



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

STEPHANY APARECIDA SANTOS DA MATA

ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E DAS ALTERAÇÕES NA DUREZA DE UM
AÇO PERLÍTICO ESFEROIDIZADO APÓS TRATAMENTO TÉRMICO E
LAMINAÇÃO A FRIO

FORTALEZA

2022

STEPHANY APARECIDA SANTOS DA MATA

ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E DAS ALTERAÇÕES NA DUREZA DE UM
AÇO PERLÍTICO ESFEROIDIZADO APÓS TRATAMENTO TÉRMICO E
LAMINAÇÃO A FRIO

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

Sistema de Bibliotecas

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

M375a Mata, Stephany Aparecida Santos da.
Análise da microestrutura e das alterações na dureza de um aço perlítico esferoidizado após tratamento térmico e laminação a frio / Stephany Aparecida Santos da Mata. – 2022.
48 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. Perlita. 2. Esferoidizado. 3. Laminação. 4. Aço 1073. I. Título.

CDD 669

STEPHANY APARECIDA SANTOS DA MATA

ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E DAS ALTERAÇÕES NA DUREZA DE UM
AÇO PERLÍTICO ESFEROIDIZADO APÓS TRATAMENTO TÉRMICO E
LAMINAÇÃO A FRIO

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.

Aprovado em: 25/11/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. 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

Primeiramente a Deus, por me permitir caminhar tão longe, me conceder tantas graças e ser a minha força.

À minha mãe, Eudaisa Maria, por ser o meu maior exemplo de resiliência e por me apoiar em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Jorge e Edney, pelos conselhos e orientação até aqui, como também por me proporcionarem momentos tão felizes.

Ao meu namorado, Matheus, por ser meu apoiador em todos os momentos, por me proporcionar tantos momentos felizes, sempre com muito carinho e amor.

Aos meus sobrinhos, por ressignificarem tantos momentos em família, mostrando a leveza de cada simples brincadeira.

À minha amiga, Juliana, por me ajudar em todos os momentos, desde as atividades da graduação até dividir tantos momentos da nossa vida e por me permitir ser madrinha do Damião.

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu por toda a orientação desde os assuntos da graduação até conselhos que vou levar para a vida, e especialmente por me ouvir e ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Dr. Flávio Herculano por todos os ensinamentos diários, quando fui bolsista no LACAM, por todo carinho e acolhimento de sempre e, por fim, pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos alunos bolsistas do LACAM por me ajudarem na realização das atividades experimentais, pelos conselhos e apoio, Suyanne Freire, Guilherme Schmalz e João Vitor.

Aos mestrandos e doutorandos do LACAM, que foram grandes exemplos quando fui bolsista e que me ajudaram com o desenvolvimento deste trabalho.

Às minhas amigas, Vitória Lima e Victoria Barroso, por partilharem tantos momentos e por tornarem a rotina da graduação mais leve.

Às minhas amigas, Ana Paula e Thais Colares, por estarem comigo desde o colégio, sempre me apoiando e me aconselhando em cada etapa.

Aos meus amigos do grupo Food Pic, por tornarem mais leve toda a rotina, e por dividir tantos momentos felizes e únicos.

