



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

RANNA ALVES FROTA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO INTERLAMELAR DA PERLITA
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 1080

FORTALEZA

2023.2

UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO INTERLAMELAR DA PERLITA
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 1080

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA

2023.2

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

- F961a Frota, Ranna Alves.
Uma análise da influência do espaçamento interlamelar da perlita : nas propriedades mecânicas do aço 1080 / Ranna Alves Frota. – 2023.
46 f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
Coorientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
1. Perlita. 2. Tratamento térmico. 3. Espaçamento interlamelar. 4. Propriedades mecânicas. I. Título.
CDD 669
-

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador Dr Marcelo José Gomes da Silva pela orientação e pelas oportunidades de vivenciar a área da pesquisa ao longo dos anos.

Ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), onde passei tantos anos como bolsista e onde adquirir conhecimento técnico.

Á Selimar, secretária do LEM, pelo trabalho de organizar o laboratório e tornar o dia de todos mais leve.

A PIBIC (CNPq), pelo incentivo e suporte financeiro.

Aos meus amigos, especialmente Brenda, Sarah, Gustavo, Eugênio, entre outros, pela parceria e pelo apoio moral para enfrentar as adversidades da vida.

Á minha mãe Izabel Cristina de Araújo Alves, e meus irmãos Raíssa Alves Frota e Ryan Alves Frota, por sempre se fazerem presentes na minha vida e apoiarem meus sonhos.

Aos meus avôs, por me criarem e me fazerem a pessoa que sou hoje.

Ao meu namorado Thiago Rodrigues Alencar, por ser a pessoa mais gentil e amável que eu poderia ter conhecido.

A Universidade Federal do Ceará (UFC) e aos laboratórios: LACAM, LPTS, LPC e Central Analítica.

Milagres apenas acontecem com pessoas
que não desistem.

(Eiichiro Oda)

RESUMO

Nos aço eutetóides de acordo com a norma 1080, os processos térmicos permitem a formação de diversas microestruturas, o que proporciona a esse tipo de aço distintas aplicações. Nesse contexto, surgem técnicas de tratamento térmico que possibilitam a obtenção da estrutura perlítica, a qual é caracterizada pela coexistência de duas fases compostas por camadas alternadas de cementita e ferrita. O espaçamento entre essas camadas da perlita desempenham um papel importante nas propriedades do aço que apresenta essa microestrutura. O objetivo desse estudo é avaliar como o espaçamento interlamelar da perlita afeta as características mecânicas do aço 1080 quando submetido a diferentes condições de tratamentos térmicos. A análise da estrutura microscópica das amostras foi realizada com a ajuda de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os resultados de dureza foram obtidos por meio de ensaio de microdureza Vickers (HV) e dureza Rockwell C (HRC). De acordo com os resultados, é possível afirmar que a temperatura de transformação exerce uma influência considerável no espaçamento interlamelar da perlita, que, ao diminuir, resulta em um aumento de microdureza.

Palavras-chave: Perlita. Tratamentos térmicos. Espaçamento interlamelar. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

In eutectoid steel in accordance with 1080 standard, thermal processes allow the formation of different microstructures, which provide this type of steel with different applications. In this context, heat treatment techniques emerge that make it possible to obtain the pearlitic structure, which is characterized by the coexistence of two phases composed of alternating layers of cementite and ferrite. The spacing between these layers of pearlite plays an important role in the property changes of the steel exhibiting this microstructure. The objective of this study is to evaluate how the interlayer spacing of pearlite affects the mechanical characteristics of 1080 steel when subjected to different heat treatment conditions. The analysis of the microscopic structure of the samples was carried out with the help of a scanning electron microscope. Hardness results were obtained using Vickers microhardness (HV) and Rockwell C hardness (HRC) tests. According to the results, it can be stated that the transformation temperature exerts a considerable influence on the interlayer spacing of the pearlite, which, when reduced, results in an increase in microhardness.

Keywords: Pearlite. Heat treatment. Interlamellar spacing. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Sistema ferro-carbono e suas principais fases sólidas | 15 |
| Figura 2 - Porcentagem da transformação versos tempo para diferente temperatura de transformação isotérmica..... | 17 |
| Figura 3 - Diagrama esquemático que indica que a perlita cresce como nódulos em um lado dos limites da austenita anterior e nos cantos dos grão..... | 19 |
| Figura 4 - Ilustração de vários espaçamentos interlamelares em uma estrutura perlítica ideal..... | 20 |
| Figura 5 - Ilustração de vários espaçamentos interlamelar em uma estrutura perlítica ideal. | 21 |
| Figura 6 - Ilustração da metodologia de medição do espaçamento interlamelar da perlita. | 23 |
| Figura 7 - Ilustração da metodologia de medição do espaçamento interlamelar da perlita por meio da equação acima..... | 23 |
| Figura -8 Diagrama TTT para o aço 1080..... | 27 |
| Figura 9 – Procedimento para medição do espaçamento interlamelar da perlita usando o software ImageJ. | 29 |
| Figura 10 – Micrografia da amostra na condição “como recebida” | 32 |
| Figura 11 – Micrografia das amostras austenitizadas a: a) FR1 1100°C e b) FR2 900°C, seguidos de resfriamento ao forno | 33 |
| Figura 12 – Histograma do espaçamento interlamelar da perlita da amostras: austenitizada a 1100°C e resfriada no forno; b) austenitizada a 900°C e resfriada no forno. | 34 |
| Figura 13 - Análise micrográfica das amostras austenitizadas a 1100°C e tratada isotermicamente: a) 650°C, b) 600°C e c) 550°C. | 35 |
| Figura 14 - Histograma do espaçamento interlamelar da perlita da amostra austenitizada a 1100°C e tratada isotermicamente a: a) 650°C, b) 600°C e C) 550°C. | 36 |
| Figura 15 - Análise micrográfica das amostras austenitizadas a 900°C e tratada isotermicamente: a) 650°C, b) 600°C e c) 550°C. | 37 |
| Figura 16 - Histograma do espaçamento interlamelar da perlita da amostra austenitizada a 900°C e tratada isotermicamente a: a) 650°C, b) 600°C e C) 550°C. | 38 |
| Figura 17 - Condição de tratamento em que as amostras foram austenitizadas a 1100°C e tratadas isotermicamente a 650, 600 e 550°C: a) microdureza Vickers (HV); b) os seus respectivos espaçamentos interlamelar. | 40 |
| Figura 18 - Condição de tratamento em que as amostras foram austenitizadas a 900°C e tratadas isotermicamente a 650, 600 e 550°C: a) microdureza Vickers (HV); b) os seus respectivos espaçamentos interlamelar. | 41 |

Figura 19 - a) Condição de tratamento das amostras resfriadas ao forno após o processo de austenitização a 1100°C (FR1) e 900°C (FR2): a) microdureza Vickers (HV); b) os seus respectivos espaçamentos interlamelar.....42

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Espaçamento interlamelar a diferentes taxas de resfriamento. | 24 |
| Tabela 2 - Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa. | 28 |
| Tabela 3 - Composição química do aço 1080 obtida por espectroscopia por emissão ótica. | 31 |
| Tabela 4 - Resumo dos resultados do espaçamento interlamelar da per- lita das diferentes condições de tratamento térmico. | 39 |
| Tabela 5 - Resumo dos resultados de microdureza Vickers e dureza Rockwell C da amostra como recebida e das amostras tratadas termicamente. | 43 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Introdução | 12 |
| 2. Objetivo geral..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1. Objetivos específicos..... | 14 |
| 3. Revisão de literatura | 15 |
| 3.1. Diagrama de fases: Sistema ferro-carbono..... | 15 |
| 3.2. Diagrama tempo - temperatura - transformação (TTT) e transformação com resfriamento contínuo (TRC) | 16 |
| 3.3. Formação da perlita | 18 |
| 3.4. Espaçamento interlamelar | 20 |
| 3.5. Estudos sobre o espaçamento interlamelar da perlita..... | 22 |
| 4. Metodologia..... | 26 |
| 4.1. Materiais | 26 |
| 4.2. Tratamentos térmicos..... | 27 |
| 4.3. Denominação das amostras | 28 |
| 4.4. Medição do Espaçamento Interlamelar da Perlita..... | 28 |
| 4.5. Caracterização Microstrutural | 29 |
| 4.5.1. Preparação de amostras para caracterização microestrutural..... | 29 |
| 4.5.2. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) | 30 |
| 4.5.3. Caracterização das Propriedades Mecânicas..... | 30 |
| 4.5.4. Ensaio de Microdureza Vickers | 30 |
| 4.5.5. Ensaio de Dureza Rockwell C..... | 30 |
| 5. Resultados | 31 |
| 5.1. Análise química | 31 |
| 5.2. Resultado da micrografia | 31 |
| 5.3. Resultado de microdureza..... | 40 |
| 6. Conclusão... .. | 44 |
| Referências..... | 45 |

1. INTRODUÇÃO

Os aços 1080 possuem em sua composição química um teor de carbono que varia entre 0,75% a 0,88% em peso e também contem os elementos Maganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S) em concentrações específicas. Quando submetidos a tratamentos adequados, esse tipo de aço pode desenvolver uma microestrutura chamada perlita. Devido a tal fato, eles são amplamente aplicados na indústria, em virtude às suas propriedades satisfatórias.

De acordo com o autor Krauss (2015), os aços perlíticos são frequentemente utilizados na fabricação de trilhos ferroviários. Durante sua operação, esses trilhos são submetidos a cargas cíclicas, bem como ao aumento do tamanho e da velocidade dos trens utilizados. Esses fatores exigem abordagens de fabricação e técnicas metalúrgicas que visam compensar o desgaste e outros tipos de falhas que podem limitar a vida útil dos trilhos.

Durante as transformações ocorridas sob tratamento térmico isotérmico, resfriamento contínuo ou velocidade direcional forçada, os aços tem a capacidade de gerar perlita, que é resultado da decomposição eutetóide. A microestrutura da perlita consiste em camadas de cementita encaixadas dentro do domínio da ferrita, e a distância entre essas camadas é conhecida como espaço interlamelar. Vários fatores, tais como a temperatura de austenitização, o tamanho dos grãos austeníticos, a temperatura do tratamento isotérmico, as condições do meio e a taxa de resfriamento, podem influenciar as características microestruturais da perlita. Portanto, é possível provocar alterações no espaçamento interlamelar da perlita (RIDLEY, 1983).

Diversos métodos são empregados por pesquisadores para medir o espaçamento interlamelar. Esses esforços visam obter resultados precisos que podem contribuir para a compreensão de como essa característica influencia nas variações das propriedades dos aços. Um exemplo é o estudo conduzido por (RODRIGUES, 2019), no qual ele investigou a relação entre a microdureza e a variação do espaçamento interlamelar em diferentes tipos de aços eutetóides destinados a aplicações ferroviárias.

Segundo (HOWELL, 1998), nos primeiros anos após a descoberta da perlita, houve uma proliferação de teorias e ideias relacionada aos mecanismos subjacentes a sua formação. Contudo, mesmo na atualidade, a perlita continua sendo objeto de investigações contínuas e é incorporada a novas áreas de conhecimento à medida que surgem, como é no caso da modelagem e simulação. Nesse contexto, os pesquisadores (QIAO *et al.* 2021) conduziram um estudo no qual aplicaram Machine Learning para antecipar os efeitos dos elementos da liga durante o processo de tratamento isotérmico de aços que apresentam microestrutura perlítica.

A ampla aplicabilidade dos aços que contêm perlita em sua microestrutura torna essencial para a comunidade acadêmica e industrial compreender os mecanismos subjacentes que levam a falhas durante o uso desses materiais. Isso é exemplificado pelo trabalho realizado por (CARVALHO *et al.* 2021), que estudaram o impacto da morfologia da perlita e da textura cristalográfica na propagação e na origem das trincas.

Neste estudo, o enfoque central concentrou-se na avaliação do espaçamento interlamelar da perlita em aços 1080. Para alcançar esse objetivo, foram feitas análises da microestrutura do aço por meio do uso de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Ademais, foram realizadas medições de microdureza e dureza para avaliar as propriedades mecânicas associadas ao espaçamento interlamelar da perlita.

2. OBJETIVO GERAL

O estudo tem como objetivo compreender os efeitos das variações do espaçamento interlamelar da perlita nas propriedades mecânicas do aço 1080.

