterizações do aço após esferoidização convencional, e esferoidização cíclica para 3 e 6 ciclos, foram feitas seguindo a mesma metodologia.

3.2.2 Tratamentos térmicos: Esferoidização Convencional

Passado o levantamento inicial, deu-se início a primeira parte do tratamento térmico, que é a aplicação do processo convencional de esferoidização, consistindo em elevar a temperatura do aço a 795 °C, manter por 30 minutos e em seguida resfriar a 690 °C em banho de sal, mantendo a essa temperatura por 16 horas.

Para a execução desse tratamento, o sal utilizado foi uma mistura de 500 g de NaCl + 620 g de KCl, de acordo com a proporção do eutético, de 0,5 em peso - tracejado vermelho na figura 12, que nos traz o diagrama de fases KCl – NaCl.

Figura 12 – Diagrama de Fases KCl - NaCl



Fonte: Adaptado de FactSage (2021)

Foi elaborado um suporte para os corpos de prova, com base no volume de sal necessário para resfriar três corpos de prova de 795 °C a 690 °C.

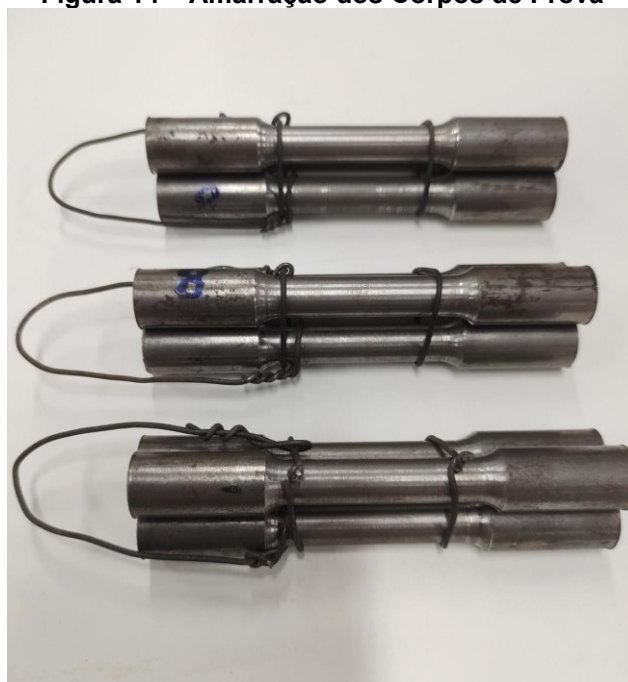
Com um diâmetro de 3", a altura deveria ser de no mínimo 11,44 cm. Adotamos um cilindro de 3,34" de diâmetro e 12 cm de altura, conforme apêndice A.

A figura 13 mostra o suporte fabricado, bem como a disposição dos corpos de prova para serem submetidos aos tratamentos térmicos.

Figura 13 – Suporte + Corpos de Prova

Fonte: Autoria Própria (2021)

Já na figura 14, tem-se a demonstração da amarração dos corpos de prova, feita com arame recozido de 1,8 mm.

Figura 14 – Amarração dos Corpos de Prova

Fonte: Autoria Própria (2021)

Para execução do tratamento, foram utilizados dois fornos mufla, como mostra a figura 15.

Figura 15 – Fornos Mufla

Fonte: Autoria Própria (2021)

Em um dos fornos, foram colocados o suporte com os corpos de prova e os sais, assim que a temperatura estabilizou em 795 °C, manteve-se essa temperatura por 30 minutos.

Figura 16 – Termopar Tipo K e Multímetro Utilizados Para Aferir as Temperaturas

Fonte: Autoria Própria (2021)

A figura 16 apresenta o multímetro e o termopar utilizado para verificar a variação de temperatura dos corpos de prova dentro do forno.

Passados 30 minutos a 795 °C, os corpos de prova foram transferidos ao outro forno, já aquecido a 690 °C, e mantidos lá por 16 horas. Ao fim desse período, desligou-se o forno e o material resfriou lentamente até alcançar a temperatura ambiente, finalizando assim o processo convencional de esferoidização.

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de dureza, tração e caracterizados quanto a metalografia, como já citado anteriormente.

3.2.3 Tratamentos térmicos: Esferoidização Cíclica

Com base na bibliografia estudada, decidiu-se fazer a esferoidização cíclica para 3 e 6 ciclos. Cada ciclo consistiu em submeter os corpos de prova a temperatura alta do ciclo por 10 minutos, resfriar a temperatura ambiente até alcançar a temperatura baixa do ciclo e então manter a temperatura baixa por 10 minutos, com exceção do primeiro ciclo que foi mantido a temperatura alta por 20 minutos, para que ocorresse a austenitização do material.

