



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

ITALO MACIEL MELO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS
PROPRIEDADES E NO ESPAÇAMENTO ENTRE AS LAMELAS DA PERLITA NO
AÇO SAE 1075**

FORTALEZA

2022

ITALO MACIEL MELO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M485a Melo, Italo Maciel.

Análise da influência de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades e no espaçamento entre as lamelas da perlita no aço SAE 1075. / Italo Maciel Melo. – 2022.
38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.

1. Aço SAE 1075. 2. Aço carbono. 3. Distanciamento lamelar. 4. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 669

ITALO MACIEL MELO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS
PROPRIEDADES E NO ESPAÇAMENTO ENTRE AS LAMELAS DA PERLITA NO
AÇO SAE 1075

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Metalúrgica do Departamento de
Engenharia metalúrgica e de Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira
Gomes de Abreu.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Raimunda Silvana Maciel Souza, pela orientação, amor e carinho que me forneceu, e pela educação que me proporcionou.

A minha esposa, Anna Coutinho Maciel, pela companhia e amor no dia a dia e por não me deixar desistir dos meus objetivos.

A minha tia, Antônia Rivelania, por toda orientação, amor e suporte prestados nesses anos.

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, por toda a orientação durante a graduação, principalmente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Dr. Flávio Herculano, por toda orientação prestada durante o meu período de bolsista no LACAM e, principalmente, pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos programas e atividades extracurriculares que participei durante a graduação, PET Metalúrgica, Metal Soluções Jr e LACAM, pois me propiciou experiência e desenvolvimento pessoal e profissional.

A meus bons colegas e amigos, em especial, Antônio Francisco Maykel, Marcos Rinaldo Carvalho Cunha Junior e João Vitor, que foram um grande apoio emocional em meio a momentos difíceis de minha graduação além das reflexões, críticas e sugestões recebidas.

RESUMO

Os aços possuem uma grande relevância para os diversos setores do mundo, pois suas propriedades podem ser ajustadas por meio de processamento termo/mecânico e variações na sua composição, isso também faz com que eles possuam uma vasta aplicação. Este trabalho propõe-se a analisar as influências dos tratamentos térmicos isotérmicos, sob diferentes temperaturas isotérmicas, no espaçamento interlamelar da perlita formada no aço SAE 1075. Para isso, foram feitas análises qualitativas das micrografias registradas das diferentes amostras. Ademais, viu-se o que ocorre quando é feito o tratamento térmico de esferoidização, posteriormente ao isotérmico, e seu impacto na microestrutura e propriedades do material. Foi analisado também, a influência dessa diferença microestrutural que impacta nas propriedades mecânicas do material. Dessa forma, foram feitos ensaios de Microdureza Vickers com o objetivo de analisar esse impacto. Após tais análises, foi identificada a relação entre essas propriedades, pois viu-se que, quanto maior a temperatura isotérmica usada no tratamento térmico, maior será o espaçamento interlamelar, e isso acarreta em menor dureza do material.

Palavras-chave: Aço SAE 1075. Aço-carbono. Distanciamento interlamelar da perlita. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Steel has great relevance for the different sectors of the world, as its properties can be adjusted through thermo/mechanical processing and variations in its composition, which also makes them materials with wide application. This work aims to analyze the influence of isothermal heat treatment, under different isothermal temperatures, on the interlamellar spacing of pearlite formed in SAE 1075 steel. For this, qualitative analyzes of the micrographs recorded from the different samples were performed. In addition, it was seen what happens when the spheroidization heat treatment is performed, after the isothermal one, and its impact on the microstructure and properties of the material. It was also analyzed that this microstructural difference impacts on the mechanical properties of the material. Thus, Vickers Microhardness tests were carried out in order to analyze this impact. After such analyses, the relationship between these properties was identified, as it was seen that the higher the isothermal temperature used in the heat treatment, the greater the interlamellar spacing, and this causes a lower hardness to the material.

Keywords: SAE 1075 steel. Carbon steel. Interlamellar spacing of pearlite. Mechanical properties.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral.....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Aços-Carbono	11
3.1.1 Aços Hipoeutetóides	12
3.1.2 Aços Eutetóides.....	13
3.1.3 Aços Hipereutetóides.....	13
3.2 Transformações de fases	14
3.2.1 Ferrita	14
3.2.2 Perlita	14
3.2.3 Curvas ITT.....	14
3.2.4 Comportamento mecânico da perlita na liga Fe-C.....	17
3.2.5 Influência da distância interlamelar nas propriedades mecânicas	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Materiais	20
4.2 Métodos.....	21
4.2.1 Simulação termodinâmica.....	21
4.2.2 Preparação dos corpos de provas	21
4.2.3 Tratamentos térmicos.....	21
4.2.4 Preparação metalográfica	22
4.2.5 Microscopia óptica.....	22
4.2.6 Medição da distância interlamelar das amostras	23

4.2.8 Microdureza Vickers	23
4.2.9 Organograma.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1. Simulação termodinâmica	25
5.2. Micrografias	26
5.2.1 Amostra Como Recebida	26
5.2.2 Amostra 550	27
5.2.3 Amostra 700	28
5.2.4 Amostra 620	29
5.2.5 Amostra esferoidizada	30
5.2.6 Comparação entre as amostras 550, 600 e 700	31
5.3. Microdureza	33
5.4. Distância interlamelar	34
6. CONCLUSÃO.....	36
7. TRABALHOS FUTUROS.....	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Os aços e suas aplicações possuem uma grande relevância para os diversos setores econômicos e industriais do mundo, tendo em vista que suas propriedades são modificadas e adaptadas por simples variações de composição ou por meio de processamento térmico/mecânico que possa sofrer.

Os aços são ligas de ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga (CALLISTER, 2020), constituindo o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria (CHIAVERINI, 2012).

O desempenho do material está relacionado às suas propriedades, com isso, é importante entender sua estrutura e os fatores que a alteram. Os tratamentos térmicos são um exemplo disso, pois o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento sob condições controladas de temperatura, atmosfera, tempo e velocidade de resfriamento são capazes de modificar a estrutura do material, alterando assim suas propriedades para atender determinadas características desejadas.

Dessa forma, no decorrer deste trabalho, amostras de aço-carbono passaram por diferentes tratamentos térmicos, sob diferentes condições, para que se possa analisar o impacto desse processamento nas propriedades mecânicas existentes previamente e também identificar a alteração que ocorre na estrutura lamelar do material, mais especificamente, entender a alteração no espaçamento da lamela da perlita e o que isso acarreta.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Identificar e analisar os principais efeitos dos tratamentos térmicos isotérmico e esferoidização na propriedade mecânica de microdureza e no espaçamento entre as lamelas da perlita no Aço SAE 1075.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar tratamentos térmicos com o intuito de modificar a microestrutura do material;
- Analisar as variações microestruturais de acordo com os tratamentos térmicos realizados: isotérmico e esferoidização;
- Comparar os espaçamentos das lamelas da perlita das amostradas tratadas sob condições distintas.

Chiaverini (2012) considera o diagrama de equilíbrio Fe-C como o diagrama Fe-Fe₃C, pois a extremidade direita do diagrama representa 6,7% de carbono, que é a composição do Fe₃C.

O ponto C do diagrama (1148 °C) representa uma liga eutética, que possui 4,3% de carbono e é o menor ponto de fusão. Já o ponto S, é o ponto eutetóide, que possui 0,77% de carbono. As ligas que possuem essa composição são chamadas de eutetóides.

A forma alotrópica do ferro puro depende da temperatura, até 912 °C apresenta-se como alfa e entre 912 °C a 1394 °C apresenta-se como gama. Sabe-se que o ferro alfa apresenta reticulado cúbico de corpo centrado e o ferro gama reticulado cúbico de face centrada. Esse conhecimento é importante pois, assim, o ferro gama pode manter o carbono em solução enquanto o ferro alfa não. Com isso, a solução sólida do carbono no ferro gama se chama austenita, aparecendo apenas em temperaturas elevadas no diagrama de equilíbrio Fe-C.

A solubilidade do carbono no ferro gama é máxima a 1148 °C e corresponde a 2,11% de carbono. Essa solubilidade diminui com a queda da temperatura, chegando a 0,77% na temperatura de 727 °C (representada pela linha SECF na Figura 1). Entre as linhas SECF e SK há duas fases, ferro gama e carbono, nas formas de austenita e cementita, respectivamente.

Chiaverini (2012) considera como aço as ligas de Fe-C com carbono de 0,008% até 2,11%, acima disso é considerado ferro fundido e abaixo disso é considerado ferro comercialmente puro.

3.1.1 Aços Hipoeutetóides

São aços Fe-C com teores de carbono inferiores a 0,77%. Com o resfriamento iniciado acima de 727 °C, onde o carbono está dissolvido em solução sólida na austenita (ferro gama), o carbono difunde das bordas dos grãos austeníticos para o centro. A difusão do carbono aumenta o teor nesses pontos na austenita, chegando a atingir teores próximos de 0,77% de carbono. Entretanto, há o empobrecimento da

austenita nos contornos de grãos, e assim, precipita a ferrita. Com isso, pouco acima da linha A1 (727 °C), tem-se ferrita e austenita com um teor de carbono de 0,77%. O resfriamento lento do aço pela temperatura eutetóide transforma a austenita em perlita, de forma que a estrutura consiste na mistura de ferrita envolvendo núcleos de perlita.