2.1. Objetivos específicos

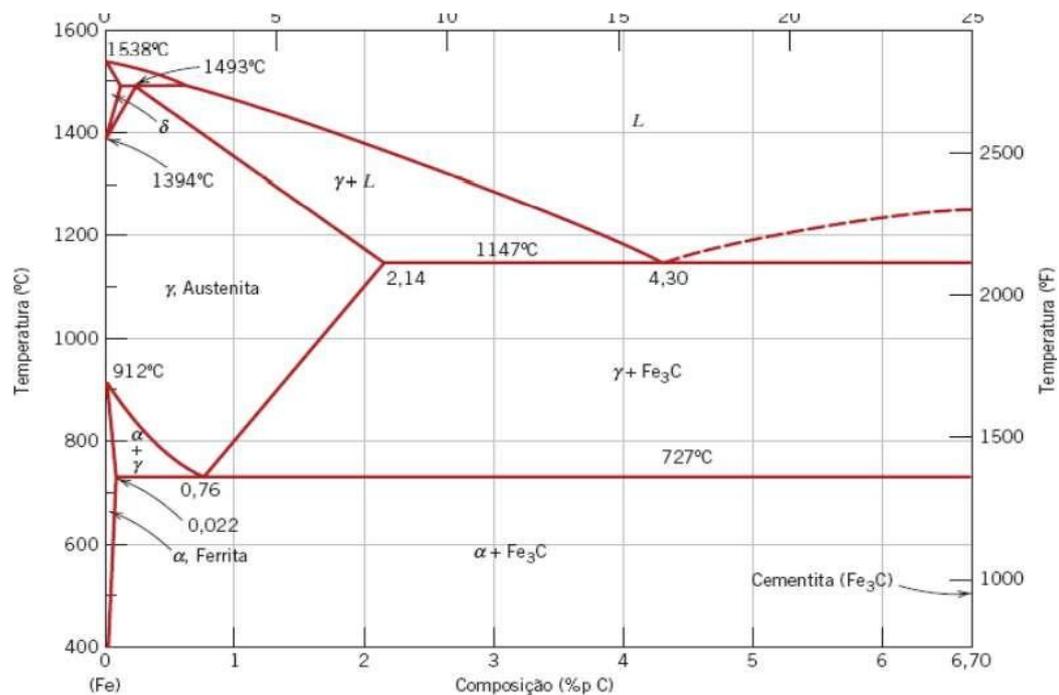
- Caracterizar microestruturalmente o aço após os tratamentos térmicos e determinar o espaçamento interlamelar da perlita;
- Avaliar a influência do espaçamento interlamelar da perlita nas propriedades mecânicas do aço.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Diagrama de fases: Sistema ferro-carbono

De todos os sistemas de ligas binárias, temos que o sistema ferro-carbono é possivelmente o mais importante. Os aços podem ser categorizados baseando-se na quantidade de carbono presente. Aqueles que possuem menos de 0,80% de carbono são conhecidos como aços hipoeutetóides, enquanto que aqueles que possuem exatamente 0,77% de carbono são chamados de aços eutetóides. Por outro lado aços que possuem um teor entre 0,80% até 2,06% de carbono são denominados de hipereutetóides. A composição de um aço eutetóide varia consideravelmente, com valores que vão desde 0,76% de carbono até 0,83% (CLARKE, 2014). Ao analisarmos o diagrama da figura 1, é possível identificar três pontos invariantes no sistema quando a porcentagem de carbono é inferior a 6,7%. O primeiro desses pontos a serem destacados é o ponto peritético, que ocorre em uma temperatura de 1493°C e com uma composição de 0,16% de carbono. O segundo ponto seria o ponto eutetóide, que possui 0,77% de carbono e se encontra a uma temperatura de 723°C. Por fim observa-se o terceiro ponto que seria o ponto eutético, caracterizado por uma composição de 4,3% de carbono a uma temperatura de 1147°C. (REED-HILL, 1982)

Figura 1 - Sistema ferro-carbono e suas principais fases sólidas



Fonte : (CALLSITER; RETHWISCH, 2016)

Na figura 1, é possível visualizar as fases em equilíbrio no ferro-carbono que são a ferrita ou ferro α , possui uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). A ferrita passa por uma transformação polimórfica e passa a ser a austenita ou ferro γ com estrutura cristalina cúbica de fase centrada (CFC) a uma temperatura de 912°C. Tal fase persiste até a temperatura de 1394°C, temperatura na qual a austenita CFC reverte novamente para uma fase com a estrutura CCC, conhecida como ferrita δ , a qual se funde a uma temperatura de 1538°C. Todas essas alterações estão previstas no diagrama ferro-carbono, porém o eixo das composições se estende somente até uma concentração de 6,70% de carbono, pois, nessa concentração, se forma o composto intermediário carbeto de ferro, ou cementita (Fe_3C), representado pela linha vertical no diagrama de fases, que apresenta uma estrutura ortorrômbica (CALLISTER, 2002).

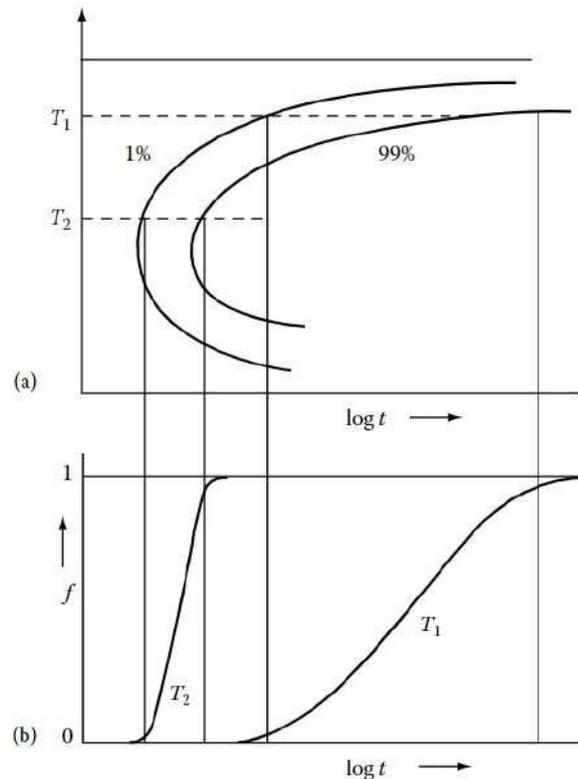
3.2. Diagrama tempo - temperatura - transformação (TTT) e transformação com resfriamento contínuo (TRC)

Tratamentos térmicos são os processos pelos quais as peças de metais e ligas, através da ação do calor, com o objetivo de modificar suas estruturas e propriedades em determinada especificação. A teoria dos tratamentos térmicos é parte da metalurgia física. O principal objetivo de estudo dessa área seria o estudo das relações entre as estruturas e as propriedades tecnicamente relevantes em um material metálico. Com o aquecimento e resfriamento temos que a estrutura do material pode variar. Tal fato possibilita a modificação das propriedades mecânicas, físicas e químicas, e influencia no comportamento desses materiais durante a fabricação e utilização (NOVIKOV, 1994). De acordo com as observações de (HILLERT, 2011) foi de suma importância a contribuição de Davenport e Bain, pois foi tal trabalho que possibilitou a construção do diagrama tempo, transformação e temperatura; por meio do desenvolvimento gradual dos produtos de transformação isotérmica.

Os procedimentos metodológicos para a construção da curva TTT de um material específico estão ilustrados na Figura 2 (a) e (b). Na Figura 2(b), uma curva com uma forma que lembra um “S” é obtida experimentalmente. Essa curva considera a temperatura de transformação isotérmica (T_1). Nessa curva, o processo de transformação da austenita em perlita começa com um período de nucleação. Com o passar do tempo, ocorre uma diminuição na fração da fase austenítica e um aumento da fase perlítica (f), que se estende no intervalo de tempo t'_1 e t'_2 . Esse mesmo procedimento é repetido para várias temperaturas de tratamento isotérmico, como exemplificado na Figura 2(b) para a temperatura (T_2).

Contudo, a obtenção de várias curvas isotérmicas em diferentes temperaturas, como exemplificado por T_1 e T_2 , abre a possibilidade de criar um diagrama de tempo, transformação, temperatura (TTT), conforme ilustrado na Figura 2(a). Esse diagrama estabelece uma relação entre as temperaturas e os intervalos de tempo de início e de término das transformações ocorridas em um aço específico durante os processos de tratamento térmico.

Figura 2 - Porcentagem da transformação versus tempo para diferente temperatura de transformação isotérmica



Fonte: (PORTER *et al.*, 2009)

Segundo (CALLISTER, 2002) os tratamentos térmicos isotérmicos não são os mais práticos de serem conduzidos, uma vez que uma liga deve ser resfriada rapidamente e mantida a uma temperatura elevada desde uma temperatura mais alta, acima da temperatura eutetóide. Temos que grande parte dos tratamentos térmicos aplicados a aços envolvem um resfriamento contínuo de uma amostra até a temperatura ambiente. Entretanto, um diagrama isotérmico é apenas válido para condições de temperatura constante, dessa forma se faz necessário um diagrama que as transformações ocorrem quando a temperatura está em constante mudança.

Em um diagrama de resfriamento contínuo (TRC), o tempo exigido para que ocorra a reação é retardado, então as curvas isotérmicas são deslocadas a direita (tempos mais longos) e para temperaturas menores.

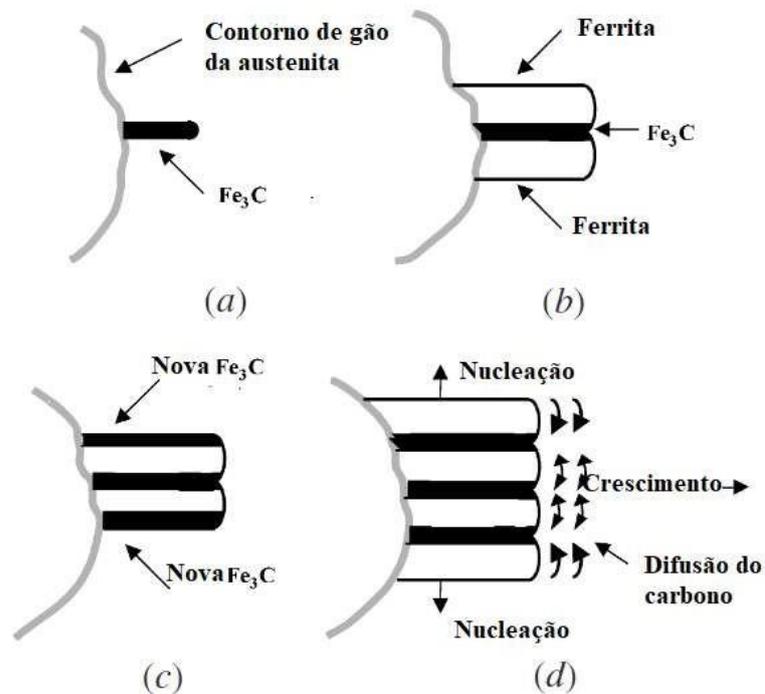
A literatura abriga uma ampla gama de artigos que exploram a conexão entre as características microestruturais da perlita e suas implicações nas propriedades mecânicas. Um exemplo notável desse estudo é encontrado no trabalho de (ZHANG; KELLY, 2009), no qual foi sugerido que o crescimento da perlita ocorre devido ao deslocamento de protuberância na interface entre a perlita e a austenita. Além disso, observou-se que as variações na direção dos degraus da interface entre a ferrita e a cementita na perlita desempenham um papel crucial na curvatura e na modificação da espessura das lamelas de cementita.

3.3. Formação da perlita

Segundo (CHIAVERINI, 1996) a perlita se dá pela mudança da austenita para o ferro α 727°C que é súbita e instantânea, resultando em componentes- ferrita de um lado e carbono sob a forma de Fe_3C do outro- que não têm oportunidade de adotar arranjos perfeitamente distintos. Nessas condições, a ferrita e a cementita (Fe_3C) se organizam de maneira característica, formando finas camadas intercaladas que estão intimamente próximas uma da outra e apenas podem ser visualizadas através de um microscópio.

Dessa forma, obtém-se um novo constituinte de forma lamelar típica, conhecida como perlita. É fundamental entender o modo como esse crescimento cooperativo ocorre, sendo relevante destacar os efeitos da interface ferrita-cementita, uma vez que, como mencionado por (SANTOS, 2006), essa interface exerce uma influência substancial em sua estabilidade e desempenha um papel fundamental na compreensão do processo de nucleação e crescimento. A Figura 3 ilustra as etapas envolvidas na formação da perlita.

Figura 3 - Diagrama esquemático que indica que a perlita cresce como nódulos em um lado dos limites da austenita anterior e nos cantos dos grão



Fonte: (ELWAZRI *et al.*, 2005a)

A alteração na configuração da cementita durante o processo de transformação perlítica, que varia de acordo com a concentração de carbono na austenita, encontra explicação no modelo de competição cinética entre a formação de ferrita e cementita. Como destacado por (YASUDA; NAKADA, 2021), esse modelo aponta para a influência da temperatura na concentração crítica de carbono necessária para a transição da morfologia da cementita.