RESUMO

O aço apresenta-se como item de destaque na indústria, na construção civil e no cotidiano de todos, desde atividades simples até a indústria naval, com aplicações mais complexas e, portanto, é necessário que se saiba manipulá-lo e transformar suas propriedades mecânicas para que seja obtido o retorno de acordo com as necessidades. Esse trabalho propõe o estudo da microestrutura do aço 1073, perlítico esferoidizado, e das consequências mecânicas que o mesmo pode sofrer após o tratamento térmico de solubilização seguido de recozimento subcrítico em diferentes tempos no forno e sendo resfriado ao ar. Além de analisar como o mesmo se comporta adicionando a etapa de laminação a frio, com redução de 50% na espessura, para somente então repetir o tratamento térmico descrito anteriormente. Para isso foram realizadas, inicialmente, simulações termodinâmicas, para que pudesse estabelecer a temperatura de austenitização e de recozimento, e, também, os tempos de permanência no forno para que se completasse a diluição com a austenitização e os tempo de recristalização no segundo forno, aquecido para recozimento. Com estas informações foi possível realizar a primeira rota, analisando apenas o tratamento térmico, e, somente então, com outras amostras, reduzir a espessura do material, por meio da laminação a frio e repetir o tratamento térmico. A análise das alterações no arame 1073 foi feita com o uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), para que se obtivesse as imagens da microestrutura. Em seguida, foram realizados ensaios de Dureza Rockwell C nas amostras, analisando assim as alterações mecânicas. Por fim, com o objetivo de alinhar estes dois resultados, microestrutura e dureza, realizou-se a mensuração da área de ferrita. Assim, se justificaram os valores obtidos na dureza, reafirmando quantitativamente os efeitos térmicos, outrora analisados qualitativamente. Portanto, identificou-se que com o tratamento térmico a microestrutura que inicialmente era caracterizada por perlita esferoidizada, passou, à medida que aumentou o tempo de forno no recozimento, a uma perlita mais grossa, em função do coalescimento das esferas. Em relação às propriedades mecânicas, foi notório a diminuição da dureza. Alinhando o que foi observado na microestrutura com a dureza, tem-se que o aumento da área de ferrita convergiu para diminuir a dureza do material. Ao analisar a segunda rota, na qual se somou o processo de laminação, obteve-se inicialmente

uma maior dureza, como consequência do encruamento do aço. Mas, ao realizar o tratamento térmico já aqui padronizado, identificou-se novamente a redução da dureza, em consequência do aumento da área de ferrita. Porém, em relação à microestrutura, não foi possível reverter a presença de esferas de cementita. Diante disso, conclui-se o eficaz resultado obtido apenas com o tratamento térmico e que, ao adicionar a laminação no processo, o tempo e a temperatura já estudados não são suficientes para alterar a microestrutura perlítica esferoidizada.

Palavras-chave: Aço 1073, Solubilização, Recozimento, Microestrutura, Dureza.

ABSTRACT

Steel presents itself as a prominent item in industry, civil construction and in the daily life of everyone, from simple activities to the naval industry, with more complex applications and, therefore, it is necessary to know how to manipulate it and transform its mechanical properties in order to obtain the return according to the demands. This work proposes the study of the microstructure of 1073 steel, pearlitic spheroidized, and the mechanical consequences that the steel can suffer after solution heat treatment followed by subcritical annealing at different times in the oven and being cooled in air. In addition to analyzing how this steel behaves, adding the cold rolling step, with a 50% reduction in thickness, and repeating the heat treatment described before. For this, thermodynamic simulations were initially carried out, so that the austenitization and annealing temperature could be established, and also, the times of permanence in the oven to complete the dilution with the austenitization and the times of recrystallization in the second oven heated for annealing. With this information, it was possible to carry out the first route, analyzing only the heat treatment, and only then, with other samples, to reduce the thickness of the material by cold rolling and repeating the heat treatment. The analysis of changes in wire 1073 was performed using a Scanning Electron Microscope (SEM), in order to obtain images of the microstructure. Then, Rockwell C Hardness tests were performed on the samples in order to analyze the mechanical changes. Finally, in order to align these two results, microstructure and hardness, the measurement of the ferrite area was carried out. Therefore, it was identified that with the heat treatment, the microstructure that was initially characterized by spheroidized pearlite, turned into a thicker pearlite due to the coalescence of the spheres as the annealing furnace time increased, decreasing the hardness. Aligning what was observed in the microstructure along with the hardness, the increase in the ferrite area converged to the decrease in hardness of the material. When analyzing the second route, in which the rolling process was added, a greater hardness was initially obtained, as a consequence of the strain hardening of the steel. But, when performing the heat treatment already standardized here, a reduction in hardness was again identified, as a result of the increase in the area of ferrite. However, in relation to the microstructure, it was not possible to reverse the presence of cementite spheres. Therefore, it was concluded the effective result obtained only with the heat treatment.