3.1.2 Aços Eutetóides

São aços Fe-C que apresentam o teor de 0,77% de carbono em peso. A reação eutetóide consiste na transformação de austenita em ferrita e cementita e ocorre de forma lenta pois depende da difusão de carbono para os produtos da reação. A estrutura eutetóide é uma mistura dessas fases, sendo essa mistura denominada de perlita, que consiste em plaquetas alternadas de cementita e ferrita, conhecidas como lamelas.

3.1.3 Aços Hipereutetóides

São aços Fe-C com teor de carbono acima de 0,77%. Quando resfriado a partir da austenita, o carbono difunde do centro para a borda dos grãos, precipitando a cementita. A difusão do carbono diminui o teor no núcleo do grão austenítico para teores próximos a 0,77%, assim, o resfriamento pela temperatura eutetóide transforma a austenita em perlita, de forma que a estrutura formada é composta de cementita envolvendo núcleos de perlita.

Esses são exemplos de transformações de fase que ocorrem em condições de equilíbrio, todavia, normalmente essas transformações ocorrem em condições fora do equilíbrio, ou seja, em condições de resfriamento mais acelerado. Com isso, o tempo de transformação é uma importante variável, pois tem um efeito direto na microestrutura produzida e nas propriedades mecânicas do material. A microestrutura formada nessas condições fora do equilíbrio pode ser prevista em dois diagramas, o de Transformação Isotérmica (ITT – *Isothermal Time Transformation*) e o de Resfriamento Contínuo (CCT – *Continuous Cooling Transformation*).

3.2 Transformações de fases

A austenita pode ser transformada em outro constituinte por difusão, cisalhamento ou a mistura dos dois. A difusão ocorre de maneira mais lenta, devido à movimentação e rearranjo dos átomos, todavia, no caso de cisalhamento, ocorre por deformação da rede cristalina e é um processo quase instantâneo (SILVA, 2010).

3.2.1 Ferrita

É formada por meio do processo de difusão e nucleia, de preferência, nos contornos de grãos da austenita. Quando o resfriamento ocorre sob uma taxa maior, a ferrita também nucleia no interior do grão austenítico, e é conhecida pela nomenclatura Widmanstätten intragranular (SILVA, 2010).

3.2.2 Perlita

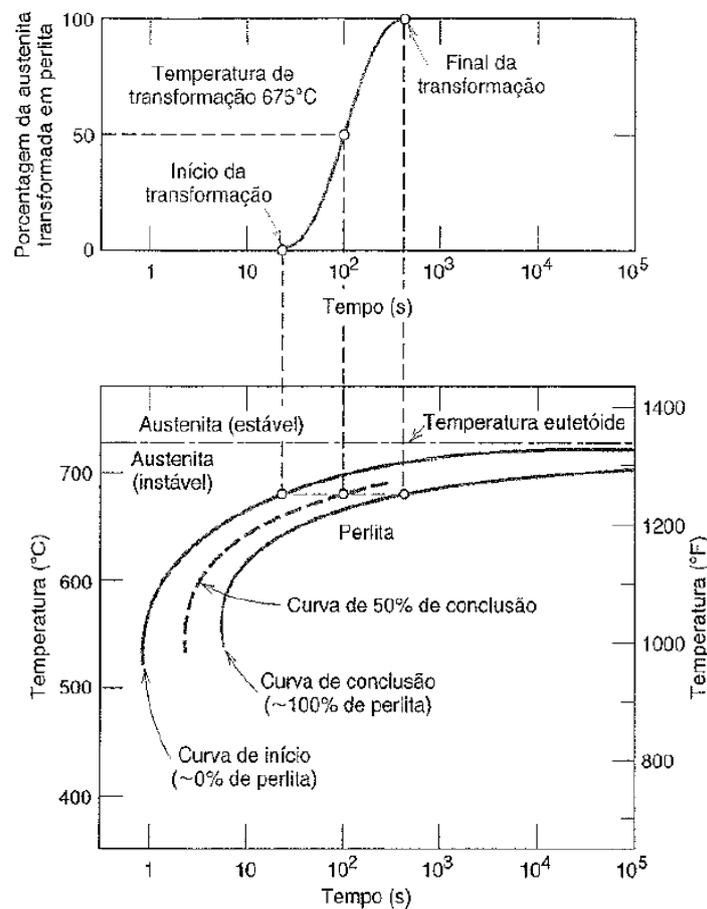
Resfriando um aço eutetóide a partir da temperatura de austenitização (727 °C), a austenita se transforma em ferrita (fase com baixo teor de carbono) e cementita (fase com alto teor de carbono). Portanto, perlita é uma mistura das duas fases, que ocorrem sob a forma de lamelas paralelas (SILVA, 2010).

3.2.3 Curvas ITT

A taxa de transformação da austenita para perlita é afetada principalmente pela temperatura. A Figura 2 evidencia essa dependência. A parte de cima da Figura 2 se refere a uma curva no formato de S que mostra a porcentagem de transformação em função do logaritmo do tempo. Já a parte de baixo da Figura 2, evidencia duas curvas contínuas, uma representa o tempo necessário a cada temperatura para o início da transformação e a outra, a conclusão da transformação (CALLISTER, 2020).

A transformação da austenita ocorrerá apenas se a liga for resfriada até abaixo da temperatura eutetóide. A Figura 2 também mostra que, à esquerda da curva de início da transformação, há apenas austenita, enquanto entre as duas curvas há a presença dos dois microconstituintes e à direita da curva de término de transformação há apenas a perlita.

Figura 2 - Diagrama de transformação isotérmica formado a partir de medições da porcentagem da transformação em função do logaritmo do tempo.



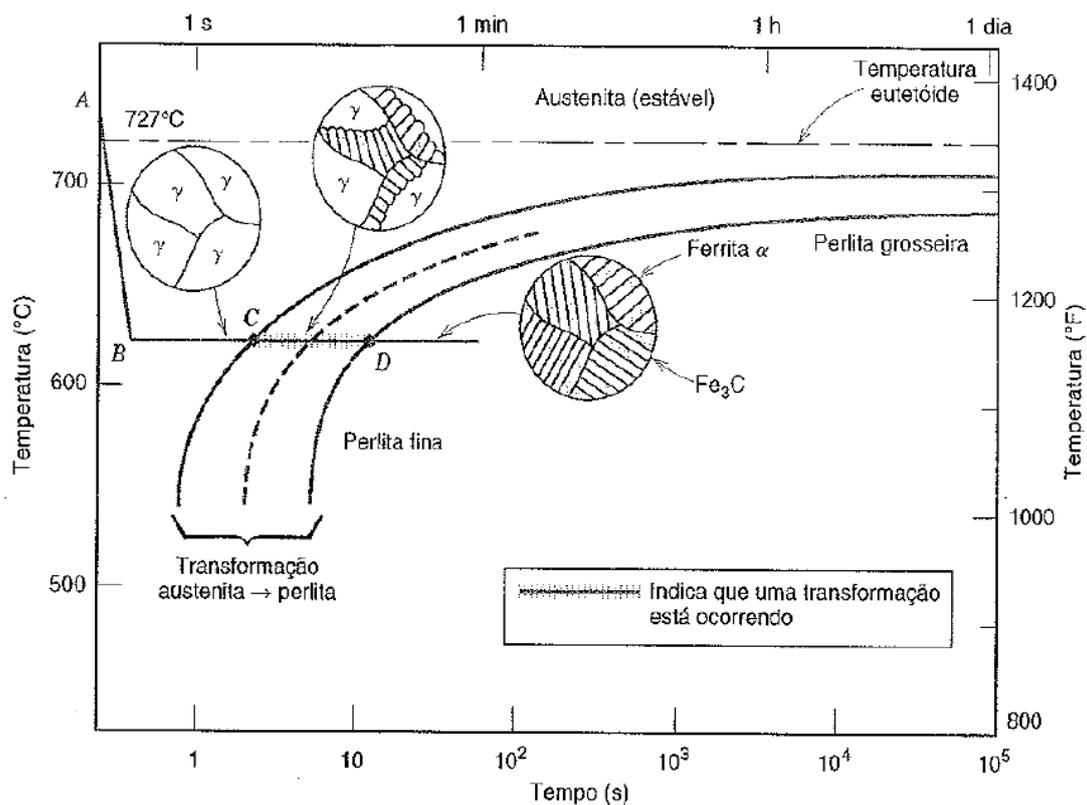
Fonte: Callister (2020).

A Figura 3 mostra outra curva de tratamento térmico isotérmico para uma liga eutetóide. Um resfriamento rápido a partir da austenita é indicado pela reta AB, enquanto a linha BCD representa o tratamento isotérmico. A Figura 3 também evidencia que podem ser formadas tanto perlita grossa como perlita fina, o que irá

diferenciar as duas é a espessura absoluta da camada formada, e isso depende da temperatura na qual foi realizada a transformação isotérmica (CALLISTER, 2020).