Conforme esclarecido por (EMBURY,2012), a reação perlítica serve como um notável exemplo do progresso histórico da metalurgia física e da importância da interação entre observações experimentais e o desenvolvimento de modelos quantitativos. As propriedades mecânicas dos aços perlíticos são, em grande parte, governadas pelas microestruturas resultantes do seu processamento termomecânico. Fatores como o tamanho do grão austenítico prévio, o espaçamento entre as lamelas e o tamanho das colônias de perlita desempenham um papel crucial nesse controle (SAHAY *et al.*, 2009) apud (RODRIGUES, 2019).

Na análise da microestrutura perlítica, muitos parâmetros podem ser avaliados, sendo frequente a elaboração de equações para sua determinação. Um exemplo disso é a pesquisa conduzida por (LEE *et al.*, 2015), na qual eles estabelecem uma relação entre a espessura das lamelas de cementita (t_c), o espaçamento entre as lamelas (S), a fração volumétrica da perlita (V) e o teor de carbono (% em peso de C), resultando na Equação 2.2.

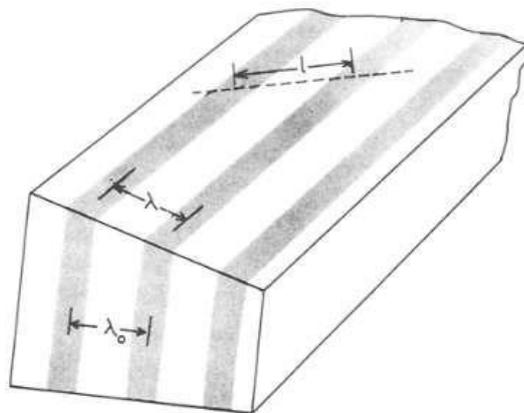
$$t_c = \frac{S \cdot 0,15(\text{wt}\%C)}{V} \quad (2.2)$$

3.4. Espaçamento interlamelar

A avaliação da distância entre as lamelas pode ser interpretada de várias maneiras. Normalmente, considera-se a medida como o espaçamento interlamelar real (λ_0). No entanto, também é possível levar em conta o espaçamento aparente (λ) e o espaçamento de intercepção (l). Na Figura 4 podemos ver os diferentes tipos de espaçamento interlamelar na perlita.

O espaçamento aparente é a distância entre duas lamelas consecutivas medida perpendicularmente em um plano aleatório em relação ao plano de polimento. Nesse plano, as lamelas não necessariamente se encontram em ângulo reto com a seção. Por outro lado, o espaçamento da intercepção é a distância entre duas lamelas consecutivas ao longo do plano de polimento, variando de acordo com o ângulo da linha de medida desse plano em relação a superfície (RIDLEY, 1983).

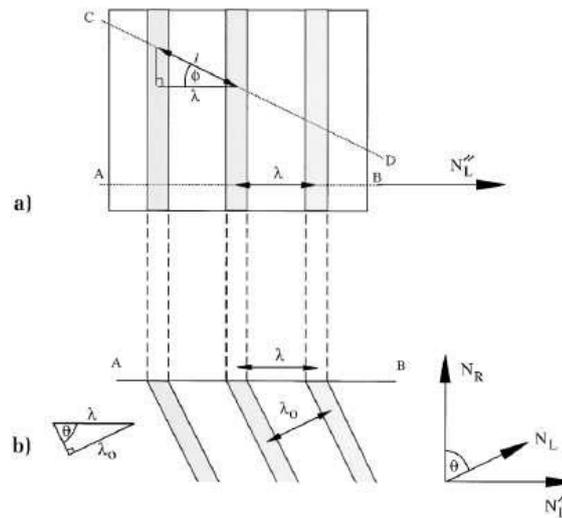
Figura 4 - Ilustração de vários espaçamentos interlamelares em uma estrutura perlítica ideal



Fonte: (RIDLEY, 1983)

A Figura 5 apresenta diversas representações dos variados espaçamentos interlamelares da perlita, enquanto suas inter-relações são descritas através das Equações 2.3, 2.4 e 2.5 (HOWELL,1998). Ainda na Figura 5, observa-se um conjunto de lamelas perlíticas paralelas (definidas pela norma NL) com um plano de corte (determinado pela norma NR), e N''_L representa a projeção de NL na superfície da amostra.

Figura 5 - Ilustração de vários espaçamentos interlamelar em uma estrutura perlítica ideal.



Fonte: (HOWELL, 1998)

Na Figura 5 (b), a distância real entre as lamelas interlamelares (λ_0) para uma única colônia de perlita pode ser correlacionada com o espaçamento aparente (λ) ao longo do segmento AB, como indicado na Equação 2.3.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sin\theta} \quad (2.3)$$

O ângulo θ é definido como a medida entre normal à superfície (N_R) e a direção das lamelas (N_L). O espaçamento médio entre as lamelas de interceptação pode ser determinado por meio da seguinte fórmula, que depende da série apresentada abaixo, onde (n) refere-se ao número de lamelas de cementita interceptadas pela linha CD na Figura 5(a).

$$\iota = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (2.4)$$

O espaçamento de interceptação pode ser dado por:

$$l = \frac{\lambda}{\cos\phi \sin\theta} \quad (2.5)$$

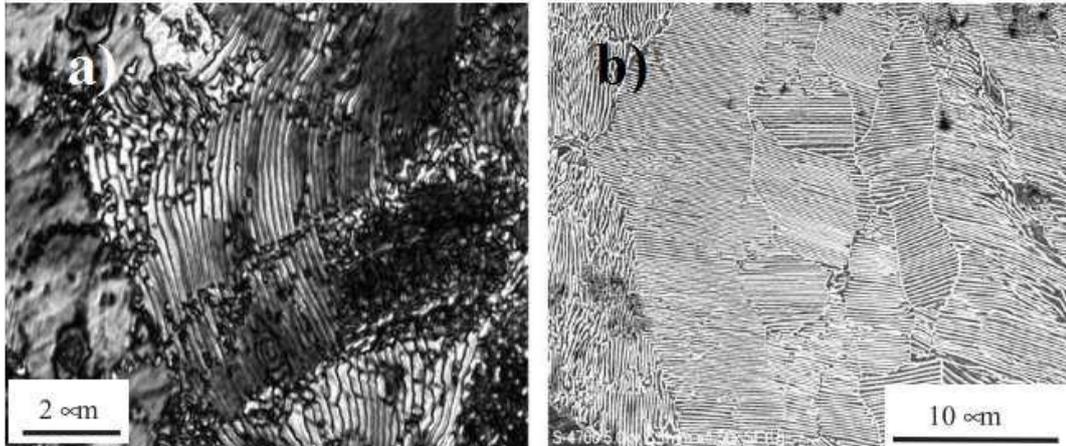
De acordo com (Vander Voort, 2015), a perlita que se forma durante o resfriamento contínuo demonstra uma variedade mais extensa de espaçamentos interlamelares reais ou aparentes em comparação com a perlita formada de maneira isotérmica.

3.5. Estudos sobre o espaçamento interlamelar da perlita

Conforme destacado por (EMBURY, 2012), a pesquisa inicial do aço perlítico teve um papel de grande relevância, uma vez que a transformação perlítica serve como um notável exemplo de avanço histórico da metalurgia física e da crucial interconexão entre observações obtidas experimentalmente e o desenvolvimento de modelos quantitativos.

A análise do espaçamento interlamelar da perlita permanece como um tópico contínuo de investigação em várias pesquisas, uma vez que é de extrema importância na avaliação das propriedades dos aços perlíticos. Abaixo é possível de visualizar a Figura 6, na qual (ELWAZRI *et al.*, 2005b) obteve micrografias que revelam a microestrutura perlítica, obtida através de um Microscópio Confocal de Varredura a Laser (MCVL), referente a Figura 6 (a), e outra obtida com o uso de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). No entanto, concluíram que a micrografia confocal de varredura a laser se apresenta como uma técnica extremamente prática e eficaz para a observação das lamelas de cementita e ferrita em amostras preparadas para a microscopia óptica convencional.

Figura 6 - Ilustração da metodologia de medição do espaçamento interlamelar da perlita.



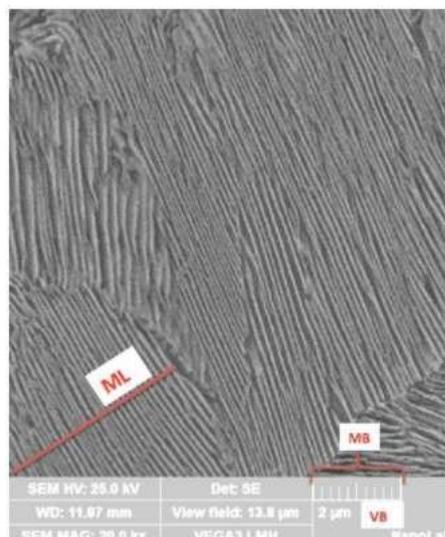
Fonte: (ELWAZRI *et al.*, 2005b)

Diferentes métodos têm sido empregados por variados pesquisadores na quantificação do espaçamento entre lamelas, com o objetivo de obter resultados precisos em relação ao seu impacto nas propriedades do aço. Um exemplo notável é evidenciado por (RODRIGUES,2019), no qual ele estabelece a seguinte relação para calcular o espaçamento interlamelar aparente :

$$\lambda = \frac{VBML}{MBNL} \quad (2.6)$$

Onde VB é a medida da barra de escala da imagem, em μm ; MB é a medida equivalente da barra de escala em mm (1:1); ML é a medida da linha teste, traçada perpendicularmente às lamelas de perlita, em mm (1:1); e NL é o número de lamelas de cementita interceptadas pela linha teste, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Ilustração da metodologia de medição do espaçamento interlamelar da perlita por meio da equação acima.



Fonte: (RODRIGUES, 2019)

A microestrutura perlítica pode ser gerada por meio de resfriamento contínuo, e a variação no espaçamento entre as lamelas de perlita ocorre devido às mudanças na velocidade de resfriamento. A investigação do espaçamento interlamelar durante o resfriamento contínuo foi realizada por (XU *et al.*, 2008), cujos os resultados para diferentes taxas de resfriamento estão documentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Espaçamento interlamelar a diferentes taxas de resfriamento.

| Taxa de resfriamento (°C/s) | Espaçamento interlamelar (μ m) |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0,158 |
| 3 | 0,114 |
| 5 | 0,086 |
| 6 | 0,080 |
| 8 | 0,076 |
| 10 | 0,062 |
| 15 | 0,060 |

Fonte: Adaptado (XU *et al.*, 2008)

O espaçamento interlamelar da perlita desempenha um papel de extrema relevância na avaliação do desempenho dos materiais ferroviários. De acordo com (LI *et al.*, 2021) a taxa de desgaste, a resistência ao desgaste e o grau de fadiga dos materiais ferroviários são afetados pelo espaçamento interlamelar da perlita. Um aumento no espaçamento interlamelar da perlita resultou em um aumento da taxa de desgaste, de 1,76 μ g/m para 2,00 μ g/m, e também foi identificado como um dos parâmetros que diminui a resistência ao desgaste e o grau de fadiga.

Os autores (W.J Nam, 2004) observaram que o aumento da temperatura de transformação provoca um aumento do espaçamento interlamelar da perlita e na espessura da cementita. A variação do espaçamento entre as lamelas tem um impacto significativo em diversas propriedades durante os ensaios mecânicos. Segundo (PORCARO *et al.*, 2017), a diminuição do limite de escoamento e do limite de resistência da solda pode ser atribuída a mudanças na estrutura metalográfica e nos ensaios de dureza, tais como esferoidização parcial da cementita na perlita e o aumento do espaçamento interlamelar.

Conforme observado por (ZHANG *et al.*, 2014), testes de tração realizados em aços perlíticos revelam uma diminuição no limite de escoamento e na resistência à tração. Além disso, é importante notar que o alongamento uniforme aumenta, enquanto que o alongamento local na região do pescoço diminui, o que pode ser atribuído ao aumento gradual do espaçamento interlamelar da perlita.

É fundamental ressaltar que os defeitos da perlita nas propriedades mecânicas não estão restritos aos aços eutetóides. Durante testes de tração conduzidos em aços perlíticos hipoeutetóides, conforme mencionado por (LEE *et al.*, 2015), foi observado um aumento na resistência à tração quando a temperatura de transformação é elevada, resultando em uma redução no espaçamento interlamelar da perlita e na espessura das lamelas de cementita.

4. METODOLOGIA

Neste tópico são apresentados os métodos empregados na condução da pesquisa, juntamente com os materiais utilizados. É importante destacar que os procedimentos essenciais mencionados desempenham papel fundamental na análise da microestrutura e na avaliação das propriedades mecânicas do aço em análise.