With the addition of lamination in the process, the time and temperature studied are not enough to change the spheroidized pearlitic microstructure.

Keywords: 1073 Steel, Solution treatment, Annealing, Microstructure, Hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aços hipoeutetóides	16
Figura 2 – Aços eutetóides	17
Figura 3 – Aços hipereutetóides	18
Figura 4 – Diagrama para um aço hipoeutetóide	22
Figura 5 – Dureza em função da concentração de carbono	26
Figura 6 – Organograma	32
Figura 7 – Diagrama TAA das amostras	33
Figura 8 – Thermocalc do material como recebido	34
Figura 9 – Diagrama TTT das amostras	34
Figura 10 – MEV da amostra Como Recebida	36
Figura 11 – Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos	37
Figura 12 – Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos	38
Figura 13 – Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos	39
Figura 14 – Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos	40
Figura 15 – Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos	41
Figura 16 – Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos	42
Figura 17 – Relações entre as variáveis dureza e percentual de ferrita	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química, em % de massa, da amostra como recebida.	27
Tabela 2 – Identificação das amostras durante as etapas experimentais	29
Tabela 3 – Resultados de dureza	43
Tabela 4 – Aumento da área de ferrita	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Aços-carbono	15
3.1.1	<i>Aços hipoeutetóides</i>	15
3.1.2	<i>Aços eutetóides</i>	17
3.1.3	<i>Aços hipereutetóides</i>	18
3.2	Transformações de fases	19
3.3	Tratamento térmico	19
3.3.1	<i>Diagrama TTA</i>	21
3.3.2	<i>Diagrama TTT</i>	21
3.4	Recozimento	22
3.5	Laminação	23
3.6	Propriedades mecânicas	24
3.7	Ensaio de dureza	25
2.8	Influência das lamelas na dureza do aço perlítico	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Materiais	27
4.2	Métodos	27
4.2.1	<i>Simulação termodinâmica</i>	27
4.2.2	<i>Preparação dos corpos de prova</i>	28
4.2.3	<i>Tratamentos térmicos</i>	29
4.2.4	<i>Preparação metalográfica</i>	30
4.2.5	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	30
4.2.6	<i>Dureza</i>	31
4.3	Organograma	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	Simulação termodinâmica	33
5.2	Micrografias	35

5.2.1	Amostra Como Recebida	35
5.2.2	Termicamente tratadas e sem laminação a frio	36
5.2.2.1	<i>Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos</i>	36
5.2.2.2	<i>Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos</i>	37
5.2.2.3	<i>Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos</i>	38
5.2.3	Termicamente tratadas após 50% de Laminação a frio	39
5.2.3.1	<i>Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos</i>	39
5.2.3.2	<i>Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos</i>	40
5.2.3.3	<i>Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos</i>	41
5.3	Dureza	42
6	CONCLUSÕES	45
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Os materiais são classificados, de modo geral, como polímeros, cerâmicos e metálicos. Este trabalho abordou, especificamente, o grupo dos materiais metálicos, caracterizado, principalmente, por ser composto de uma combinação de elementos químicos metálicos, e ter sua maior usabilidade em função da boa condutividade elétrica e de calor, sem mencionar as qualidades mecânicas (CALLISTER, 2002).

Para obter os materiais metálicos, é necessário que o minério de ferro seja manipulado siderurgicamente, vindo a ser classificado como ferro fundido ou como aço e, então, ter suas propriedades trabalhadas pela indústria. O aço apresenta teor de carbono de no máximo 2%, acima disso já passa a ser classificado como ferro fundido. Além disso, é válido mencionar que, os aços podem se subdividir de acordo com os seus elementos de liga.