No caso de a temperatura ser imediatamente abaixo da temperatura eutetóide, as taxas de difusão são elevadas, permitindo que os átomos de carbono se difundam ao longo de grandes distâncias, resultando na formação de lamelas grossas. Todavia, à medida que a temperatura da transformação isotérmica for menor, a taxa de difusão do carbono diminui, diminuindo, também, a espessura da camada formada. Com isso, forma-se a perlita fina (CALLISTER, 2020).

Figura 3 - Diagrama de transformação isotérmica para uma liga de Fe-C eutetóide, evidenciando os diferentes tipos de perlita formados a depender do tempo e da temperatura a que foi exposto.



Fonte: Callister (2020).

Se a liga Fe-C apresentar outras composições (divergentes da eutetóide), uma fase proeutetóide, ferrita ou cementita, também existirá. Diante disso, no diagrama deverá ser incluído as curvas adicionais que se referem a transformação proeutetóide.

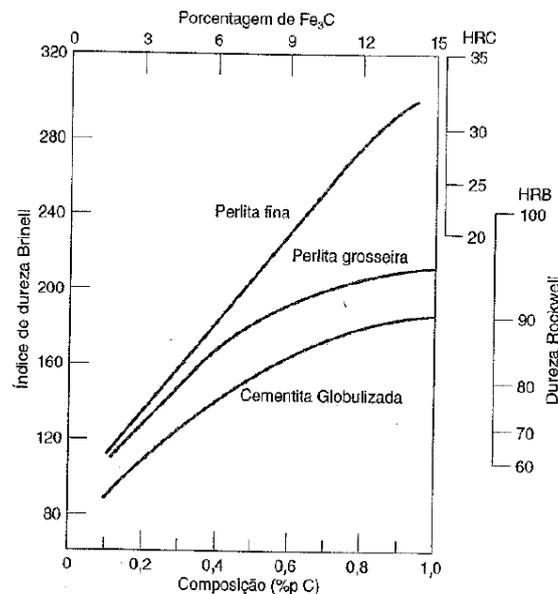
Diante do tratamento térmico isotérmico exposto e da importância da temperatura e do tempo no qual ficaram expostos, há um tratamento térmico complementar que está

relacionado ao tempo prolongado de exposição do material a determinada temperatura. Esse tratamento térmico é o chamado esferoidização e ele consiste em produzir uma forma esferoidal do carboneto de aço, visando melhorar a usinabilidade desse aço (CHIAVERINI, 2012).

3.2.4 Comportamento mecânico da perlita na liga Fe-C

A perlita fina apresenta maior dureza e resistência mecânica que a perlita grossa, como mostrado na Figura 4. Isso ocorre porque a perlita fina apresenta uma maior área de contornos de fases por unidade de volume do material, com isso, há mais barreiras dificultando os movimentos das discordâncias. Aliado a isso, há um elevado grau de aderência nos contornos entre as fases ferrita e cementita, fazendo com que a cementita restrinja a deformação da fase ferrita. Diante disso, o maior reforço e a maior restrição aos movimentos das discordâncias são os responsáveis pela dureza e resistência superior da perlita fina perante a perlita grossa (CALLISTER 2020).

Figura 4 - Comparação de dureza entre os três constituintes.



Fonte: Callister (2020).

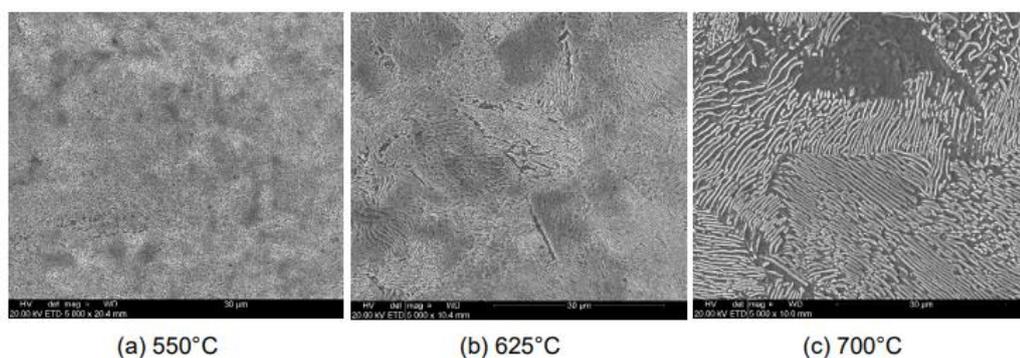
Além disso, os aços que possuem estrutura lamelar totalmente perlítica apresentam alta resistência à tração, todavia, sua utilização é limitada a rolamentos de altas cargas, pois possuem dificuldade de usinagem. Tal característica pode ser

ajustado via decomposição da perlita lamelar em uma microestrutura globular, por meio de recozimento de esferoidização. Além de melhorar a usinabilidade, esse tratamento térmico também aumenta a tenacidade, ductilidade e a resistência à fadiga. Para aços hipoeutetóides, a literatura evidencia que o recozimento subcrítico é o mais eficaz para essa transformação. O procedimento seria aquecer o aço abaixo da temperatura eutetóide mantendo-o nessa temperatura por um período prolongado de tempo, facilitando a decomposição das placas de cementita em esferas via minimização da energia interfacial (Amos, 2018).

3.2.5 Influência da distância interlamelar nas propriedades mecânicas

De acordo com um estudo desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP), onde um aço SAE 1080 foi exposto ao tratamento térmico isotérmico em diferentes temperaturas, viu-se que a distância interlamelar da perlita aumentou com o acréscimo da temperatura de tratamento isotérmico, isto é, a distância interlamelar da perlita é diretamente proporcional à temperatura de transformação, conforme a Figura 5 evidencia abaixo (CHAVES, 2016).

Figura 5 - Microestrutura de material tratado isotermicamente às temperaturas de 550°C, 625°C e 700°C.



Fonte: Chaves (2016).

Foi analisado também, sua influência na Microdureza Vickers do material, e viu-se que a distância interlamelar e a microdureza de uma estrutura perlítica são inversamente proporcionais.

Tabela 1: Relação entre espaçamento interlamelar médio da perlita e a microdureza do material.

TEMPERATURA DE TRATAMENTO ISOTÉRMICO (°C)	ESPAÇAMENTO INTERLAMELAR MÉDIO DA PERLITA (NM)	MICRODUREZA VICKERS (HV)
550	70	381
625	128	320
700	243	224

Fonte: CHAVES (2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, estão descritos os materiais, equipamentos e ensaios realizados para a obtenção dos objetivos definidos anteriormente.

4.1 Materiais

O material utilizado neste trabalho foi uma chapa de Aço SAE 1075 laminada a quente, com dimensões de 400 mm de comprimento, 100 mm de largura e 8 mm de espessura, cedido pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM).

De início, foi verificado a composição química do material, por meio do espectrômetro de emissão óptica PDA 7000 SHIMADZU, disponibilizado pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará.

A tabela 2 mostra as composições químicas encontradas nas duas medições realizadas. Quando comparadas com as composições químicas listadas no mercado identificou-se que seus valores se encaixam na composição química do aço 1075 classificado pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (*Society of Automotive Engineers – SAE*). Com isso, definiu-se que o material utilizado neste trabalho se refere a um aço alto carbono SAE 1075.

Tabela 2: Comparação entre a composição química padrão do aço SAE 1075 e a composição química identificada do material recebido.

% DE MASSA											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Al	Ti	Fe
SAE 1075	0,74	0,65	0,23	0,006	0,011	0,18	0,023	0,004	0,023	0,003	Bal.
AMOSTRA	0,73	0,77	0,23	0,004	0,017	0,039	0,025	0,005	0,038	-	Bal.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.2 Métodos

4.2.1 Simulação termodinâmica

Após determinação da composição química, a termodinâmica do material foi analisada. Inseriu-se a composição do material no software JMatPro®, disponibilizado pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), para que as curvas de transformações de fases (CCT E TTT) fossem elaboradas, sendo assim, possível definir em quais temperaturas os tratamentos térmicos serão feitos para ocorrer as fases desejadas.

4.2.2 Preparação dos corpos de provas

Os corpos de provas utilizados neste trabalho foram extraídos de uma placa de aço SAE 1075. O corte das amostras foi feito com o uso da serra fita com o suporte da morsa disponibilizado pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM). No total, cinco amostras foram cortadas, com dimensões aproximadas de 22 mm de comprimento, 6 mm de espessura e 10 mm de largura. Destas amostras, uma foi analisada como recebida e as demais passaram pelos tratamentos térmicos propostos.

4.2.3 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados em forno tipo mufla pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará.

As quatro amostras que passaram pelo tratamento térmico isotérmico, com base nas curvas extraídas do software JMatPro®, foram austenitizadas à 900 °C por 5 minutos, uma amostra de cada vez. Após isso, cada amostra foi transferida individualmente e imediatamente para o outro forno, também tipo mufla, que estava

ligado ao lado. A amostra denominada de 550, foi transferida para o segundo forno, no qual estava com temperatura de 550 °C, permanecendo no forno por 15 minutos e posteriormente foi retirado e resfriado ao ar. A amostra 620, foi transferida ao segundo forno enquanto este estava à temperatura de 620 °C, também permaneceu por 15 minutos e em seguida foi resfriada ao ar. Já a amostra 700, foi transferida ao segundo forno enquanto ele estava a temperatura de 700 °C e permaneceu pelo mesmo tempo das demais, sendo resfriado ao ar após isso. No caso da amostra 4, foi desejado fazer o tratamento térmico de esferoidização. Com isso, após austenitização à 900 °C durante 5 minutos, esta amostra foi transferida ao segundo forno enquanto ele estava à temperatura de 620 °C por uma duração de 5 horas.