4.1. Materiais

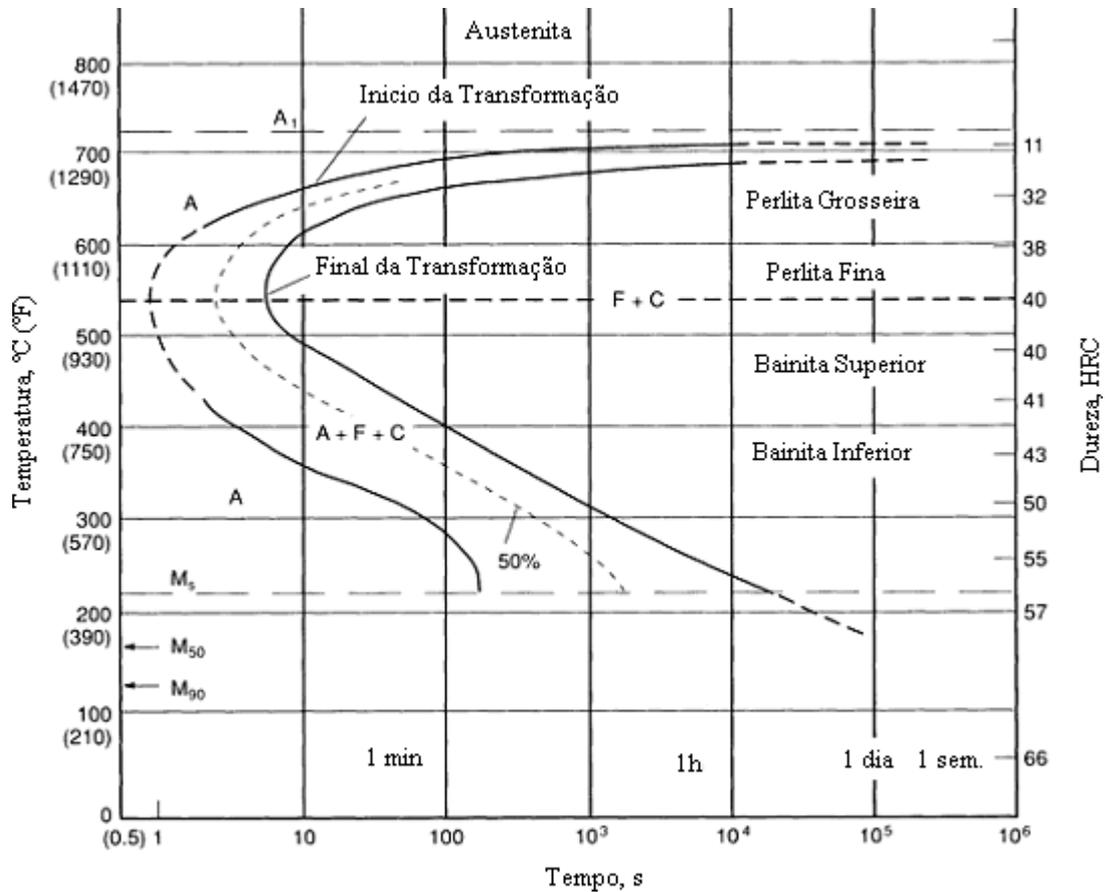
A realização do trabalho foi mediante aquisição do aço comercial 1080, entretanto as condições de fabricação não foram informadas pelo fabricante, por esse motivo as condições de tratamentos térmicos são desconhecidas. O aço foi adquirido em forma chapa nas dimensões de 5 mm de espessura, 50 mm de largura e 80 cm de comprimento.

Então temos que o primeiro passo para a realização da pesquisa foi a obtenção do aço ASTM 1080, seguido de análise de composição química por espectroscopia por emissão óptica, após isso, fez-se corte metalográfico no aço como recebido para ser usado nos ensaios mecânicos, tratamento isotérmico e de resfriamento no forno.

Ao finalizar os tratamentos, as amostras passaram por análise microestrutural e ensaios mecânicos. Durante a caracterização as amostras foram preparadas metalograficamente para serem analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Logo em seguida, as amostras e corpos de prova foram destinados ao ensaio de microdureza Vickers (HV) e dureza Rockwell C (HRC).

4.2. Tratamentos térmicos

Figura -8 Diagrama TTT para o aço 1080



Fonte: (CALLISTER., 1999)

A Figura 8 apresenta do diagrama (TTT) para o aço 1080. Para a realização dos tratamentos térmicos as amostras foram classificadas em dois grupos, aquelas pertencentes ao primeiro são amostras que após a austenitização foram tratadas isotermicamente e as do segundo são as amostras que depois do processo de austenitização foram resfriadas ao forno. As rotas dos tratamentos para amostras tratadas isotermicamente obedeceram a seguinte sequência, conforme análise do diagrama acima: elas foram aquecidas a uma taxa de 10°C/s até a temperatura de austenitização que podem ser de 900°C ou 1100°C, as amostras permanecem por 20 minutos em cada uma dessas temperaturas de austenitização. Ao fim desse período tempo, elas são transferidas imediatamente para o banho isotérmico em sal, que se encontra em um forno pré-aquecido à temperatura isotérmica desejada, que pode ser de 650, 600 e 550°C, nos tempos que podem variar de, respectivamente, 60, 34 e 40 segundos, dessa forma obedecendo o tempo proposto para transformação perlítica, segundo o digrama (TTT). Ao final dessa etapa elas sofrem têmpera em água.

Já as amostras resfriadas ao forno após o processo de austenitização foram aquecidas à 10°C/s até a temperatura de austenitização que pode ser de 1100°C ou 900°C, onde permanecem por 20 minutos e depois elas são resfriadas completamente dentro do forno à uma taxa de 2°C/s.

4.3. Denominação das amostras

As designações das amostras na Tabela 2 correspondem a diferentes condições de tratamento térmico. As amostras que passaram pelo processo de austenitização a 1100°C, seguidos de tratamento isotérmico a 650°C, 600°C e 550°C, são identificadas como A11, A12 e A13, respectivamente. Por sua vez, as amostras que foram austenitizadas a 900°C, seguidos de tratamento isotérmico a 650°C, 600°C e 550°C, foram nomeadas como B11, B12 e B13, nessa sequência. Por último, a designação CR é atribuída à amostra na condição recebida, sendo que as amostras austenitizadas a 1100°C e a 900°C, seguido de resfriamento no forno, são identificadas como FR1 e FR2, respectivamente.

Tabela 2 - Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa.

| Sigla | Condição |
|-------|--|
| CR | amostra como recebida |
| A11 | amostra austenitizada a 1100°C e tratada isotermicamente a 650°C |
| A12 | amostra austenitizada a 1100°C e tratada isotermicamente a 600°C |
| A13 | amostra austenitizada a 1100°C e tratada isotermicamente a 550°C |
| B11 | amostra austenitizada a 900°C e tratada isotermicamente a 650°C |
| B12 | amostra austenitizada a 900°C e tratada isotermicamente a 600°C |
| B13 | amostra austenitizada a 900°C e tratada isotermicamente a 550°C |
| FR1 | amostra austenitizada a 1100°C e resfriada dentro do forno |
| FR2 | amostra austenitizada a 900°C e resfriada dentro do forno |

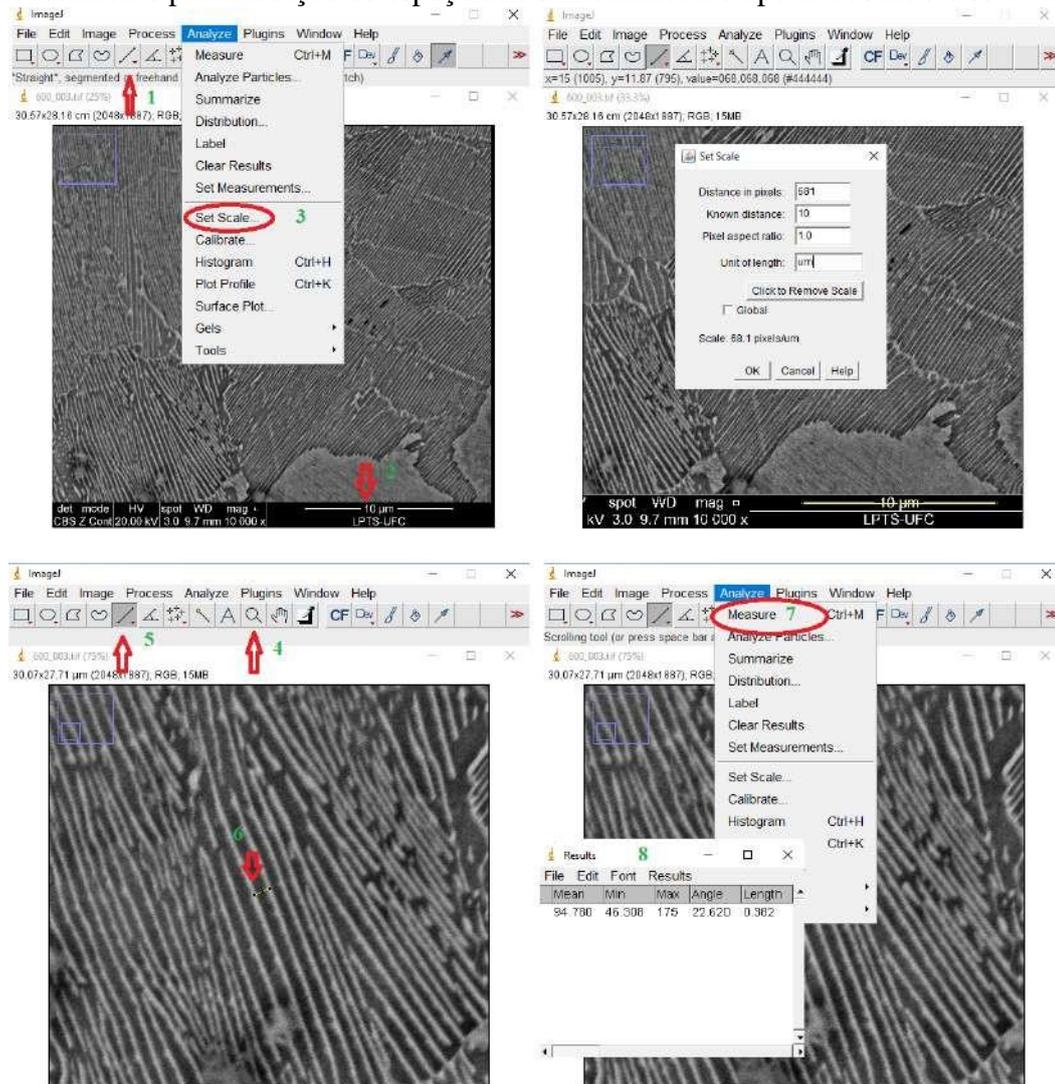
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

4.4. Medição do Espaçamento Interlamelar da Perlita

Ao fazer análise microestrutural das amostras foi necessário medir o espaçamento interlamelar da perlita, sendo este um dos principais objetivos da pesquisa, para tal utilizou-se o software de processamento de imagens ImageJ, sendo de domínio público e desenvolvido pelo National Institute of Mental Health.

Abaixo vemos o passo a passo tomado para o processo de medição do espaçamento interlamelar da perlita, indicado na Figura 9.

Figura 9 – Procedimento para medição do espaçamento interlamelar da perlita usando o software ImageJ.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

4.5. Caracterização Microstrutural

4.5.1. Preparação de amostras para caracterização microestrutural

Durante a etapa de caracterização microestrutural, o material na condição de como recebido foi cortado utilizando a máquina de corte (cut-off) pertencente ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará. Após o processo de corte as amostras foram tratadas termicamente e preparadas metalograficamente (embutidas usando baquelite quando necessário) no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) também pertencente à Universidade Federal do Ceará. Ao longo da etapa de preparação metalográfica, o processo de lixamento realizado utilizando a politriz, sendo que em cada etapa de lixamento, as granulometrias das lixas foram sendo variadas progressivamente 80, 100, 120, 220, 400, 600,

1200 e por fim 2000 mesh.

Ao final do lixamento foi realizado polimento mecânico das peças, assim, utilizando-se os panos de polimento para cada pasta de diamante com o tamanho da partícula de 6 μm , 3 μm e 1 μm , logo em seguida iniciou-se o ataque químico a base de nital 2% por imersão durante 5 segundos em todas as amostras.

4.5.2. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

As micrografias foram obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura do Laboratório da Central Analítica (CA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) da marca *Quanta 450 FEG – FEI*.

4.5.3. Caracterização das Propriedades Mecânicas

Agora serão abordados os ensaios mecânicos propostos para avaliação das propriedades mecânicas dos diferentes espaçamentos interlamelares da perlita observados na pesquisa. Foram feitos ensaios mecânicos de microdureza e dureza, sendo que todos eles foram conduzidos à temperatura ambiente.

4.5.4. Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza foi realizado para analisar a influência das diferentes condições de tratamento térmico na microdureza do aço 1080. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização dos Materiais – LACAM da Universidade Federal do Ceará (UFC); e as medidas de microdureza Vickers (HV) foram feitas usando o microdurômetro SHIMADZU – Micro Hardness Tester, a carga de indentação utilizada foi de 9,807N, sendo o tempo de indentação de 10 segundos. Fez-se para cada condição de tratamento 20 indentações e a distância entre cada uma foi de 1mm.