A temperatura alta do ciclo foi estabelecida em 790 °C, enquanto a temperatura baixa, em 700 °C.

Dessa vez, ao invés do resfriamento ocorrer em banho de sal como no tratamento convencional de esferoidização, utilizou-se uma combinação de 20% de grafita – 35 g, e 80% de carbetos de silício – 140 g, por terem boa condutividade térmica, além de manterem melhor integridade dos suportes utilizados e do forno, diferente do banho de sal, onde a superfície do aço usualmente precisa ser jateada após o tratamento térmico. Com a utilização do carbetos de silício e a grafita esse processo adicional de jateamento não se faz necessário, o que otimiza ainda mais o procedimento. Assim sendo, elaborou-se um novo suporte, com dimensões diferentes do primeiro suporte estabelecido, e o projeto do mesmo está demonstrado no apêndice B.

A temperatura dos corpos de prova dentro do forno foi aferida com o auxílio de termopares e multímetros, como mostra a figura 16, já a temperatura fora do forno foi aferida com auxílio de uma pistola, conforme mostra a figura 17.

Figura 17 – Pistola para aferir temperaturas

Fonte: Autoria Própria (2021)

Três corpos de prova foram submetidos a 3 ciclos e outros três a 6 ciclos. Ao final de cada série de ciclos, o material resfriou lentamente dentro do forno até 600 °C, manteve-se essa temperatura por 10 minutos, resfriou novamente de forma lenta dentro do forno até a temperatura final do campo perlítico de 430 °C, onde permaneceu por 1 hora, desligou-se o forno e deixou resfriar até a temperatura de 300 °C, posterior a isso, os corpos de prova foram retirados do forno e resfriados até a temperatura ambiente.

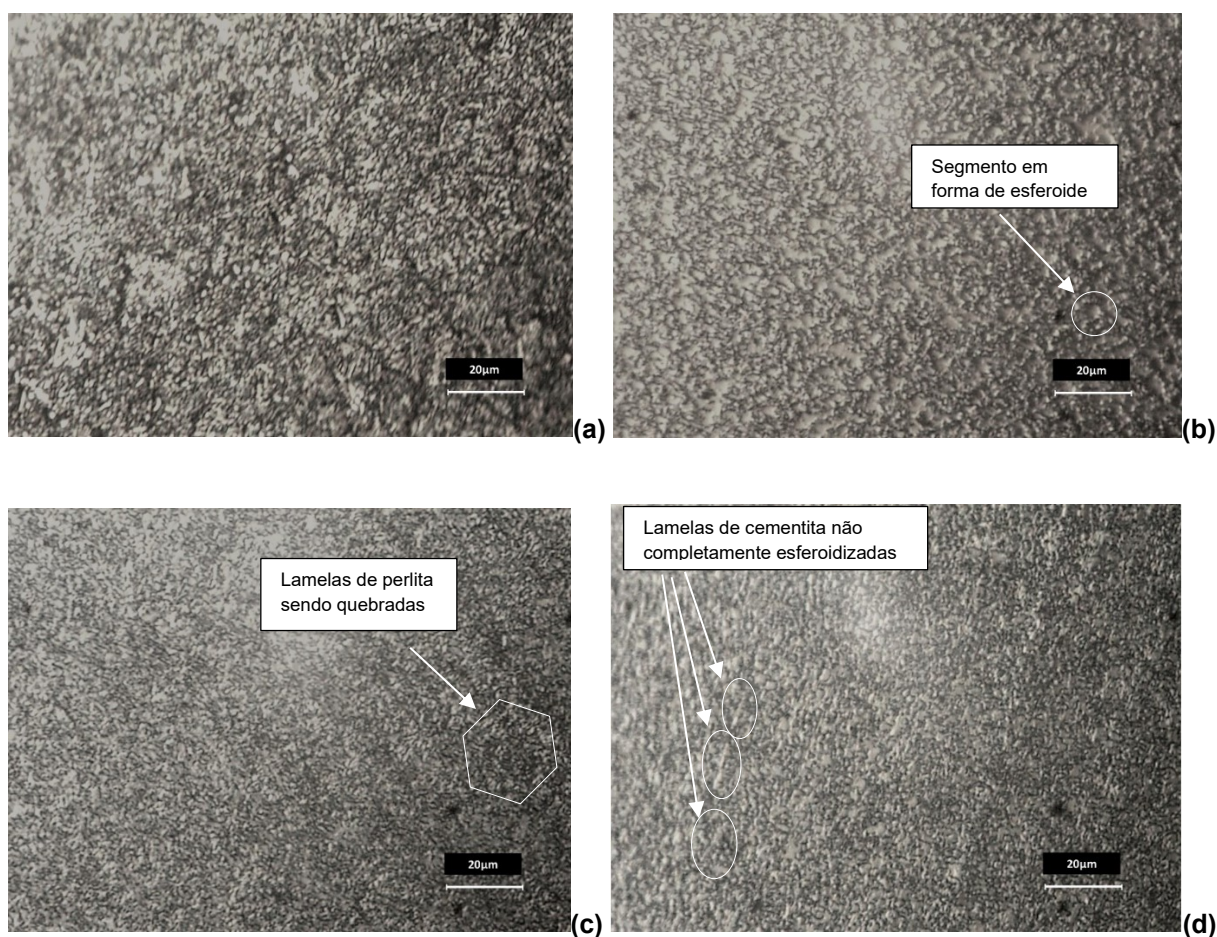
Mais uma vez, o material foi submetido aos ensaios de tração, dureza e caracterização metalográfica após os tratamentos de esferoidização cíclica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