4.2.4 Preparação metalográfica

A amostra como recebida, após o corte, passou por preparação metalográfica e as demais amostras foram preparadas posteriormente, mas no mesmo formato e padrão.

As peças foram lixadas em lixas d'água de diferentes granulometrias, sendo elas de 80, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, alternando em 90 graus a posição da peça a cada lixa trocada. A etapa seguinte, referente ao polimento, foram utilizados panos de feltro junto com pasta de diamante com granulometria de 3 µm e 1 µm como agente abrasivo. Por último, as amostras foram submetidas a um ataque químico com uso do reagente Nital (ácido nítrico, HNO₃, 5%) com tempo de imersão de 1 segundo, com o intuito de revelar as fases formadas nos tratamentos térmicos e analisar o distanciamento das lamelas da perlita.

4.2.5 Microscopia óptica

Após a preparação metalográfica, as amostras foram verificadas por meio de um microscópio óptico de luz visível, Zeiss, acoplado ao software integrado *Action Vision* e de um sistema de lentes para aquisição das imagens, disponibilizado pelo Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS).

O software integrado Action Vision possibilitou os ajustes de imagens e tornou possível a visualização e análise das fases encontradas neste trabalho.

4.2.6 Medição da distância interlamelar das amostras

A distância interlamelar foi medida por meio do software ImageJ®, de maneira similar à forma de medir os tamanhos de grãos. A medição foi feita com base na ISO 643:2012 e consiste em sobrepor 5 linhas sobre as micrografias e colocar pontos sobre as lamelas identificadas, com isso, é feita a medida da linha traçada e dividido pelo número de pontos colocados (espaçamento lamelar).

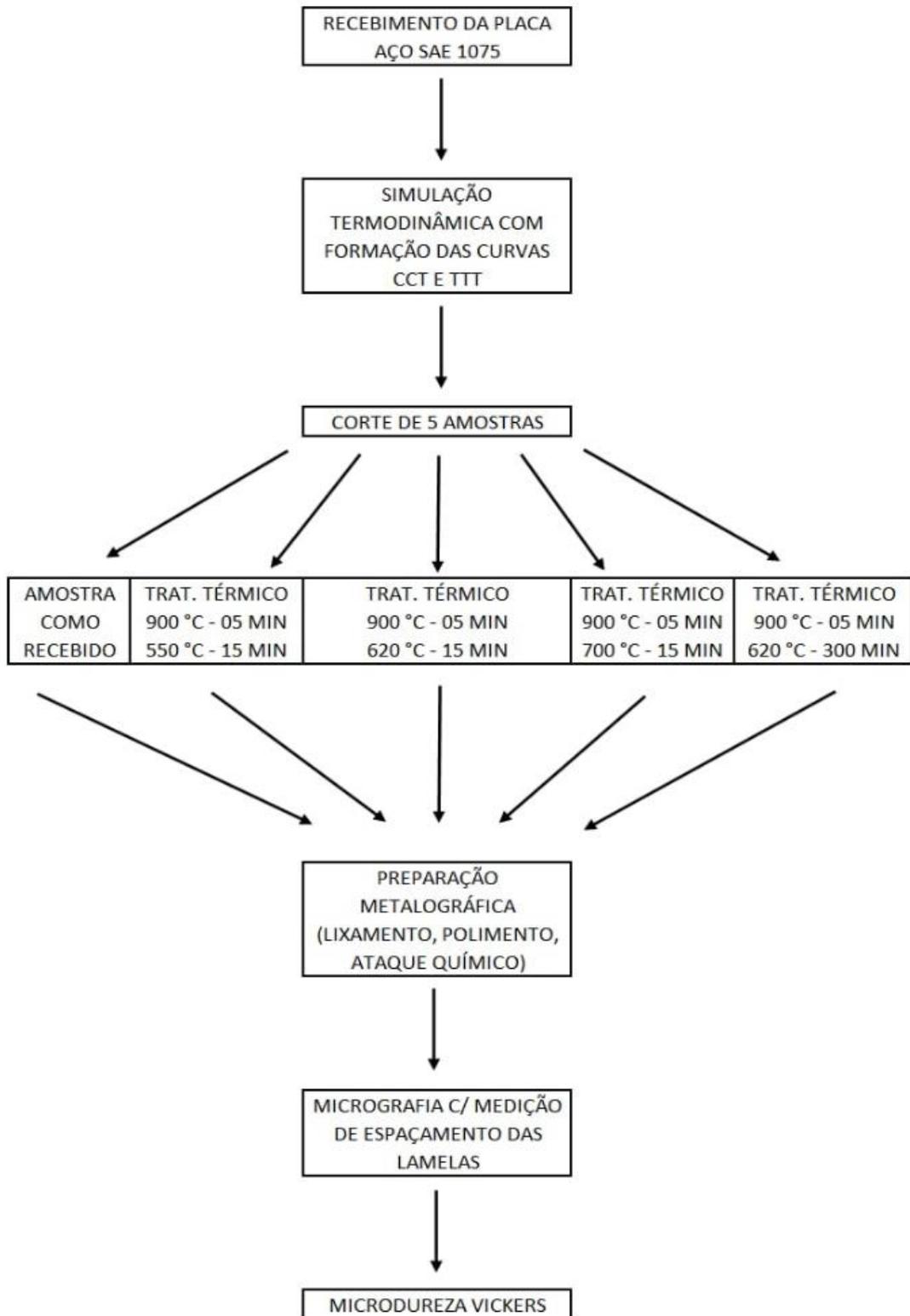
4.2.8 Microdureza Vickers

A Microdureza Vickers foi medida através do microdurômetro disponibilizado pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM). Foram feitas 5 medidas por amostra e descartadas as duas extremas de cada, afim de corrigir pequenos erros de medição e realizada a média das 3 medidas restantes. A carga utilizada foi de 9,8 kgf com uma penetração de 10 segundos.

4.2.9 Organograma

Foi elaborado um fluxograma para representar e resumir as atividades realizadas desde o recebimento da amostra.

Figura 6 - Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

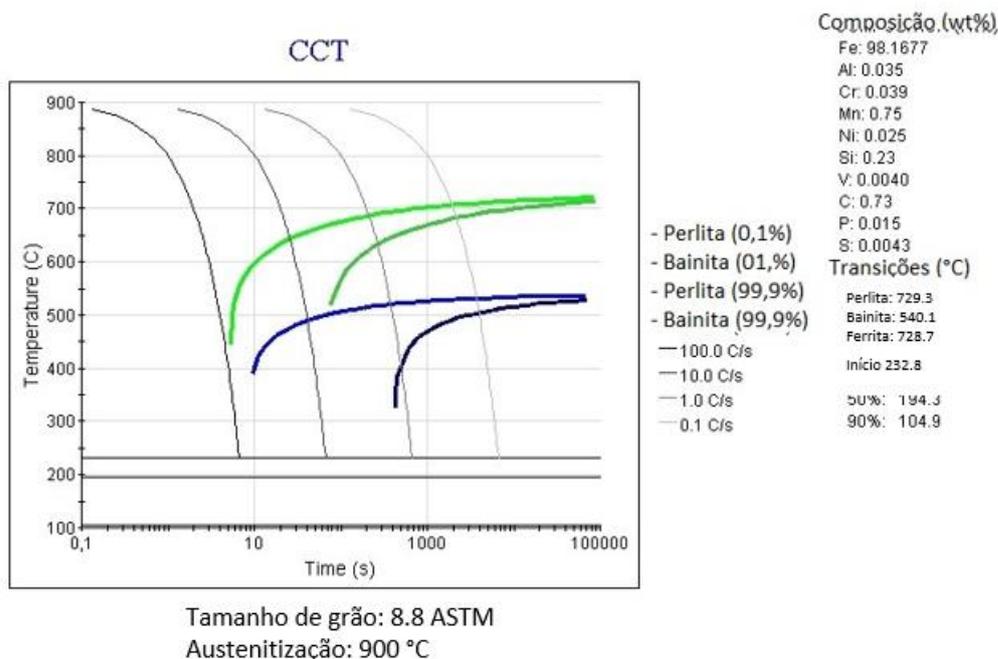
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Simulação termodinâmica

Sabendo a composição química do material, foi possível obter com o programa JMatPro® as curvas CTT e TTT do aço em questão, para possibilitar um maior entendimento sobre as fases e microconstituintes que podem ser formados. Após elaboração das curvas, viu-se que as fases desejadas para o aço em questão são perlita grossa, perlita fina e uma mistura desses dois tipos de perlita.