4.5.5. Ensaio de Dureza Rockwell C

O ensaio de dureza Rockwell C foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânico (LEM), situado na Universidade Federal do Ceará (UFC), foi realizado de acordo com a norma ASTM E 18 – 05 utilizando penetrador de diamante cônico. Foi aplicada uma pré-carga de 10 kgf e uma carga de 150 kgf.

5. RESULTADOS

Nas subseções dessa seção serão apresentados e discutidos os resultados de análise química, análise micrográfica, microdureza, ensaio de flexão, macrografia e fractografia dos corpos de prova. Os resultados foram correlacionados ao espaçamento interlamelar da perlita obtido por meio das micrografias de cada condição de tratamento térmico.

5.1. Análise química

Ao receber o material foi necessário determinar a sua composição química usando a técnica de espectroscopia por emissão ótica no aparelho SHIMADZU PDA-7000 que se encontra no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC). A composição obtida é apresentada na Tabela 3, sendo corresponde à média das três análises realizadas no referido aço.

Tabela 3 - Composição química do aço 1080 obtida por espectroscopia por emissão ótica em % de de massa.

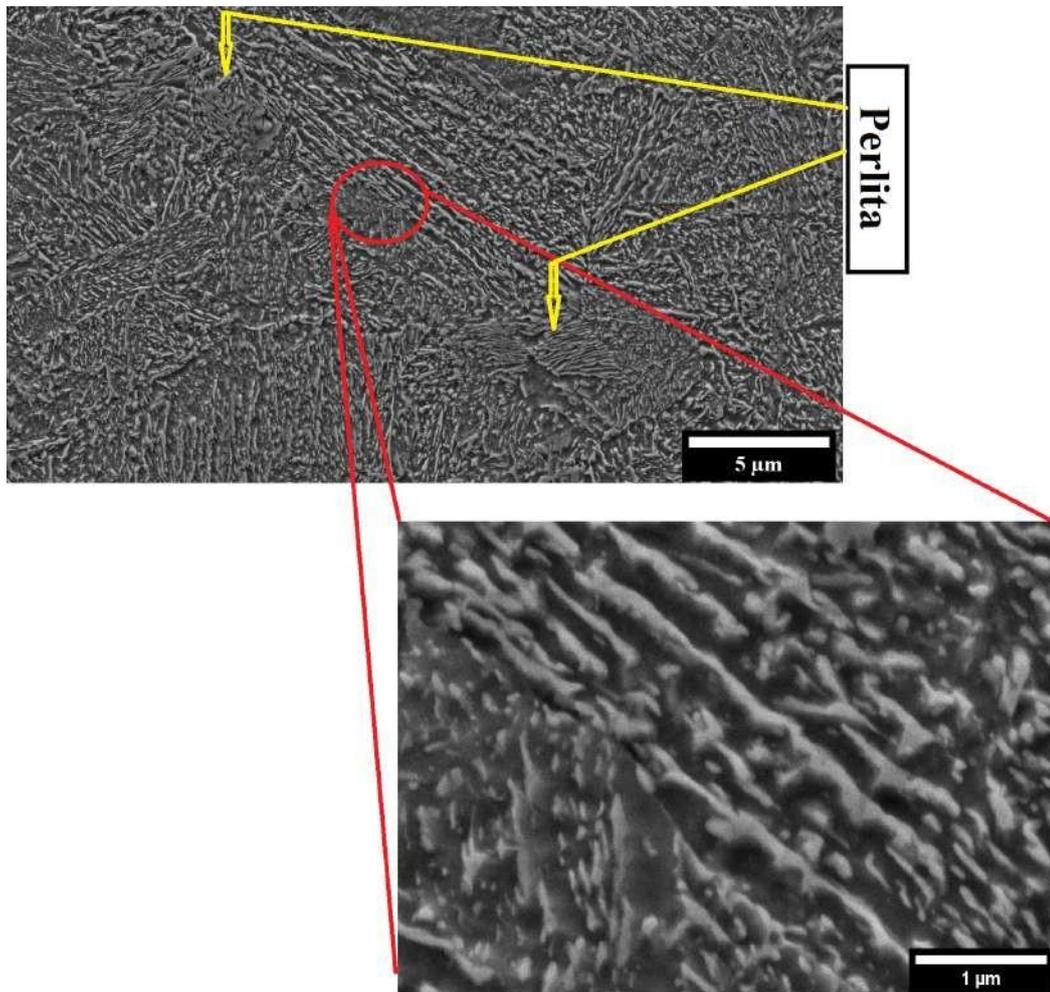
| C | Mn | Si | S | P | Cu | Cr | Ni | Mo | V | Ti | Al | Fe |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 0,83 | 0,72 | 0,24 | 0,005 | 0,004 | 0,001 | 0,18 | 0,023 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,003 | Bal |

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

5.2. Resultado da micrografia

A imagem micrográfica da amostra na condição recebida (CR) é mostrada na Figura 10, embora as condições específicas de tratamento e procesamento sejam desconhecidas. No entanto, algumas infências podem ser feitas com bases nas características físicas e microestruturais do aço na condição recebida. A chapa recebida parece ter passado por um processo de laminação a quente. Ao examinar a micrografia da Figura 10(em uma escala de aumento de $5\mu\text{m}$), destaca-se a presença predominante de bainita, juntamente com pequenas áreas que exibem uma microestrutura perlítica, sugerindo a ocorrência de algum tratamento térmico capaz de produzir essa microestrutura. Na ampliação de $1\mu\text{m}$, destacada na mesma figura, é possível identificar uma região com características semelhantes à perlita, mas que aparenta ter sido afetada durante o processo de fabricação. Com isso, é possível afirmar que o material passou por laminação, seguido de tratamento térmico de recuperação ou recristalização.

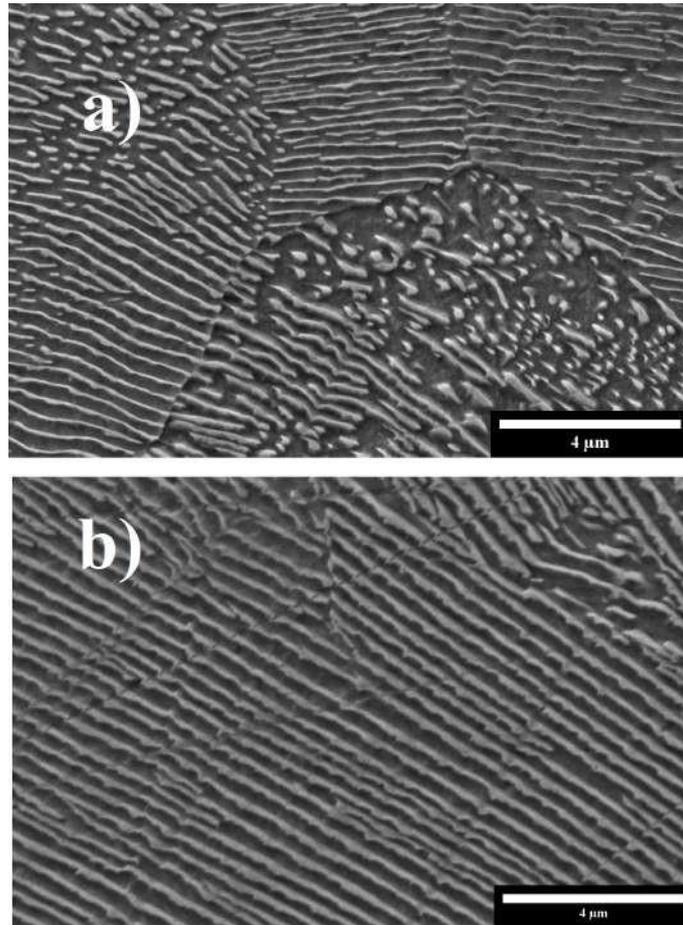
Figura 10 – Micrografia da amostra na condição “como recebida”



Fonte: Central Analítica (2021)

As micrografias apresentadas na Figura 11 (a) correspondem à amostra que foi austenitizada a 1100°C e resfriada no forno, designada como FR1. Por outro lado, a Figura 11 (b) mostra a micrografia da amostra austenitizada a 900°C também resfriada no forno, sendo denominada FR2. Essas duas condições de tratamento foram implementadas com o objetivo de avaliar os efeitos das variações nas temperaturas de austenitização no processo de resfriamento no forno. A micrografia da Figura 11 (a) revela uma microestrutura totalmente perlítica, sendo essa mesma microestrutura obtida na condição representada na Figura 11 (b). Notavelmente, a perlita nesta última condição é mais bem definida e orientada. Uma análise visual preliminar do espaçamento interlamelar indica que a condição FR1 apresenta um espaçamento interlamelar menor em comparação com a condição FR2.

Figura 11 – Micrografia das amostras austenitizadas a: a) FR1 1100°C e b) FR2 900°C, seguidos de resfriamento ao forno



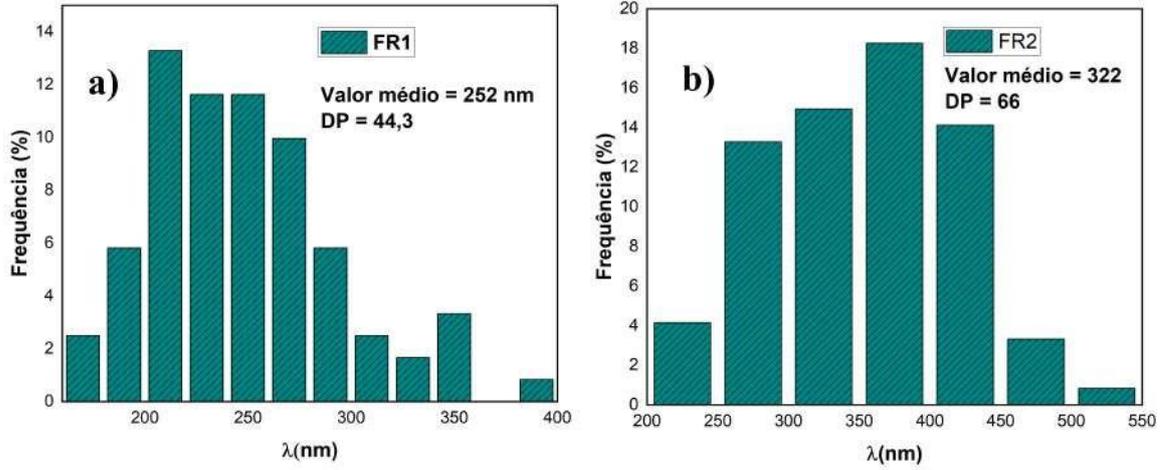
Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

O histograma apresentado na Figura 12 (a) representa as medidas do espaçamento interlamelar da perlita na amostra FR1, enquanto que na Figura 12 (b) corresponde às medidas de FR2. Os resultados indicam que o espaçamento médio para a amostra FR1 foi de 252 nm, enquanto para FR2 foi de 322 nm. Essas duas medidas revelam que a redução da temperatura de austenitização resultou em um aumento no espaçamento interlamelar da perlita para ambas as condições de tratamento.

As micrografias da Figura 13 retratam as amostras que foram austenitizadas a 1100°C e submetidas a tratamento isotérmico a 650°C (A11), 600°C (A12), 550°C (A13). A escolha desses tratamentos se deve ao interesse de investigar o efeito da variação da temperatura de tratamento isotérmico no espaçamento interlamelar da perlita. Cada condição de tratamento é representada por duas escalas: uma maior, correspondente a 4 μm, e outra menor, de 1 μm.