O material foi caracterizado quanto a sua microestrutura antes da aplicação de tratamentos térmicos e após. A figura 18 mostra a metalografia obtida através de microscopia óptica, com aumento de 650X, das quatro condições analisadas.

Figura 18: Metalografia obtida através de microscopia óptica, com aumento de 650X: (a) material como recebido, (b) material esferoidizado convencionalmente, (c) material esferoidizado ciclicamente – 3 ciclos e (d) material esferoidizado ciclicamente – 6 ciclos.



Fonte: Autoria Própria (2021)

Na primeira etapa, analisando o material como recebido, sem a aplicação de tratamentos térmicos, de acordo com a Figura 18 (a), verificou-se uma microestrutura bruta oriunda do processo de solidificação. A fase escura é composta de cementita pró-eutetóide e a fase clara da imagem por perlita, sendo caracterizado como um aço

hipereutetóide. Os aços com aproximadamente 1% de carbono, acima da linha eutetóide, apresentam microestrutura composta por austenita e cementita proeutetóide. Abaixo dessa linha, considera-se cementita eutetóide e apresenta-se na forma de finas lamelas dispersa em uma matriz ferrítica, sendo denominada de perlita (DIETER, 1981).

Uma das alternativas utilizadas para diminuir os efeitos da cementita proeutetóide, consiste em submeter o material ao tratamento térmico, a fim de esferoidizar a cementita (CHATTOPADHYAY; SELLARS, 1982).

Já a figura 18 (b) mostra a micrografia obtida por meio de microscopia óptica (MO), com um aumento de 650X, após esferoidização convencional. Pode-se verificar que a maior parte da microestrutura apresenta segmentos em forma de esferóides, como destacado na imagem. A microestrutura apresenta cementita e os carbonetos dos elementos de liga em forma esferoidal dispersos na matriz ferrítica.

A imagem 18 (c) apresenta a metalografia obtida por MO do aço após aplicação de 3 ciclos de esferoidização, com um aumento de 650X, onde é possível verificar que a proporção de esferoidização do material já é bem significativa, identifica-se, em formato hexagonal, como destacado na imagem, as lamelas de cementita sendo quebradas no contorno de grão, que irão formar a esferoidita.

Lv *et al.* (2013), submetendo um aço de alto teor de carbono a 3 ciclos de 5 minutos a 770 °C e 3 minutos a 680 °C, obteve resultado semelhante ao deste trabalho, onde a maioria das lamelas de cementita se transformaram em esferóides de cementita, embora alguns desses esferóides tenham ficado incompletos.

De acordo com Rocha *et al.* (2000), as partículas localizadas nos contornos de grão serão favorecidas pela maior facilidade de difusão nestes locais (em virtude da maior quantidade de defeitos e conseqüentemente, uma maior energia disponível) obtendo-se, deste modo, um maior tamanho de carboneto nos contornos quando comparado com o tamanho dos carbonetos presentes no interior dos grãos.

Na esferoidização cíclica com 6 ciclos, como mostra a figura 18 (d), onde a parte cinza representa a matriz ferrítica e as mais claras os carbonetos esferoidizados, verifica-se uma menor quantidade de lamelas de cementitas em comparação ao tratamento com 3 ciclos. Logo, há maior formação de esferoiditas com 6 ciclos. Verificou-se, após a aplicação dos ciclos térmicos previstos, microestruturas formadas predominantemente por ferrita com carbonetos parcialmente ou totalmente esferoidizados, presentes no contorno e dentro do grão ferrítico. Como destacado na

figura 18 (d), observa-se a presença de algumas estruturas lamelares, típicas da perlita, mas em pequena quantidade.