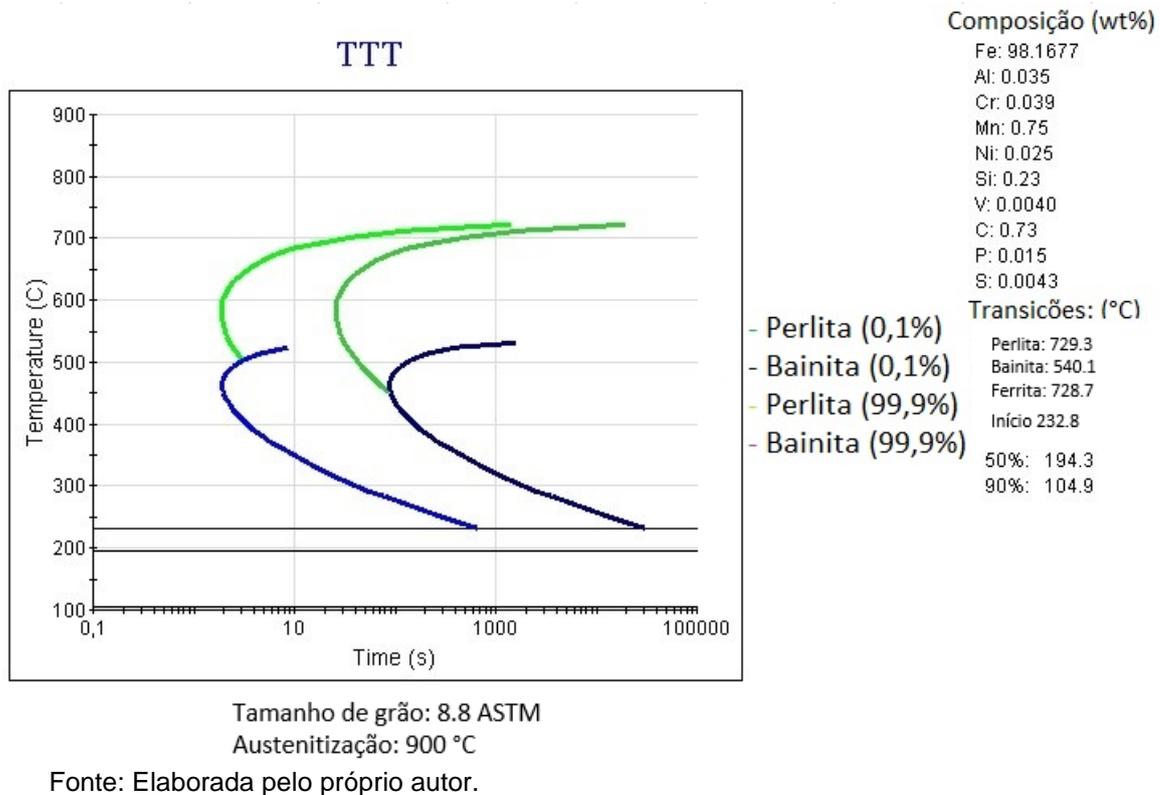
Dessa forma, a temperatura de austenitização a 900 °C foi definida e a segunda temperatura a ser usada no tratamento isotérmico foi definida com base no diagrama TTT: 700 °C para a formação de perlita grossa, 550 °C para formação de perlita fina e uma temperatura intermediária de 620 °C para a visualização das duas perlitas. Foi observado também que o tempo de 5 minutos para austenitizar e 15 minutos sob a temperatura isotérmica, é suficiente para a formação das fases desejadas.

Figura 7 - Curva CCT



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 8 - Curva TTT

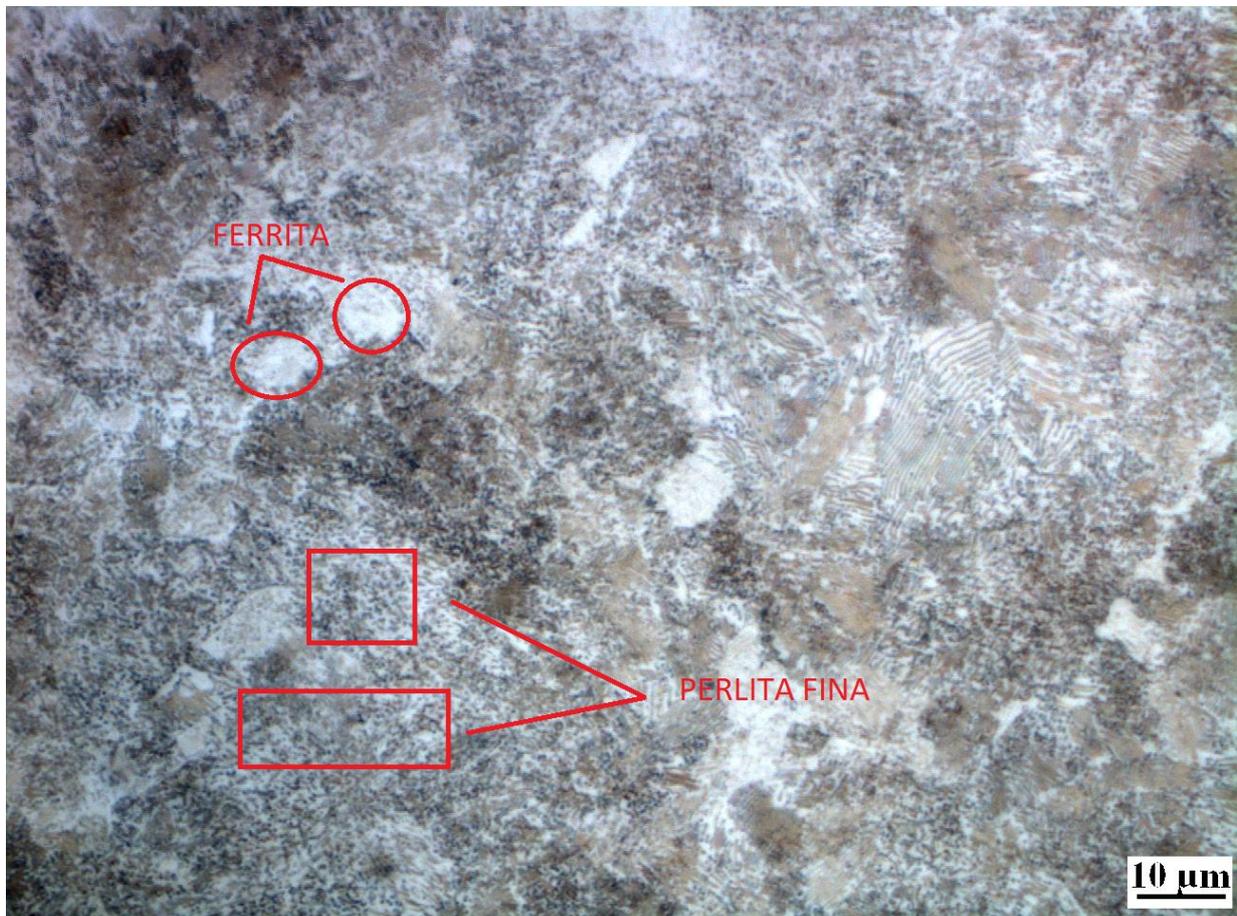


5.2. Micrografias

5.2.1 Amostra Como Recebida

Sabendo que a placa recebida passou pelo processo de laminação a quente, viu-se que a normalização é um tratamento térmico aplicado em peças depois de laminadas, pois este tratamento visa refinar a granulação grosseira e produzir estrutura mais uniforme que a obtida pela laminação. Os constituintes obtidos são ferrita e perlita fina, ou cementita e perlita fina. Também pode ocorrer a formação de bainita, dependendo do material (CHIAVERINI, 2012).

Figura 9 - MO da amostra como recebida.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

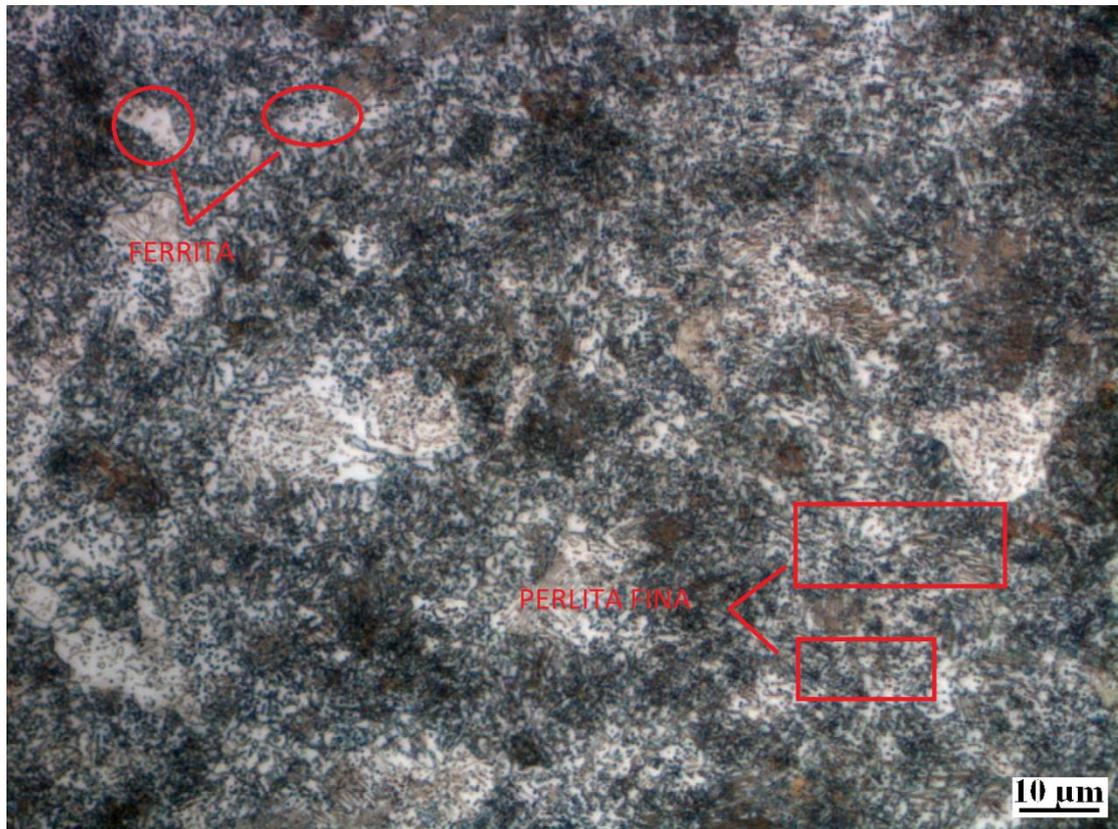
Na Figura 9 é possível ver a presença de ferrita e perlita fina, conforme estava previsto.