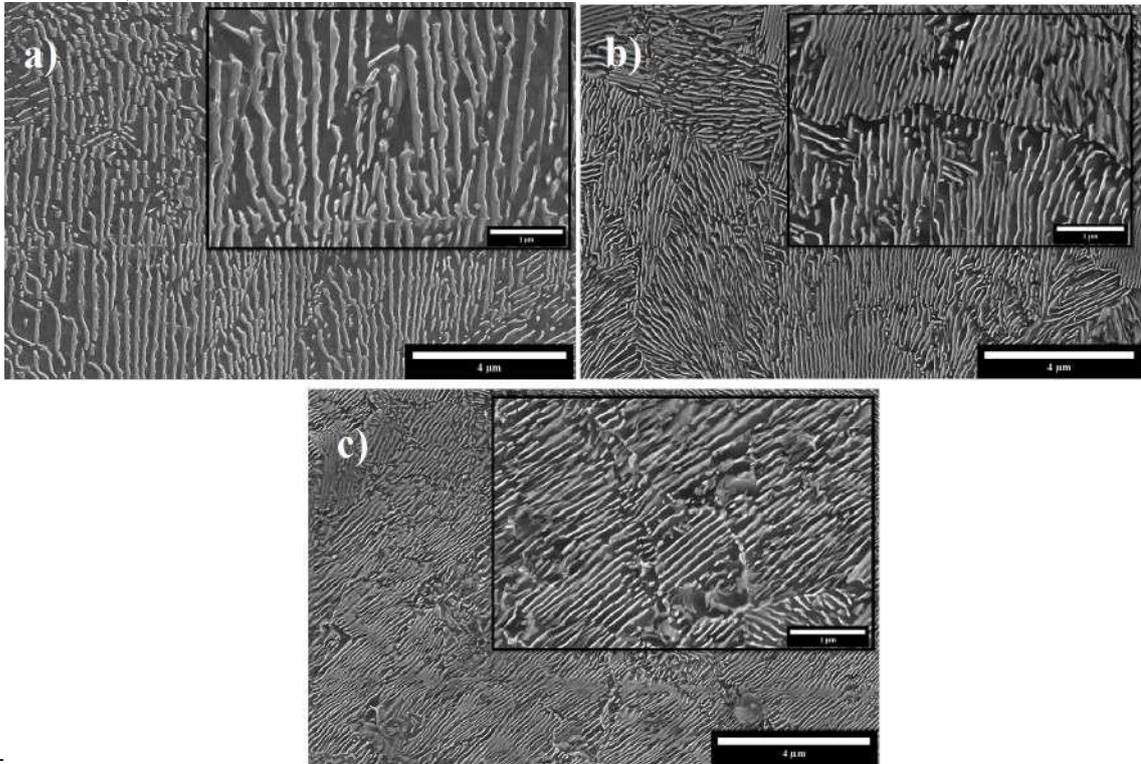
Ao examinar a Figura 13 (a)(condição A11), a Figura 13 (b)(condição A12) e a Figura 13 (c)(condição A13), conclui-se que esses tratamentos resultarem em microestruturas perlíticas.

Figura 12 – Histograma do espaçamento interlamelar da perlita das amostras: a) austenitizada a 1100°C e resfriada no forno; b) austenitizada a 900°C e resfriada no forno.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

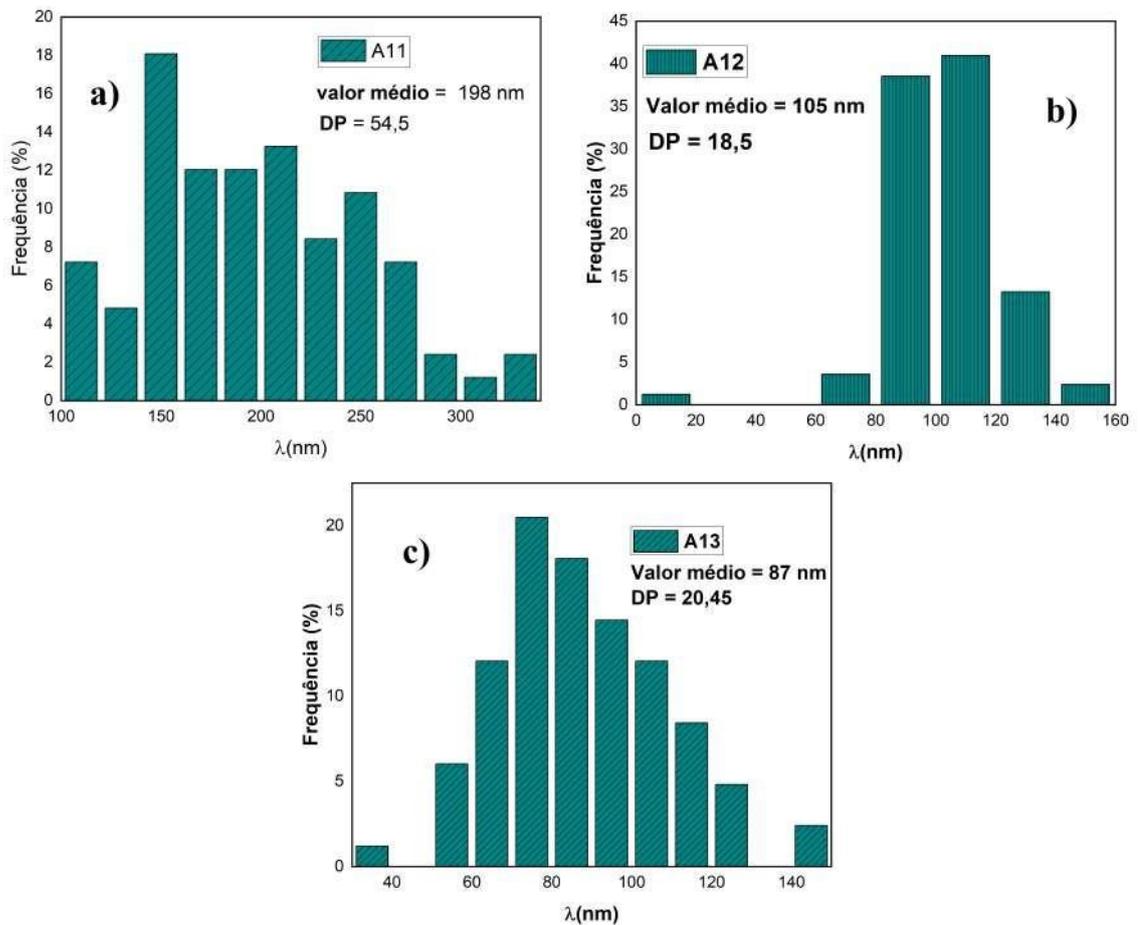
Figura 13 - Análise micrográfica das amostras austenitizadas a 1100°C e tratada isotermicamente: a) 650°C, b) 600°C e c) 550°C.



Fonte: Central Analítica - UFC (2021)

Uma análise visual em uma escala de aumento de $1\mu\text{m}$ nas micrografias da Figura 13 permite inferir que o espaçamento interlamelar diminui a medida que se transita da micrografia da condição A11 até A13. Isso sugere que a redução da temperatura de tratamento isotérmico provocou a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita. Os valores médios do espaçamento interlamelar da perlita são apresentados no histograma da Figura 14, sendo 198 nm para a amostra A11, 105 nm para a amostra A12 e 87 nm para a amostra A13.

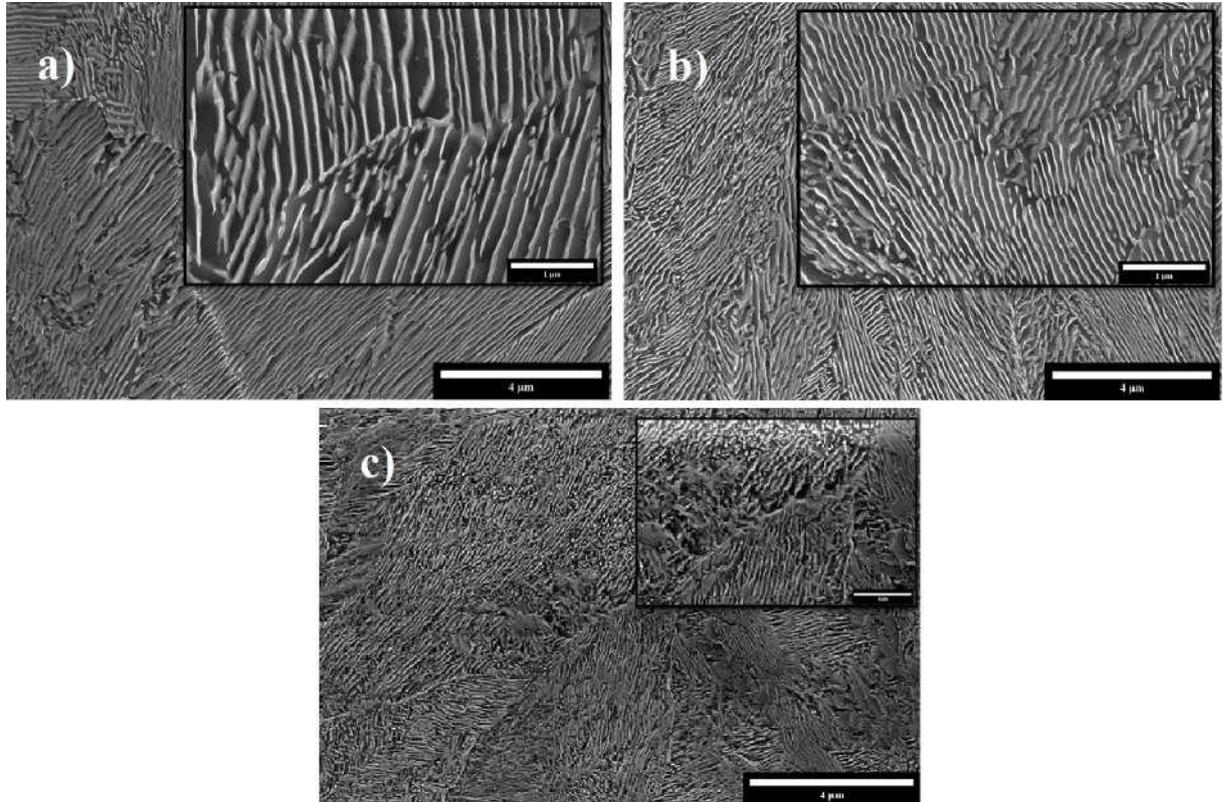
Figura 14 - Histograma do espaçamento interlamelar da perlita da amostra austenitizada a 1100°C e tratada isotermicamente a: a) 650°C, b) 600°C e c) 550°C.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A Figura 15 apresenta as micrografias do tratamento em que a temperatura de austenitização foi de 900°C, seguido de tratamento isotérmico a 650°C (B11), 600°C (B12) e a 550°C (B13). Estas condições de tratamento térmico também foram selecionadas para investigar os efeitos do tratamento isotérmico no espaçamento interlamelar da perlita. As micrografias da Figura 15 (a), (b) e (c) são respetivamente, das condições B11, B12 e B13. Todas estas condições de tratamento revelaram microestrutura completamente perlítica.

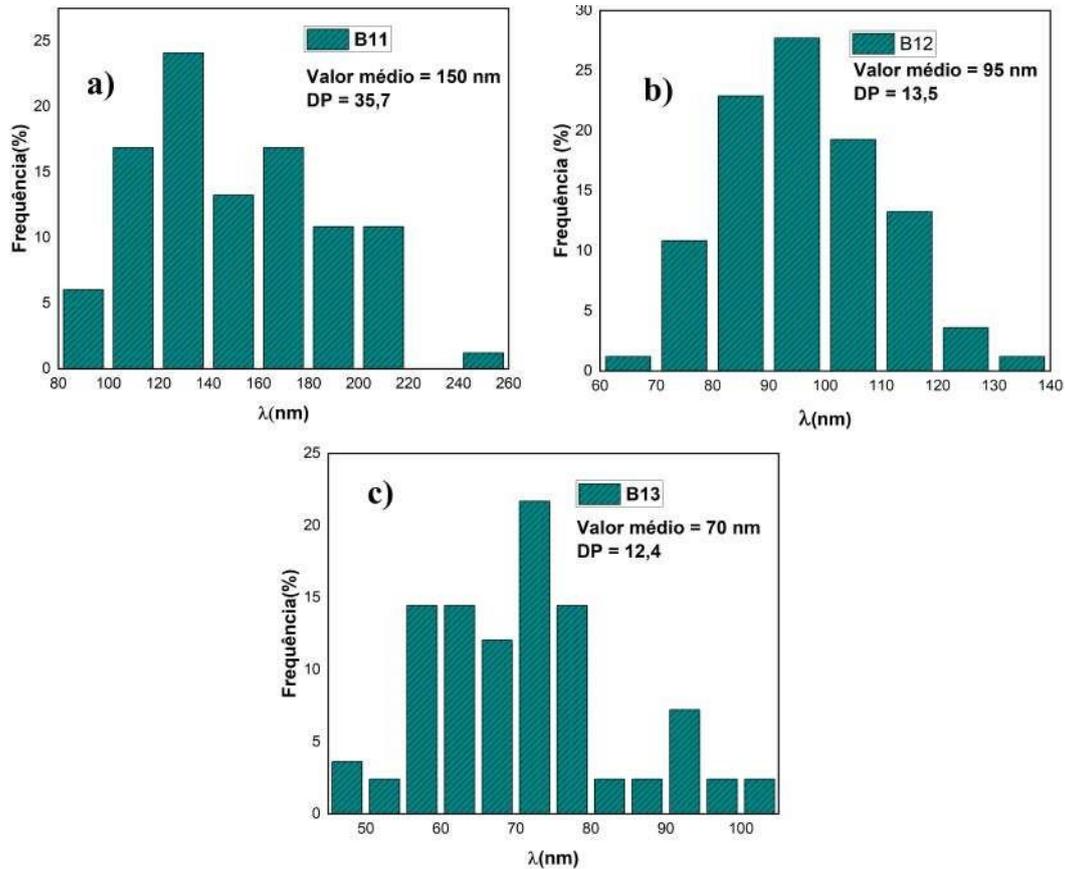
Figura 15 - Análise micrográfica das amostras austenitizadas a 900°C e tratada isotermicamente: a) 650°C, b) 600°C e c) 550°C.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Os gráficos da Figura 16 exibem os resultados do espaçamento interlamelar da perlita, obtidos por meio de micrografias de amostras austenitizadas a 900°C e submetidas a tratamento isotérmico a 650°C (condição A11), 600°C (condição B12) e 550°C (condição B13). Os valores médios para o espaçamento interlamelar da perlita nessas condições foram, respectivamente, 150nm (Figura 15 (a)), 95nm (Figura 15 (b)) e 70nm (Figura 15 (c)). Esses resultados corroboram a observação anterior sobre a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita à medida que a temperatura de tratamento isotérmico é reduzida.