Assim, a gama de aplicação do mercado torna o aço um item de fundamental importância para a economia mundial, sendo um fator determinante para o desenvolvimento de um país, principalmente por seu valor de troca. Ademais, o aço pode ser melhorado tanto mecanicamente, como por tratamentos térmicos e elementos de liga, aumentando ainda mais a sua variação de aplicabilidade. As propriedades das ligas ferro-carbono são influenciadas por sua estrutura, os quais os elementos de liga atuam diretamente nas linhas de transformação (CHIAVERINI, 2012). Dessa forma, tem-se no aço o material mais versátil das ligas metálicas, permitindo alterar a microestrutura por meio de processos mecânicos, como laminação, extrusão e outros que possam contribuir para o produto final.

O tratamento térmico consiste de operações, de aquecimento e resfriamento, em temperaturas e tempos específicos, os quais foram traçados por diagramas de fase em simulações termodinâmicas e trazem consigo resultados específicos e das fases esperadas, podendo estipular intervalos de dureza e resistência (CHIAVERINI, 2003). Dentre os tratamentos térmicos específicos, pode-se destacar a solubilização, em que a amostra é submetida a temperatura alta o suficiente para atingir o campo monofásico da solução sólida, no caso dos aços acima, 723°C. Desse modo, obtém-se a homogeneização do material (CALLISTER, 2020). Após a solubilização é possível traçar rotas, inserindo tratamentos térmicos

que ajustem as propriedades da microestrutura de acordo com o objetivo final. Um exemplo é o recozimento, o qual consiste em aquecer o material a uma temperatura alta o suficiente para movimentar os átomos até uma posição de equilíbrio (HIGGINS, 2003).

Como mencionado, além dos tratamentos térmicos pode-se utilizar a conformação mecânica. Uma de uso recorrente na indústria é a laminação, na qual cilindros comprimem o metal, reduzindo a espessura, mas é mantido o volume inicial da amostra. Outra consequência direta da laminação é o aumento do encruamento na microestrutura do aço, contribuindo para o aumento da dureza ao mesmo tempo em que diminui a ductilidade do aço.

Portanto, reafirma-se a capacidade de trabalhabilidade do aço por meio de métodos experimentais termodinâmicos e mecânicos, os quais podem ser aplicados à indústria e contribuir na funcionalidade do metal e na usabilidade pelos operadores no cotidiano deste produto final.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a microestrutura e o comportamento de dureza do aço perlítico esferoidizado 1073, quando submetido ao tratamento térmico de solubilização seguido de recozimento subcrítico e, também, na condição do aço laminado a frio, com o tratamento térmico supracitado.

2.2 Objetivos específicos

- a) estudar a microestrutura do aço perlítico esferoidizado 1073 e a dureza do mesmo como recebido;
- b) analisar qualitativamente a microestrutura do aço após tratamento térmico, como também em ação conjunta à laminação;
- c) comparar quantitativamente as fases formadas após as alterações termomecânicas e suas consequências na dureza do aço.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços-carbono

As ligas ferrosas são divididas em dois grupos: aços e ferros fundidos, neste trabalho os estudos foram direcionados aos aços, os quais têm teores de no máximo 2,0% (CHIAVERINI,2012). Os aços de modo geral enquadram-se em grupos, seja de acordo com a composição dos elementos de liga, seja por processamento os quais passaram para serem obtidos. Por exemplo, os elementos de liga são adicionados à medida que se buscam melhores características mecânicas.

Especificamente, o aço carbono é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais. Em comparação aos aços ligas, estes terão os elementos residuais em maiores proporções.

Para estudo e análise das propriedades desses materiais usa-se como base o Diagrama de Equilíbrio Fe-C, o qual estabelece a composição esperada à medida que varia a temperatura e o percentual de carbono, considerando o “equilíbrio metaestável”, uma vez que as modificações são obtidas quando este é resfriado de forma extremamente lenta. A partir deste diagrama, classificam-se os aços em eutetóide, hipoeutetóide e hipereutetóide, sendo o critério utilizado o percentual de carbono, isto é, aproximadamente, com 0,77%, entre 0,008% e 0,77% e por fim, entre 0,77% e 2,11%, respectivamente. Diante disso, é de suma importância compreender os conceitos básicos destas três classificações, e assim, direcionar os estudos para o aço hipoeutetóide, uma vez que se refere ao objeto de estudo deste trabalho, aço carbono 1073.