5.2.2 Amostra 550

A amostra que foi austenitizada a 900 °C e em seguida foi transferida para o forno com temperatura isotérmica de 550 °C, é esperado, com base na curva TTT do material, que os microconstituintes formados serão perlita fina e ferrita.

De acordo com o Callister (2020), quanto mais distante (menor) a temperatura isotérmica for da temperatura eutetóide, menor será a taxa de difusão do carbono, e, conseqüentemente, menor a espessura da camada formada, com isso, forma-se a perlita fina.

Figura 10 - MO da amostra a 550°C



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

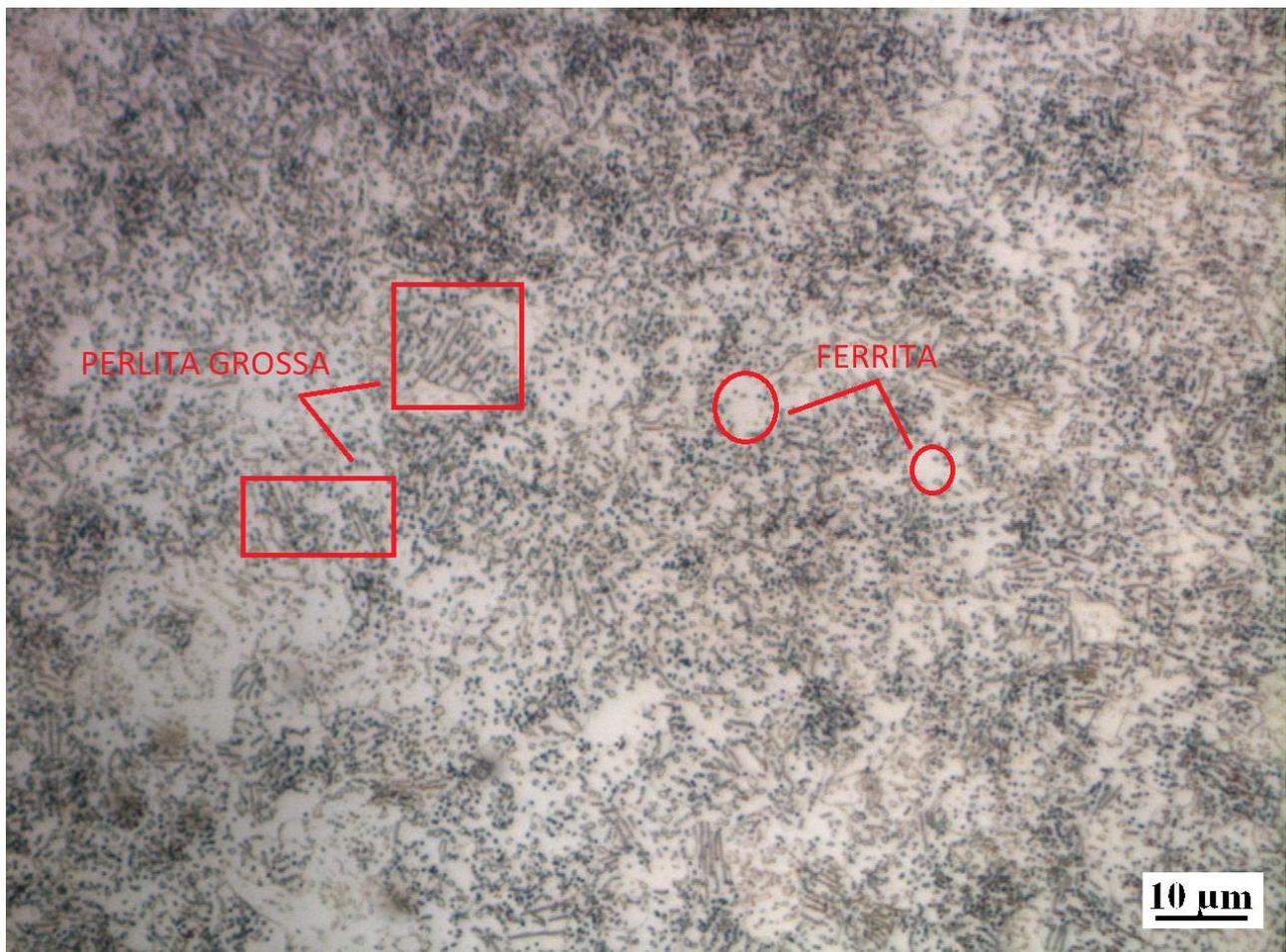
Na Figura 10, é possível ver a presença de ferrita e perlita fina (microconstituintes tão pequenos e próximos que suas lamelas não estão bem visíveis em sua maior parte), conforme estava previsto. Em virtude do seu tamanho, com o aumento utilizado no microscópio óptico, há uma dificuldade em visualizar as lamelas da perlita fina.

5.2.3 Amostra 700

A amostra que foi austenitizada a 900 °C e em seguida foi transferida para o forno com temperatura isotérmica de 700 °C, prevê-se, com base na curva TTT do material, que os microconstituintes formados serão perlita grossa e ferrita.

Ademais, de acordo com o Callister (2020), quanto maior a temperatura isotérmica (mais próxima da temperatura eutetóide), maior será a taxa de difusão do carbono, e, conseqüentemente, maior a espessura da camada formada, com isso, forma-se a perlita grossa.

Figura 11 - MO da amostra a 700 °C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 11, é possível identificar a presença de ferrita e perlita grossa (microconstituintes com maior espaçamento lamelar), conforme estava previsto.

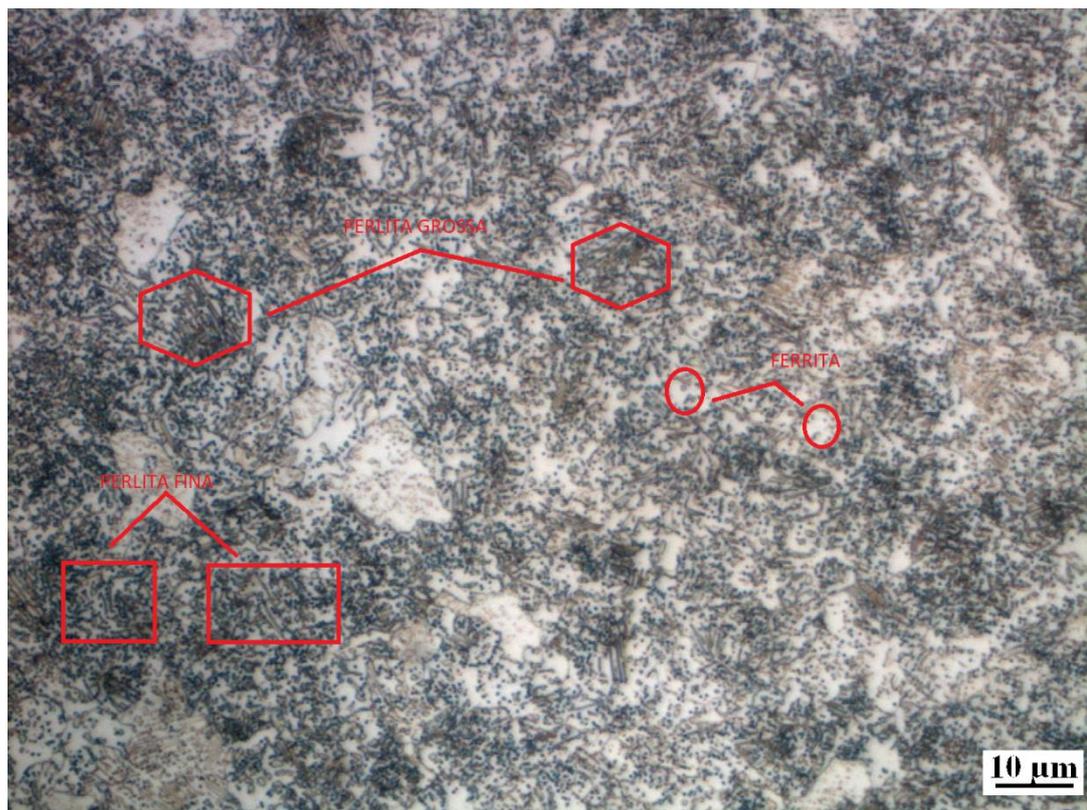
5.2.4 Amostra 620

A amostra que foi austenitizada a 900 °C e em seguida foi transferida para o forno com temperatura isotérmica de 620 °C, prevê-se, com base na curva TTT do material,

que os microconstituintes formados seriam uma mistura de perlita grossa com perlita fina e ferrita.