Figura 16 - Histograma do espaçamento interlamelar da perlita da amostra austenitizada a 900°C e tratada isotermicamente a: a) 650°C, b) 600°C e c) 550°C.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Nas amostras com temperaturas de austenitização idênticas, mas diferentes temperaturas de tratamento isotérmico (por exemplo, A11, A12 e A13), foi observado que o espaçamento interlamelar da perlita aumenta à medida que a temperatura do tratamento isotérmico é elevada. Essa observação é atribuída ao fato de que o aumento da temperatura de transformação isotérmica resulta em uma maior velocidade de difusão atômica, estimulando o crescimento das lamelas de cementita e ferrita. Consequentemente, isso leva a um maior espaçamento interlamelar. Resultados semelhantes foram observados e corroborados por pesquisas anteriores, como demonstrado por (ELWAZRI *et al.*, 2005a).

Notou-se que, ao analisar amostras com diferentes temperaturas de austenitização, mas submetidas ao mesmo tratamento isotérmico, aquelas com temperatura de austenitização mais elevadas, como as amostras A11 e B11, exibiram um espaçamento interlamelar da perlita mais amplo. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de que as temperaturas de austenitização mais elevadas induzem uma cinética de transformação de fase mais intensa, permitindo, assim, um crescimento das lamelas de cementita quando essas amostras são posteriormente expostas às mesmas temperaturas de tratamento isotérmico.

A literatura sugere que o aumento da temperatura de austenitização resulta em uma redução no espaçamento interlamelar da perlita, um efeito observado tanto na amostra FR1 quanto na FR2. A amostra FR1 foi austenitizada a 1100°C, enquanto a FR2 foi austenitizada a 900°C, apresentando espaçamentos de 269nm e 318nm, respectivamente. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de que o gradiente de temperatura na amostra FR1 é mais significativo do que na FR2, resultando em um processo de resfriamento mais prolongado. Essa observação foi também fundamentada por (LI *et al.*, 2013), que explicaram a diminuição da temperatura de transição de fase inevitavelmente leva a um aumento no grau de superresfriamento, intensificando a taxa de nucleação da perlita. Por outro lado, a redução da temperatura de transformação de fase diminuirá a taxa de difusão (associada ao impulso de crescimento de lamelas devido à difusão do carbono), resultando em lamelas mais curtas de perlita.

Tabela 4 - Resumo dos resultados do espaçamento interlamelar da perlita das diferentes condições de tratamento térmico.

| Condição de tratamento | Espaçamento interlamelar (μm) |
|------------------------|--|
| FR1 | 252 |
| FR2 | 322 |
| A11 | 198 |
| A12 | 105 |
| A13 | 87 |
| B11 | 150 |
| B12 | 95 |
| B13 | 70 |

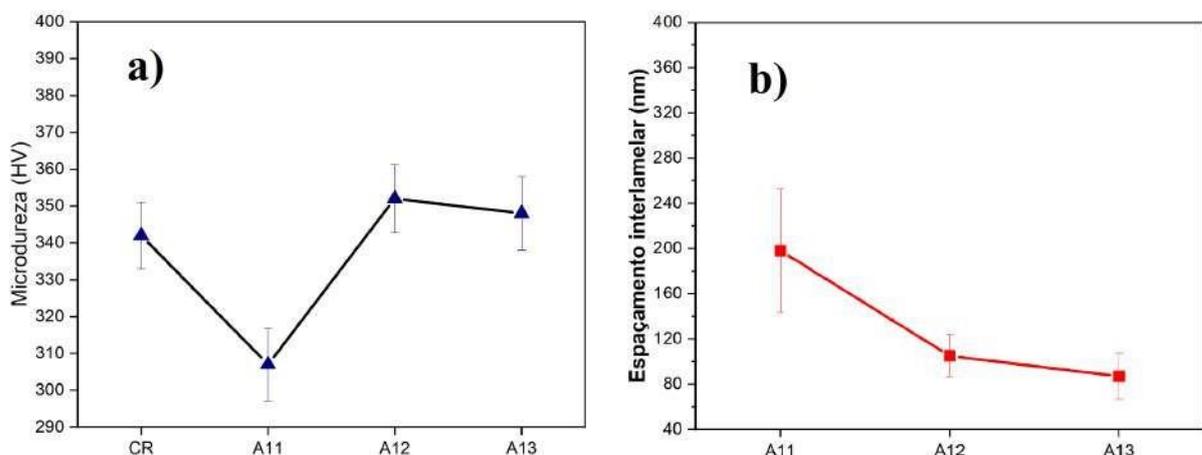
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

5.3. Resultado de microdureza

Nesta subseção são apresentadas as medidas dos ensaios de microdureza Vickers (HV) e de dureza Rockwell C (HRC) das diferentes condições de tratamento térmico, essas medidas foram conduzidas ao longo da superfície das amostras. Ao longo da subseção as medidas do espaçamento interlamelar serão apresentadas nos gráficos de microdureza, como forma de avaliar a relação entre essas duas variáveis estudadas.

O gráfico da Figura 17 (a) e (b) fornece os valores da microdureza Vickers e do espaçamento interlamelar da perlita, ambos em função das diferentes condições de tratamento térmico. Este é referente às microdurezas das amostras austenitizadas a 1100°C seguido de tratamento isotérmico a 650°C, 600°C e 550°C, o qual os valores de microdureza das amostras nessa condição foram respectivamente 307 HV, 352 HV e 348 HV. De certo modo, pode-se afirmar que a diminuição da temperatura de tratamento isotérmico tenha provocado aumento da microdureza, apesar dos valores de microdureza obtidos nas amostras tratadas a 600°C e a 550°C terem permanecidos praticamente iguais, fato que pode ser atribuído à pouca diferença entre as suas medidas de espaçamento interlamelar da perlita e esses resultados podem ser vistos na Figura 17 (b). onde o espaçamento interlamelar da perlita para essas amostras foram de 189nm, 102nm e 92nm.

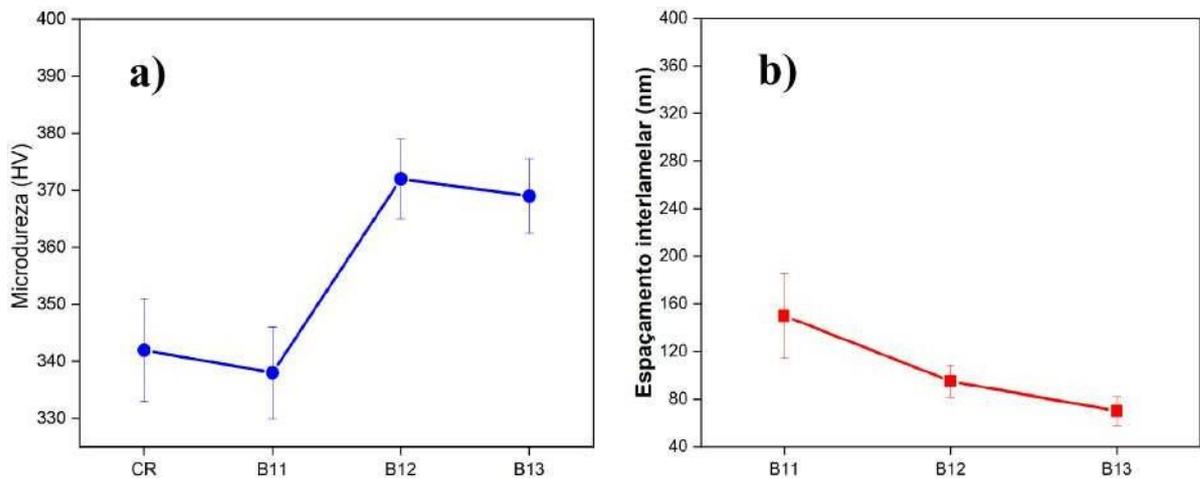
Figura 17 - Condição de tratamento em que as amostras foram austenitizadas a 1100°C e tratadas isotermicamente a 650, 600 e 550°C: a) microdureza Vickers (HV); b) os seus respectivos espaçamentos interlamelares.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na Figura 18 (a) os resultados de microdureza das amostras austenitizadas a 900°C seguido de tratamento isotérmico a 650°C, 600°C e 550°C foram respectivamente, 338 HV, 372 HV e 369 HV. Como observado na outra condição supracitada, pode-se afirmar novamente que o aumento da microdureza tenha sido provocado devido a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita, mas novamente, observou-se que os valores de microdureza das condições a tratamento isotérmico a 600°C e a 550°C tiveram pequena diferença, entretanto isso não pode ser atribuído à proximidade das suas medidas do espaçamento interlamelar da perlita, pois os valores foram de 134nm (650°C), 98nm (600°C) e 70nm (550°C), sendo as diferenças das condições a 600°C e a 550°C significativas.

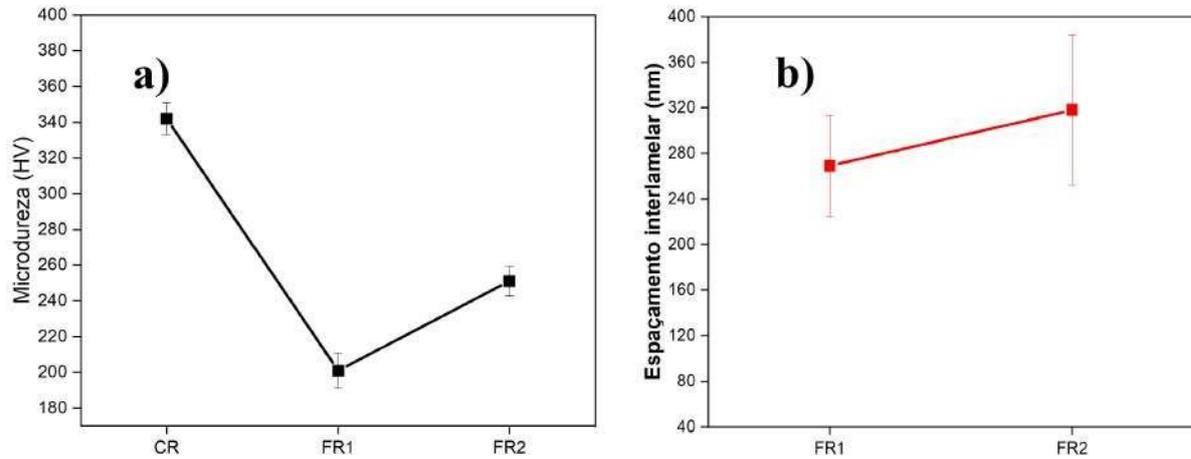
Figura 18 - Condição de tratamento em que as amostras foram austenitizadas a 900°C e tratadas isotermicamente a 650, 600 e 550°C: a) microdureza Vickers (HV); b) os seus respectivos espaçamentos interlamelares.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Por fim, a Figura 19 mostra os resultados de microdureza e do espaçamento interlamelar das amostras austenitizadas a 1100°C e 900°C, ambas resfriadas completamente dentro do forno. A microdureza da amostra austenitizada a 1100°C foi de 201 HV e da austenizada a 900°C foi de 251 HV, considerando que o espaçamento interlamelar da perlita foi de 269 nm e 318 nm respectivamente. Portanto, ao estabelecer relação entre essas duas condições de tratamento, nota-se que a diminuição da temperatura de austenitização colabora para o aumento da microdureza e para um aumento no espaçamento interlamelar da perlita. Tal fato contradiz o que tem acontecido com os tratamentos anteriores, no qual o espaçamento interlamelar da perlita apresentou-se de maneira inversa a microdureza.

Figura 19 - a) Condição de tratamento das amostras resfriadas ao forno após o processo de austenitização a 1100°C (FR1) e 900°C (FR2): a) microdureza Vickers (HV); b) os seus respectivos espaçamentos interlamelar.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Como a amostra na condição recebida não apresentou microestrutura predominantemente perlítica, não foi possível medir o espaçamento interlamelar da perlita, porém apresentou uma microdureza de 342 HV.