Obteve-se no material sem tratamento térmico um alongamento médio de $22,62 \pm 1,4\%$, enquanto o limite de resistência a tração é de $758,65 \pm 12,3$ Mpa. Quanto a dureza média, temos o valor de 233 ± 4 HB. Luz (2017) apresenta que o limite de resistência a tração do aço SAE 52100 varia de 650 a 880 MPa, e o alongamento situa-se na faixa de 8 a 25%, de acordo com o tratamento térmico submetido.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para avaliar as propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza e de tração. Os valores de alongamento, dureza e resistência a tração obtidos, do material como recebido, esferoidizado convencionalmente, esferoidizado ciclicamente por 3 ciclos e esferoidizado ciclicamente por 6 ciclos, apresentam-se a seguir.

4.2.1 Alongamento

A tabela 7 mostra os valores encontrados para o alongamento em cada uma das condições, sendo C1 o material como recebido, C2 esferoidizado convencionalmente, C3 esferoidizado ciclicamente por 3 ciclos e C4 esferoidizado ciclicamente por 6 ciclos.

Tabela 7 – Alongamentos obtidos nas 4 condições analisadas

	Condição							
	C1		C2		C3		C4	
	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão
%								
Alongamento Encontrada	22,62	1,44	28,54	0,74	32,20	0,14	33,64	7,11

Fonte: Autoria Própria (2021)

Obteve-se no material sem tratamento térmico um alongamento médio de $22,62 \pm 1,4\%$, Luz (2017) apresenta que o alongamento do aço SAE 52100 situa-se na faixa de 8 a 25%, de acordo com o tratamento térmico submetido.

Após esferoidização convencional, obteve-se alongamento de $28,54 \pm 0,74\%$. De acordo com o site MatWeb (2021), após esferoidização convencional do aço SAE AISI 52100, alongamento esperado é de 27%. Furtado *et al.* (2018) apresenta um aço

SAE 52100 fornecido comercialmente, após esferoidização convencional, cujo alongamento está em torno de $25 \pm 1\%$.

O alongamento após 3 ciclos de esferoidização ficou em $32,2 \pm 0,14\%$. Lü *et al.* (2016), encontraram alongamentos de 21% a 25,5% na aplicação de 1 a 12 ciclos de esferoidização, com a temperatura alta de 750 °C por 5 minutos, e a temperatura baixa de 620 °C por 3 minutos, em um aço de médio teor de carbono. Como o aço desse trabalho é de alto teor de carbono, espera-se que mais esferoiditas se apresentem na microestrutura.

Em relação ao alongamento depois de 6 ciclos de esferoidização, observa-se um aumento, de $28,54 \pm 0,74\%$ com o tratamento convencional, para $33,6 \pm 1\%$. Lv *et al.* (2013), após 5 ciclos de esferoidização em aço de alto teor de carbono, apresentam dados de alongamento similares aos encontrados nesse experimento, em torno de 33,9%. Verifica-se que o alongamento atingido pela esferoidização cíclica com 6 ciclos, teve um aumento de cerca de 25% em relação ao apresentado pela literatura após esferoidização convencional.

4.2.2 Dureza

A tabela 8 mostra os valores encontrados com os ensaios de dureza em cada uma das condições, sendo C1 o material como recebido, C2 esferoidizado convencionalmente, C3 esferoidizado ciclicamente por 3 ciclos e C4 esferoidizado ciclicamente por 6 ciclos.

Tabela 8 – Valores de dureza obtidos nas 4 condições analisadas

	Condição							
	C1		C2		C3		C4	
	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	
Dureza Encontrada	21,5 HRC	89 HRB	86,5 HRB	88,5 HRB				
Dureza HB Equivalente	233 4	179 1	166,6 1	178 1				

Fonte: Autoria Própria (2021)

Apresenta-se para o material como recebido, antes da aplicação de tratamentos térmicos, a dureza média de 233 ± 4 HB. De acordo com site MatWeb (2021), a métrica de dureza para o material estudado, na condição de não tratado termicamente, encontra-se entre 183 e 212HB.

A esferoidização dos carbonetos presentes na microestrutura, reduziu significativamente a dureza, de 233 HB da estrutura inicialmente perlítica, para 179 ± 1 HB na estrutura quase totalmente esferoidizada, como o esperado, após esferoidização convencional. Valores de dureza de 212 HB foram encontrados por Carlan *et al.* (2017) em um corpo de prova em aço SAE 52100, utilizando um processo convencional de esferoidização. Ainda de acordo com o site MatWeb (2021), a métrica de dureza estabelecida para o aço estudado, esferoidizado convencionalmente, é de 210 HB.

De acordo com Fagundes (2006) a queda dos valores de dureza é decorrente da forma esférica adquirida pelos carbonetos durante o processo de esferoidização que ocorre para minimizar a relação entre energia livre de superfície e volume, assim, reduzindo a energia total do sistema.