Callister (2020), evidencia que com o aumento da temperatura isotérmica, há o aumento da taxa de difusão do carbono, resultando em uma perlita com maior espessura da camada formada.

Figura 12 - MO da amostra a 620 °C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

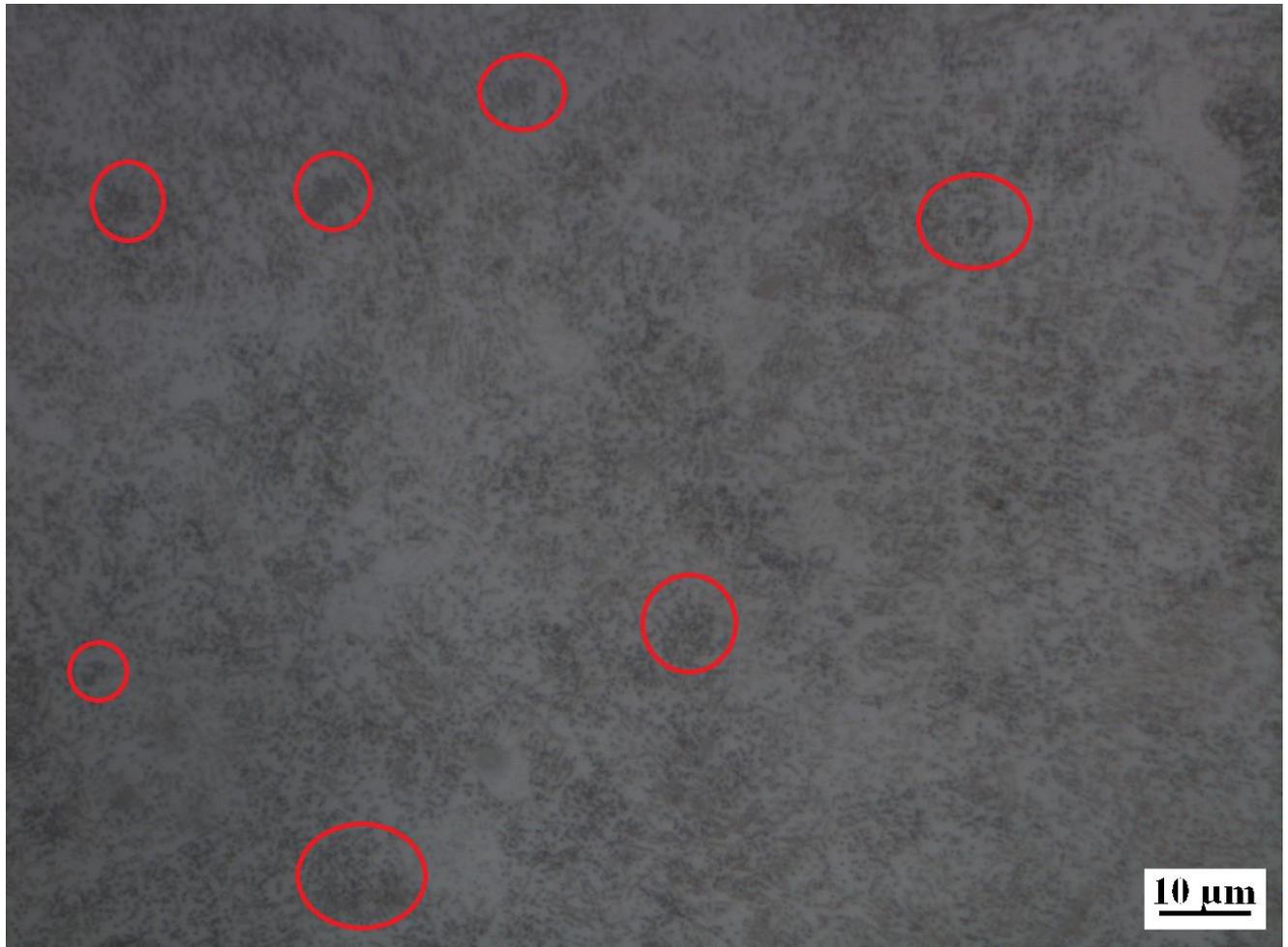
Na Figura 12, é possível identificar a presença de ferrita e perlita grossa e fina, conforme estava previsto.

5.2.5 Amostra esferoidizada

A amostra foi austenitizada a 900 °C e em seguida foi transferida para o forno com temperatura isotérmica de 620 °C e ficou 5 horas com o objetivo de formar esferoiditas. Com isso, há previsão de transformar as placas de perlita em esferas de

perlita, além disso, pelo fato de ser hipoeutetóide, há também a previsão de formação de ferrita (Amos, 2018).

Figura 13 - MO da amostra esferoidizada.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

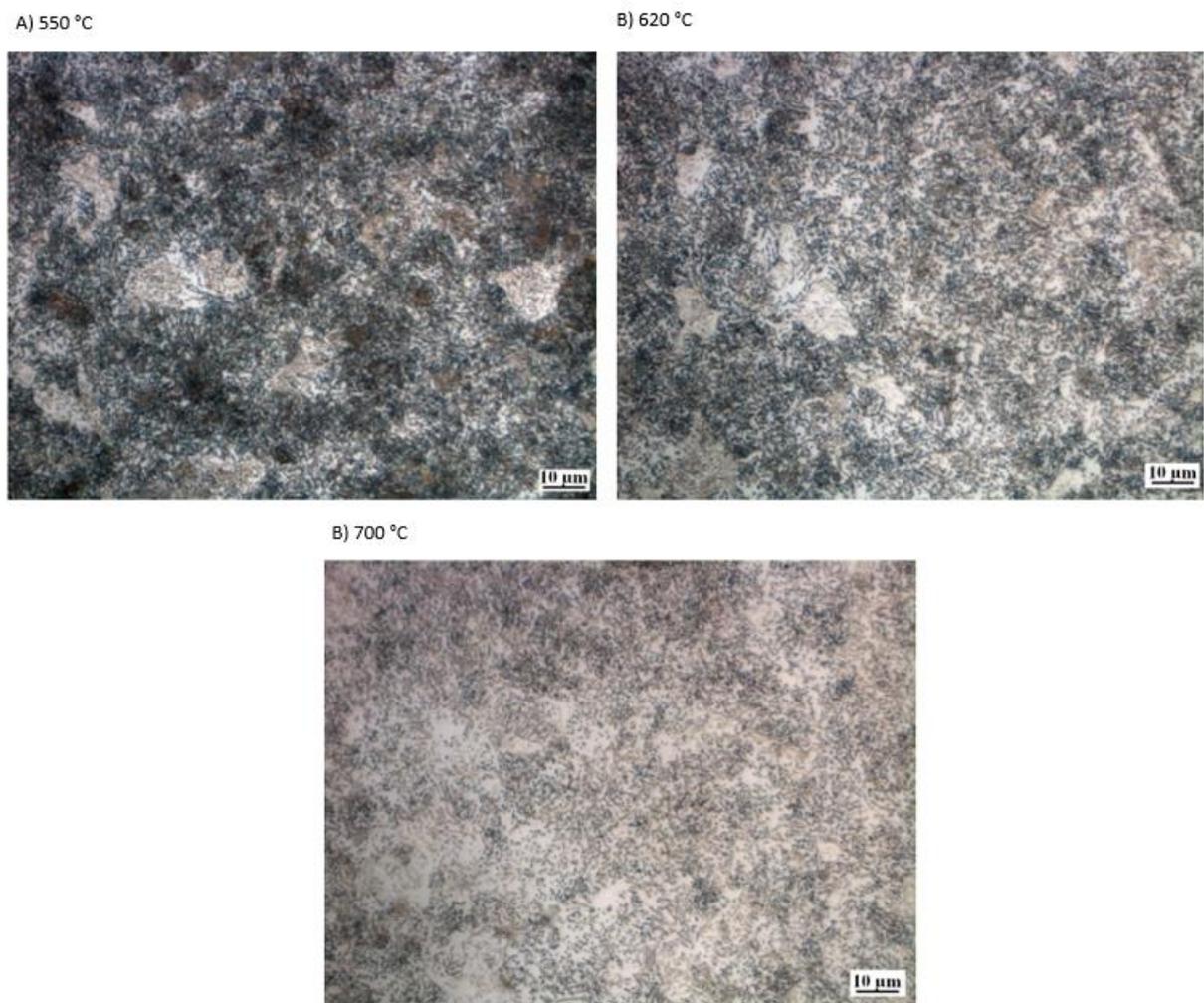
Na Figura 13, as marcações em círculo vermelho representam as esferoiditas de perlitas. Além disso, ainda há a presença de placas de perlita e também há presença de ferrita.