Na Tabela 5 é apresentada um resumo das medidas (micro)dureza Vickers e Rockwell C, pelo qual é possível perceber que as medidas da dureza Rockwell C apresentaram grande sensibilidade nos resultados dando suporte às medidas de microdureza Vickers (HV), essa observação permite avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos não só a nível microscópico, mas também numa escala maior. Dito isto, observou-se o aumento da microdureza com a diminuição da temperatura de tratamento isotérmico, o que está associado a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita. Também se constatou que a diminuição da temperatura de austenitização para amostras tratadas a mesma temperatura isotérmica, implica em um aumento da micro(dureza), esse fenômeno acompanha a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita.

Tabela 5 - Resumo dos resultados de microdureza Vickers e dureza Rockwell C da amostra como recebida e das amostras tratadas termicamente.

| Amostra | austenitização (°C) | Temperatura isotérmica | resfriamento ao forno | Microdureza (HV) (%) | Dureza (HRC) |
|---------|---------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| CR | – | | | 342 | 38 |
| FR1 | 1100 | | sim | 201 | 25 |
| FR2 | 900 | | sim | 251 | 27 |
| A11 | 1100 | 650 | | 307 | 31 |
| A12 | 1100 | 600 | | 352 | 37 |
| A13 | 1100 | 550 | | 348 | 34 |
| B11 | 900 | 650 | | 338 | 35 |
| B12 | 900 | 600 | | 372 | 39 |
| B13 | 900 | 550 | | 369 | 39 |

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A amostra com a menor temperatura de austenitização apresentou maior microdureza, pois a amostra FR1 teve 201 HV e FR2 teve 251 HV. Segundo (RASTEGARI *et al.*, 2015b) esse fenômeno deve-se ao fato de que a diminuição da temperatura de austenitização causa a diminuição do tamanho de grão. Desse modo, por meio da relação Hall Pach (SAADA, 2005) sabe-se que grãos adjacentes menores implicam em diferentes orientações cristalográficas e em menor grau de liberdade para movimento de discordâncias nos contornos de grão, o que possibilita aumento na dureza do material. Essa observação indica que possivelmente a temperatura de austenitização exerça maior influência do que o espaçamento interlamelar da perlita no que diz respeito às variações na microdureza.

6. CONCLUSÃO

Dada a condição da amostra como recebida e dos tratamentos térmicos realizados conclui-se que:

Os tratamentos térmicos empregados possibilitaram a formação de uma microestrutura totalmente perlítica, e a redução do espaçamento interlamelar da perlita ocorre conforme a temperatura de tratamento isotérmico é diminuída. Já quando as amostras foram submetidas a mesma temperatura de tratamento isotérmico, a diminuição da temperatura de austenitização também conduziu a uma redução do espaçamento interlamelar da perlita. No caso do processo de resfriamento no forno temos que o aumento da temperatura de austenitização resultou em uma diminuição do espaçamento interlamelar da perlita.

A redução da temperatura de tratamento isotérmico, e conseqüentemente, a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita, resultou em um aumento da (micro)dureza para amostras com a mesma temperatura de austenitização. Em contrapartida, em amostras resfriadas no forno observou-se que o aumento da temperatura de austenitização exerce uma influência maior sobre a microdureza do que o espaçamento interlamelar da perlita; ou seja, as amostras com um maior espaçamento interlamelar resultaram em valores mais elevados de (micro)dureza nesse contexto específico. Tais resultados indicam a complexidade das interações entre os parâmetros de tratamento térmico e as propriedades mecânicas do material.

REFERÊNCIAS

- CABALLERO, F. G.; CAPDEVILA, C.; ANDRÉS, C. G. D. Mathematical modeling of iron and steel making processes. modelling of kinetics of austenite formation in steels with different initial microstructures. **ISIJ International**, v. 41, p. 1093–1102, 2001. ISSN 0915-1559.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**. 9. ed. [S.l.]: LTC, 2016.
- CARVALHO, R. P. L. de; BERES, M.; MASOUMI, M.; ABREU, H. F. G. de. The effect of pearlite morphology and crystallographic texture on environmentally assisted cracking failure. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier Ltd, v. 126, 8 2021. ISSN 13506307.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7º edição. ed. [S.l.: s.n.], 1996.
- CLARKE, K. D. **Austenite Formation and Microstructural Control in Low-Alloy Steels**. Elsevier, 2014. v. 12. 345-361 p. ISBN 9780080965338. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01211-5>>.
- DOLLAR, M.; BERNSTEIN, I. M.; THOMPSON, A. W. **INFLUENCE OF DEFORMATION SUBSTRUCTURE ON FLOW AND FRACTURE OF FULLY PEARLITIC STEEL**. 1988. 31-320 p.
- DURGAPRASAD, A.; GIRI, S.; LENKA, S.; KUNDU, S.; CHANDRA, S.; MISHRA, S.; DOHERTY, R. D.; SAMAJDAR, I. Microstructural engineering in eutectoid steel: A technological possibility? **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, Springer US, v. 49, p. 1520–1535, 2018. ISSN 10735623. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11661-018-4501-y>>.
- ELWAZRI, A. M.; WANJARA, P.; YUE, S. Effect of prior-austenite grain size and transformation temperature on nodule size of microalloyed hypereutectoid steels. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 36, n. 9, p. 2297–2305, 2005. ISSN 10735623.
- ELWAZRI, A. M.; WANJARA, P.; YUE, S. Measurement of pearlite interlamellar spacing in hypereutectoid steels. **Materials Characterization**, v. 54, n. 4-5, p. 473–478, 2005. ISSN 10445803.
- EMBURY, D. The formation of pearlite in steels. **Phase Transformations in Steels**, v. 1, p. 276–310, 2012.
- FANFONI, M.; TOMELLINI, M. The johnson-mehl-avrami-kolmogorov model : A brief review (*) a brief review (*). **IL NUOVO CIMENTO**, v. 20 D, N. 7-8, 1998.
- FEITOSA, A. L. M.; ALMEIDA, E. de S.; RIBAMAR, G. G.; SILVA, M. J. G. D. Análise da microestrutura e das propriedades mecânicas do vergalhão ca-50 em diferentes estados de tratamento. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaaios dos Materiais**. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2000.
- GAVRILJUK, V. G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation. **Materials Science and Engineering A**, v. 345, n. 1-2, p. 81–89, 2003. ISSN 09215093.

HILLERT, M. Discussion of "a personal commentary on transformation of austenite at constant subcritical temperatures". In: . [S.l.: s.n.], 2011. v. 42, p. 541–542. ISSN 10735623.

HOWELL, P. R. The pearlite reaction in steels: Mechanisms and crystallography. **Materials Characterization**, v. 40, n. 4-5, p. 227–260, 1998. ISSN 10445803.

JONES, S. J.; BHADESHIA, H. K. KINETICS OF THE SIMULTANEOUS DECOMPOSITION OF AUSTENITE INTO SEVERAL TRANSFORMATION PRODUCTS. v. 6454, n. 96, 1997.

KRAUSS, G. **Steels : Processing, Structure, and Performance**. [S.l.]: ASM International, 2015. 704 p. ISBN 9781627080835.

LEE, S. Y.; JEONG, S. W.; HWANG, B. Effect of microstructural factors on room- and low-temperature impact toughness of hypoeutectoid steels with ferrite-pearlite structure. **Korean Journal of Materials Research**, v. 25, n. 11, p. 583–589, 2015. ISSN 12250562.

LEGUILLON, D.; MARTIN Éric; LAFARIE-FRENOT, M. C. Flexural vs. tensile strength in brittle materials. **Comptes Rendus - Mecanique**, Elsevier Masson SAS, v. 343, p. 275–281, 2015. ISSN 16310721.

LI, J.; ANDREW, G.; LIU, W. Effects of austenitization and cooling rates on the microstructure in a hypereutectoid steel. **Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica**, v. 49, p. 583–592, 5 2013. ISSN 04121961.

LI, X. C.; DING, H. H.; WANG, W. J.; GUO, J.; LIU, Q. Y.; ZHOU, Z. R. Investigation on the relationship between microstructure and wear characteristic of rail materials. **Tribology International**, Elsevier Ltd, v. 163, 11 2021. ISSN 0301679X.

PORCARO, R. R.; LIMA, D. A. P. de; FARIA, G. L. de; GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C. Microestrutura e propriedades mecânicas de um aço para trilhos ferroviários soldado por centelhamento. **Soldagem e Inspecao**, v. 22, n. 1, p. 59–71, 2017. ISSN 19806973.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. **Phase Transformations in Metals and Alloys**. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2009. v. 53. 536 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796.

QIAO, L.; ZHU, J.; WANG, Y. Modeling of alloying effect on isothermal transformation: A case study for pearlitic steel. **Advanced Engineering Materials**, v. 23, p. 1–7, 2021. ISSN 15272648.

RASTEGARI, H.; KERMANPUR, A.; NAJAFIZADEH, A. Effect of initial microstructure on the work hardening behavior of plain eutectoid steel. **Materials Science Engineering A**, p. 103–109, 2015.

RASTEGARI, H.; KERMANPUR, A.; NAJAFIZADEH, A. Investigating the effects of short time austenitizing and cooling rate on pearlitic microstructure and mechanical properties of a hot rolled plain eutectoid carbon steel. **Materials and Design**, Elsevier Ltd, v. 67, p. 217–223, 2 2015. ISSN 18734197.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2. ed. [S.l.]: Editora Guanabara Dois S.A, 1982.

RIDLEY, N. Review of the Data on the Interlamellar Spacing of Pearlite. **Metallurgical transactions. A, Physical metallurgy and materials science**, v. 15 A, n. 6, p. 1019–1036, 1983. ISSN 03602133.

- RODRIGUES, K. F. Caracterização das transformações de fases isotérmicas e dos seus respectivos produtos em tres aços eutetóides de aplicação ferroviária. n. December, 2019.
- RODRIGUES, K. F.; FARIA, G. L. D. Characterization and prediction of continuous cooling transformations in rail steels. **Materials Research**, Universidade Federal de Sao Carlos, v. 24,2021. ISSN 19805373.
- SAADA, G. Hall-petch revisited. **Materials Science and Engineering A**, v. 400-401, p.146–149, 7 2005. ISSN 09215093.
- SAHAY, S. S.; MOHAPATRA, G.; TOTTEN, G. E. Overview of pearlitic rail steel: Accelerated cooling, quenching, microstructure and mechanical properties. **Journal of ASTM International**, v. 6, 2009. ISSN 1546962X.
- SANTOS, R. G. dos. **Transformações de fases em materiais metálicos**. [S.l.]: Editora daUnicamp, 2006.
- SMOLJAN, B.; ILJKIĆ, D.; HANZA, S. S.; HAJDEK, K. Mathematical modelling of isothermal decomposition of austenite in steel. **Metals**, MDPI AG, v. 11, 8 2021. ISSN 20754701.
- TALEFF, E. M.; LEWANDOWSKI, J. J.; POURLADIAN, B. Microstructure-property relationships in pearlitic eutectoid and hypereutectoid carbon steels. **Jom**, v. 54, n. 7, p. 25–30,2002. ISSN 10474838.
- TORIBIO, J.; GONZÁLEZ, B.; MATOS, J. C.; AYASO, F. J. Influence of microstructure on strength and ductility in fully pearlitic steels. **Metals**, MDPI AG, v. 6, 12 2016. ISSN 20754701.
- Vander Voort, G. F. The Interlamellar Spacing of Pearlite. **Practical Metallography**, v. 52, n. 8,p. 419–436, 2015. ISSN 0032-678X.
- W.J. NAM. **Effect of Microstructural Factors on Ductility of Drawn Pearlitic Steels**. 2004.710–715 p.
- XU, J.-q.; YA-ZHENG, L.; SHU-MEI, Z. Calculation Models of Interlamellar Spacing of Pearlite in High-speed 82B Rod XU. **JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL**, 2008.
- YASUDA, T.; NAKADA, N. Effect of carbon concentration in austenite on cementite morphology in pearlite. **ISIJ International**, Iron and Steel Institute of Japan, v. 61, p. 372–379,2021. ISSN 09151559.
- ZHANG, C. L.; LIU, X.; ZHOU, L. Y.; LIU, Y. Z. Influence of pearlite interlamellar spacing on strain hardening behaviour in spring steel 60Si2MnA. **Procedia Engineering**,Elsevier B.V., v. 81, n. October, p. 1283–1287, 2014. ISSN 18777058. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.111>>.
- ZHANG, M. X.; KELLY, P. M. The morphology and formation mechanism of

pearlite in steels. **Materials Characterization**, Elsevier Inc., v. 60, p. 545–554, 2009. ISSN 10445803. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2009.01.001>>.