A aplicação de 3 ciclos de esferoidização reduziu a dureza de 233 ± 4 HB da estrutura inicialmente perlítica, para 166 ± 1 HB na estrutura parcialmente esferoidizada, enquanto na aplicação de 6 ciclos nota-se que a dureza aumenta de 166 ± 1 HB para 178 ± 1 HB, ficando muito próxima da dureza adquirida através do tratamento convencional de esferoidização. Carlan *et al.* (2017) apresenta um corpo de prova em aço SAE 52100, esferoidizado ciclicamente, após 5 ciclos, com dureza de 187 HB.

4.2.3 Limite de Resistência a Tração

A tabela 9 mostra os valores encontrados para o limite de resistência a tração em cada uma das condições, sendo C1 o material como recebido, C2 esferoidizado convencionalmente, C3 esferoidizado ciclicamente por 3 ciclos e C4 esferoidizado ciclicamente por 6 ciclos.

Tabela 9 – Limites de resistência a tração obtidos nas 4 condições analisadas

	Condição							
	C1	Desvio Padrão	C2	Desvio Padrão	C3	Desvio Padrão	C4	Desvio Padrão
Limite de Resistência (MPa)								
Encontrado	758,66	12,29	603,87	6,19	626,45	8,07	638,60	7,11

Fonte: Aatoria Própria (2021)

Apresenta-se para o material antes da aplicação dos tratamentos térmicos, limite de resistência a tração de $758,65 \pm 12,3$ MPa. Luz (2017) apresenta que o limite de resistência a tração do aço SAE 52100 varia de 650 a 880 MPa, de acordo com o tratamento térmico submetido.

Da estrutura inicialmente perlítica, para a estrutura quase completamente esferoidizada convencionalmente, o limite de resistência a tração apresentado é de $603,87 \pm 6,19$ MPa. Segundo o site MatWeb (2021), valores métricos de resistência a tração nessas condições são de 700 MPa. Nota-se que o material apresentou uma redução de 20,4% em comparação ao material como recebido.

Para a esferoidização cíclica por 3 ciclos, o limite de resistência a tração ficou em $626,44 \pm 8,17$ MPa. Lv *et al.* (2013) em aço de alto teor de carbono, apresentam um limite de resistência a tração de 650 Mpa após a aplicação de 3 ciclos de esferoidização em aço de alto teor de carbono.

Quanto a esferoidização por 6 ciclos, para resistência a tração obteve-se um valor de $638 \pm 7,11$ MPa, um pouco acima da resistência para 3 ciclos, de $626,44 \pm 8,17$ MPa. Furtado *et al.* (2018) apresenta um aço SAE 52100 fornecido comercialmente, após esferoidização convencional, cujo σ_{RT} está em torno de 653 ± 7 MPa, verifica-se que os valores de σ_{RT} apresentados nesse trabalho estão bem próximos.

4.3 TEMPOS DE PROCESSOS

A tabela 10 mostra os tempos de processos, sendo P1 esferoidização convencional, P2 esferoidização cíclica por 3 ciclos e P3 esferoidização cíclica por 6 ciclos.

Tabela 9 – Tempos de Processos

	Processo		
	P1	P2	P3
Tempo (Minutos)	981	73	136

Fonte: Autoria Própria (2021)

O principal objetivo deste trabalho foi a redução dos tempos de processo de esferoidização convencional por meio da esferoidização cíclica. O processo

convencional aplicado teve duração de 16 horas e 21 minutos, enquanto a esferoidização cíclica com 3 ciclos teve duração de 1 hora e 13 minutos, o que representa uma redução de 92,55% no tempo total. Já a esferoidização por 6 ciclos durou 2 horas e 16 minutos, e por sua vez reduziu em 86,13% o tempo do processo de esferoidização.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral reduzir o tempo do tratamento térmico de esferoidização em aço de alto teor de carbono, por meio de esferoidização cíclica, em busca de propriedades similares aos dos tratamentos convencionais. Através dos resultados obtidos, conclui-se que a metodologia empregada foi eficaz, os parâmetros selecionados apresentaram-se satisfatórios, alcançando valores de dureza, alongamento e resistência a tração adequados com os que se esperam de materiais esferoidizados, e de acordo com a literatura encontrada.

A esferoidização com 3 ciclos apresentou bons resultados, considerando a redução de 15 horas e 8 minutos em comparação ao tratamento convencional (o tratamento convencional teve duração de 16 horas e 21 minutos, enquanto o processo com 3 ciclos foi realizado em 1 hora e 13 minutos).