5.2.6 Comparação entre as amostras 550, 600 e 700

Na Figura 14, é possível visualizar, principalmente as diferenças entre os espaçamentos das lamelas da perlita, pois é visto microconstituintes mais escuros

(ferrita entre as lamelas da cementita menos evidentes) e mais próximos, com menor espaçamento interlamelar. Na Figura 14 B, nota-se que há microconstituintes mais claros (devida a ferrita entre as lamelas da cementita mais evidentes) e mais distantes, com isso, com um maior espaçamento interlamelar quando comparado a Figura 14 A. No caso da Figura 14 C, é observado que as perlitas apresentam camadas mais espessas e distantes entre si, com isso, a ferrita entre as lamelas estão mais visíveis. Portanto, viu-se que o resultado encontrado coincide com a literatura (CALLISTER, 2020), pois quanto maior a temperatura isotérmica no tratamento, maior as espessuras das lamelas da perlita e seu espaçamento interlamelar.

Figura 14 - Microestrutura de material tratado isotermicamente às temperaturas de A) 550 °C, B) 620 °C e C) 700 °C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.3. Microdureza

Realizado o ensaio de Microdureza Vickers, a Tabela 3 mostra o resultado das medidas. Como citado anteriormente, tendo em vista que a amostra como recebido passou por laminação a quente com posterior normalização, já era esperado que ela obtivesse a maior microdureza dentre as demais amostras.

Quando comparado as três amostras 550, 620 e 700, percebe-se um comportamento coerente. Isso porque a amostra 550 possui perlitas finas, com menor espaçamento interlamelar, e isso faz com que haja maior interação entre as lamelas da perlita e a ferrita, com isso, a lamela da perlita funciona como um bloqueio para as deformações, pois essa maior interação dificulta o movimento das discordâncias. Diante dessa dificuldade, vemos que essa amostra possui maior dureza e resistência mecânica. Já no caso da amostra 700, é o oposto, pois essa amostra possui perlitas grossas, com maior espaçamento interlamelar, diminuindo essa interação com a ferrita e tornando mais fácil o movimento das discordâncias. Devido a isso, a amostra 700 apresentou menor dureza entre as 3 amostras citadas. Em relação à amostra 620, sabe-se que possui uma microestrutura intermediária quando comparada às outras duas amostras, com a presença de perlitas finas e grossas. Com isso, esperava-se que essa amostra obtivesse a dureza intermediária entre as demais.

A amostra que sofreu o processo de esferoidização, era esperado que tivesse a menor dureza dentre todas as amostras analisadas, pois esse processamento é usado para aumentar a tenacidade e ductilidade dos materiais, e essas propriedades são inversamente proporcionais à dureza, isto é, sua dureza diminui. Isso ocorre, pois, esse tratamento consiste em transformar as placas de perlita em esferoiditas, assim, diminui a interação com a ferrita e torna o movimento das discordâncias mais fáceis (CHAVES, 2016).

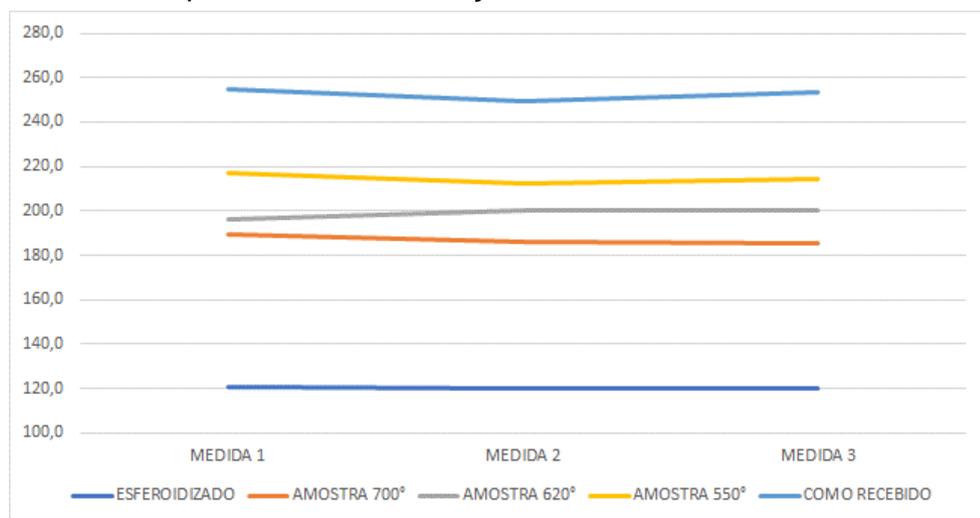
Tabela 3: Microdureza Vickers

MICRODUREZA VICKERS (HV)				
AMOSTRAS	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MÉDIA
ESFEROIDIZADO	120,6	120,1	120,1	120,3
AMOSTRA 700	189,2	186,3	185,4	187,0
AMOSTRA 620	196,0	200,1	200,1	198,7
AMOSTRA 550	216,7	212,1	214,4	214,4
COMO RECEBIDO	255,1	249,2	253,6	252,6

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O gráfico na Figura 15 representa a variação da medida de dureza encontrada e possibilita uma maior visualização da comparação do resultado das 5 amostras.

Figura 15 - Gráfico representando a variação das medidas de microdurezas vickers.



Elaborada pelo próprio autor.

5.4. Distância interlamelar

Realizada a medição da distância interlamelar das três amostras (550, 620 e 700), conforme Tabela 4, percebeu-se uma coerência com a bibliografia, pois viu-se que a amostra 550 apresentou a menor distância interlamelar, coincidindo com a microestrutura encontrada (perlita fina e ferrita) e com o resultado de microdureza obtido. Já a amostra 700, apresentou maior distância interlamelar dentre as 3, também sendo coerente com a microestrutura encontrada (perlita grossa e ferrita) e sua microdureza. No caso da amostra 620, viu-se o esperado, pois apresenta

microestrutura semelhante às duas amostras e uma dureza intermediária, com isso, era esperado que obtivesse um distanciamento interlamelar intermediário quando comparado com as outras duas amostras.

Tabela 4: Distância interlamelar das amostras.

	DIST. INTERLAMELAR
AMOSTRA 550	0,84 μm
AMOSTRA 620	1,44 μm
AMOSTRA 700	2,15 μm

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

6. CONCLUSÃO

Com o presente estudo, foi possível identificar e analisar as microestruturas formadas pelos tratamentos térmicos propostos sob diferentes condições. Viu-se também que há uma relação entre a temperatura de transformação isotérmica, a distância interlamelar das perlitas formadas e a dureza do material.

Observou-se que a diminuição da temperatura de transformação isotérmica resulta na redução do espaçamento interlamelar, e, essa redução da distância entre as lamelas da perlita afeta na melhoria da propriedade mecânica de dureza. Os resultados encontrados estão de acordo com a literatura exposta neste trabalho.

7. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é indicado realizar a medição do espaçamento interlamelar por meio do MEV, pois provavelmente resultará numa medida mais precisa, tendo em vista que os aumentos usados na microscopia óptica não evidenciaram com clareza as distâncias das lamelas da perlita. Ademais, seria interessante realizar o Ensaio de Impacto Charpy, pois como houve o tratamento de esferoidização, seria interessante comparar esse resultado entre a amostra como recebida e a amostra esferoidizada. Aconselha-se também realizar esses tratamentos térmicos há outros aços perlíticos semelhantes, para fazer uma comparação mais completa.

REFERÊNCIAS

- Amos, P. G. K.; Bhattacharya, A.; Nestler, B.; Ankit, K. – Mechanisms of pearlite spheroidization: Insights from 3D phase-field simulations – Acta Materialia, 161, 2018.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: ABM, 2012.
- CALLISTER, W. D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- David, F. H. S.; Paes, M. C.; Silva, L. M.; Silva, L. N.; Castro, U. D. - INC 0108 – EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA CONSTITUIÇÃO DA PERLITA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS COMUNS – INCNP.
- COSTA e SILVA, André Luiz V., MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 3 Ed. Editora Edgard Blücher, 2010.
- Chaves, A. P. G.; Goldenstein, H.; Sinatora, A. - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA INTERLAMELAR DA PERLITA NO DESGASTE POR DESLIZAMENTO EM ENSAIOS DO TIPO PINO-DISCO – 22º CBECiMat, 2016.
- COLPAERT, Hubertus et al. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Blucher, 2008.
- Rodrigues, K. F.; Mourão, G. M. M.; Faria, G. L. - CARACTERIZAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES ISOTÉRMICAS DE DECOMPOSIÇÃO AUSTENÍTICA EM TRÊS AÇOS DE APLICAÇÃO FERROVIÁRIA – abmweek 2018.
- Lima, F. J. N.; Machado, L. C; Oliveira, W. J. - Aplicação dos conceitos de transformações de fase em aços perlíticos – Escola Politécnica da USP.
- Santos, H. P. - CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS 1020, 1045, 5160, 8620 APÓS OS DETERMINADOS TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA, REVENIMENTO, NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO. – Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Ceará, 2021.

Silva, A. O. – INFLUÊNCIA DE DIVERSOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO 1045 – Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Ceará, 2021.

Zheng, H.; Fu, L.; Ji, X.; Ding, Y.; Wang, W.; Wen, M.; Shan, A. - Microstructural evolution and mechanical property of ultrafine-grained pearlitic steel by cold rolling: The influence of cementite morphology. – Material Science and Engineering: A, Vol. 824, 2021.