O tratamento com 6 ciclos apresentou resultados satisfatórios, com dureza muito similar ao obtido por meio do tratamento convencional. A análise metalográfica mostrou que a microestrutura apresenta poucas lamelas de cementita não esferoidizadas, e que a esferoidização foi uniforme na amostra, com esferoidização inclusive dentro dos contornos de grão, com valores de alongamento adequados em relação ao que se esperava, de acordo com a literatura apresentada, e cumpriu-se o objetivo de reduzir o tempo do processo de esferoidização, que inicialmente foi de 16 horas e 21 minutos, terminando em 2 horas e 16 minutos com a aplicação de 6 ciclos, que representa uma redução de 86,13% no tempo total do tratamento.

Conclui-se que a utilização da combinação de grafita com carbetto de silício apresentou-se eficaz e vantajosa em relação ao banho de sal, visto que não se fez necessário o jateamento dos corpos de prova para sua posterior utilização.

A busca por aumento de produtividade, redução do consumo energético associado aos longos períodos que convencionalmente o tratamento de esferoidização requer, através das ferramentas que a engenharia proporciona, atender a premissa das indústrias de se fazer mais com menos, foram as necessidades que conferiam a base para esse trabalho, o qual foi concluído de maneira satisfatória.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como possível trabalho futuro avaliar as propriedades do mesmo material, aço SAE 52100, esferoidizado ciclicamente com os mesmos parâmetros desse trabalho, porém para números de ciclos superiores – 9 e 12 ciclos, para analisar o comportamento da microestrutura e das propriedades com o aumento no número de ciclos. Outra possibilidade de estudo é a aplicação dos parâmetros escolhidos no desenvolvimento deste, porém com uma diminuição no tempo de cada ciclo, e averiguar a possibilidade de se diminuir ainda mais o tempo do tratamento térmico de esferoidização cíclica.

REFERÊNCIAS

- ASTMB A370 – 19'1 STANDARD. **Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**¹, p. 7.
- BHADESHIA, H. **Bainite in Steels**. The Institute of Metals Communications, 2001.
- BRAMFITT, B. L.; HINGWE, A. K. Annealing of steel. In: AMERICAN SOCIETY OF METALS. **Metals Handbook**. 9. ed. Metals Park, Ohio: ASM, 1991. v. 4: Heat treatment, p. 42-55.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, Rio de Janeiro: LTC, 2020
- CAPPEL, J.; WEINBERG, M.; FLENDER, R. The metallurgy of roller-bearing steels. **Steel Grips**, v. 2, 2004, p. 261-268.
- CARLAN, G.; KIECKOW, G.; KIECKOW, F. **Rota Alternativa de Esferoidização no Aço SAE 52100**, CRICTE 2017.
- CHATTOPADHYAY, S.; SELLARS, C. M. **Acta Metall**, v. 30, 1982.
- CHIAVERINI, V. **Aços Carbono e Aços Liga**. 1955
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 7^a ed. 2005.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. ABM – São Paulo, 2008.
- DIETER, G. E.; **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill, 3rd Ed., New York, 1981.
- DINI, G. H.; **Estudo de Diferentes Ciclos de Tratamento Térmico de Esferoidização Para Aços da Família AISI 51XX** Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2017.
- FAGUNDES, E. J. **Análise da Influência do Ciclo de Recozimento de Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço SAE 1050** Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006.
- FACTSAGE. FTsalt – Fact Salt Phase Diagrams, 2021. Disponível em: https://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=KCl-NaCl.jpg&dir=FTsalt. Acesso em: 11 de novembro de 2021.
- FURTADO, A. E.; NASCIMENTO, D. F. L.; THEODORO, P. R. S.; TEODORO, W. S. Aços hipereutetóides para fabricação de rolamentos automotivos: estudo e caracterização do aço SAE 52100. In: XXVI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, **Blucher Engineering Proceedings**, v. 5, 2018, p. 202-217.
- FURUHARA, T.; MIZOGUCHI, T.; MAKI, T. **ISIJ**, 2005, p. 137-140.

GEMBALOVA, P.; BORUTA, J.; GRYCZ, E.; CMIEL, K.M. Hot forming parameters research of bearing steel. **Arch Civil Mech Eng**, p. 721-728, 2007

GOODCHILD, D. **Scand. J. Metall**, v. 1, 1972.

GUO, W. Y.; LI, J.; JIANG, X. F. Subcritical Spheroidization of Medium-Carbon 50CrV4 Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2012.

HENGERER, F. The history of SKF3. **Ball Bear. J.**, v. 231, 1987, p. 2-11.

HERNANDEZ-SILVA, D.; MORALES, R. D.; CABANAS-MORENO, J. G. **ISIJ Int.**, v. 32, 1992, p. 1297-1305.

HEWITT, W. **Heat Treatment Met.**, 1982, p. 56-62.

HOLTZMAN, A. H; DENKO, J. C.; STOUT, R. D. **Trans. TSM-AIME**, v. 212, 1958.

KALDOR, M. **Acta Metall**, v. 10, 1962.

KRAUSS, G. **STEELS - Processing, structure, and performance**. 2005.

KRAUSS, G. Steels: Heat Treatment and Processing Principles. **ASM International**, 1990, p. 108.

LÜ, Z. G.; ZHANG, H. F.; MENG, Q; WANG, Z. H.; FU, W. T. Effect of Cyclic Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. **Journal of iron and steel research**, 2016, p.145-150.

LUPTON, D. F.; WARRINGTON, D. H. **Met. Sci. J**, v. 6, 1972.

LUZ, Gelson. Aço SAE 52100 Propriedades Mecânicas. Blog Materiais, [s. L], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-52100-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 14 de Novembro de 2021.

LV, Z. Q.; WANG, B.; WANG, Z. H.; SUN, S. H.; FU, W. T. Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high carbon steel. **Materials Science and Engineering**, 2013, p. 143-148.

MATWEB. MatWeb Material Property Data, 2021. Ovako 100Cr6 803Q Steel, Spheroidize Annealing. Disponível em: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=6f99baa88cec477eba bc2ca957bc6a46. Acesso em: 14 de novembro de 2021.

MATWEB. MatWeb Material Property Data, 2021. Crucible Steel AISI 52100 Alloy Steel. Disponível em: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=3a8ad478fab2406aa 6449ef96cacac1e. Acesso em: 14 de novembro de 2021.

MONDAL, D.K; DEY, R.M. **Trans IIM**, v. 37, 1984, p. 351-356.

OH, S. Y.; SON, I.H.; JUNG, K.H.; KIM, D.K.; LEE, D.L.; IM, Y.T. **Mat. Sci. Eng.** v. 528, 2011, p. 5833.

PAQUETON, H.; PINEAU, A. **Iron Steel Inst.**, v. 209, 1971.

PARUSOV, V. V.; DOLZHENKOV, I. I.; EVSYUKOV, M. F. **Russ. Metall**, v. 3, 1978.

PAYSON, P.; HODPAPP, W. I.; LEEDER, J. **Trans. ASM**, n. 28, 1940.

RAMESH, A.; MELKOTE, S.N.; ALLARD, L.F.; RIESTER, L.; WATKINS, T.R. Analysis of white layers formed in hard turning of AISI 52100 steel. **Materials Science and Engineering: A**, v 390, n 1-2, 2005, p. 88-97.

REVISTA INDUSTRIAL HEATING, 2016.

ROBBINS, J. L.; SHEPARD, O. C.; SHERBY, O. D. **Iron Steel Inst.**, v. 202, 1964.

ROCHA, M. R.; OLIVEIRA, C. A. S. Avaliação dos Parâmetros Microestruturais de um Aço SAE 1045 esferoidizado e sua Correlação com as propriedades Mecânicas. **LV CONGRESSO ABM**. Rio de Janeiro, Jul. 2000.

ROSSI, H. E; COUTINHO, C. A. B. Influência das variáveis de processamento na esferoidização do aço SAE 52100. **Metallurgia-ABM**, v. 39, n. 310, 1983.

SACHS, G.; VAN HORN, K. R. **Practical Metallurgy, Applied Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys**, 1940.

SAHA, A; MONDAL, D.K; BISWAS, K.; MAITY, J. **Mater. Sci. Eng.**, 2012, p. 465-475.

SAHAY, S. S.; MALHOTRA, C. P.; KOLKHEDE, A. M. **Acta Mater.** v. 51, 2003, p. 339.

SHERBY, O. D.; HARRIGAN, M. J.; CHAMAGNE, L.; SAUVE, C. **Trans. ASM**, v. 62, 1969.

SILVA, A. L.; MEI, P. R., Aços e Ligas Especiais, 2. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2006.

SISTA, V.; NASH, P.; SAHAY, S. S. Accelerated bainitic transformation during cyclic austempering. **J Mater Sci**, v. 42, 2007, p. 9112.

STICKELS, C. A. Carbide refining heat treatments for 52100 bearing steel. **Metallurgical Transactions**, v. 5, n. 4, 1974, p. 865-874.

SWAHN, H. P.; BECKER, C.; VINGSBO, O. Martensite Decay During Rolling Contact Fatigue in Ball Bearings. **Metallurgical Transactions**, v. 07, n. 08, 1976, p. 1099-1110.

TIAN, Y. L.; WAYNE KRAFT, R. Mechanisms of pearlite spheroidization. **Metall Trans A**, 1987, p.1403-1414.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies [M]**. Boca Raton: CRC Press, 2007.

VAN VLACK, L. H. A. **Textbook of Materials Technology**. Addison-Wesley, 1973.

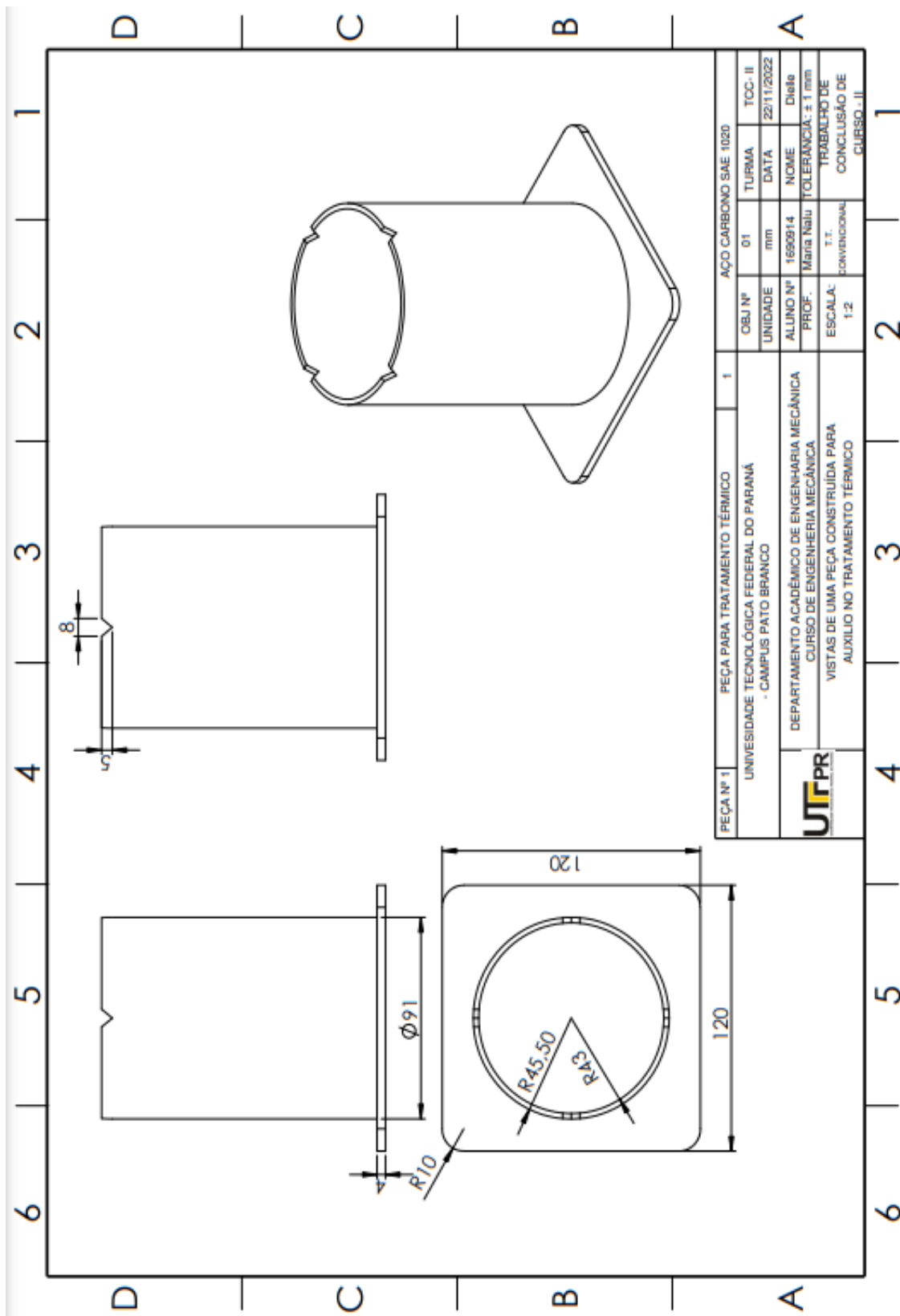
VEDULA, K. M.; HECKEL, R. W. **Metall. Trans.**, v. 1, 1970, p. 9.

VERHOEVEN, D.; GIBSON, E. D. **Met. Mat. Trans**, v. 29A, 1998.

ZHANG, S. L.; SUN, X. J.; DONG, H. Effect of deformation on the evolution of spheroidization for the ultra high carbon steel. **Materials Science and Engineering**, v. 432, 2006, p. 324-332.

ZHU, G.; ZHENG, G. Directly spheroidizing during hot deformation in GCr15 steels. **Front. Mater. Sci.**, v. 2, n. 1, 2008, p. 72-75.

APÊNDICE A – PROJETO DO SUPORTE PARA EXECUÇÃO DO TRATAMENTO
TÉRMICO CONVENCIONAL.



APÊNDICE B – PROJETO DO SUPORTE PARA EXECUÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO CÍCLICO.