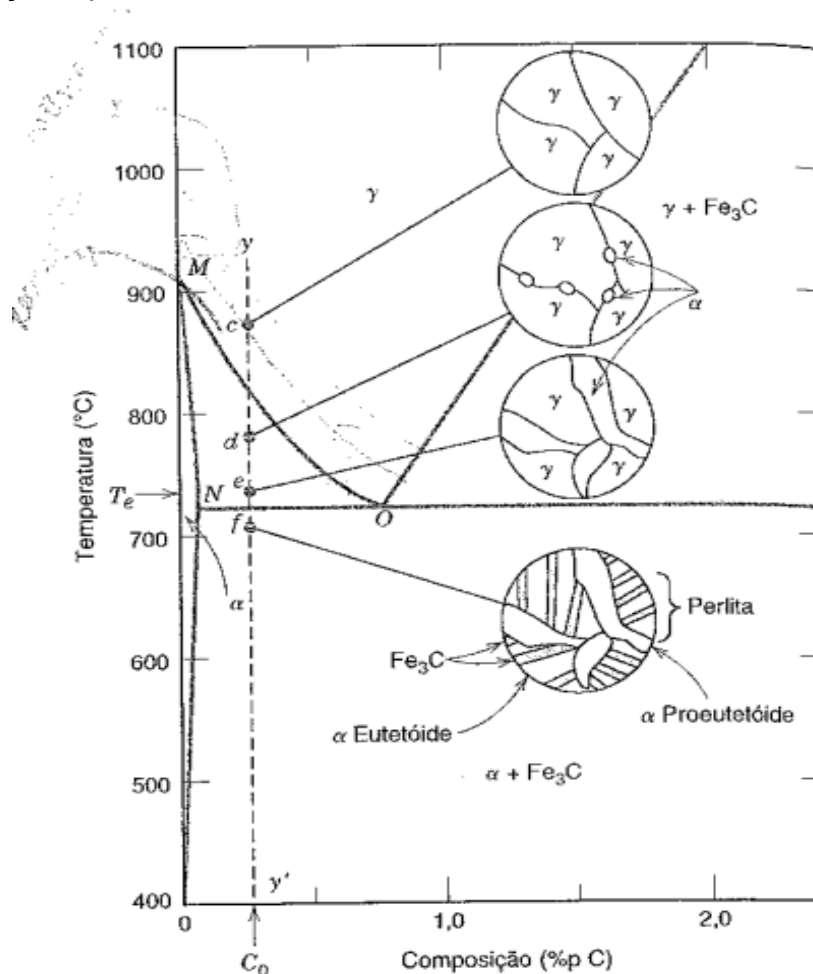
3.1.1 Aços hipoeutetóides

Com a combinação do carbono e ferro variando o percentual de 0,008 a 0,77%, as possíveis transformações de fase, considerando inicialmente 875 °C, a microestrutura consistirá de austenita (γ), seguido de resfriamento lento e em condições de equilíbrio, até 775 °C por exemplo, é obtida a combinação de fases:

ferrita e austenita ($\alpha + \gamma$). É válido citar que nesta combinação as proporções variam à medida que diminui ainda mais a temperatura. Portanto, assim que atingida a temperatura diretamente inferior à eutetóide, toda a fase austenítica se transformará em perlita, e a fase ferrita estará presente como uma matriz ao redor das colônias de perlita, podendo chamá-la de ferrita eutetóide, enquanto que a inicialmente supracitada é identificada como ferrita proeutetóide. A perlita é importante ressaltar que não é uma fase, e sim a combinação de duas fases, ferrita (cúbica de corpo centrado) e cementita (ortorrômbica), em forma de lamelas estreitamente espaçadas e alternadas.

Na Figura 1 é apresentada a representação gráfica da diminuição da temperatura, considerando as principais transições, desde o cruzamento da curva A3, como primeira transição, seguida da passagem da linha A1. Ademais, é possível observar como as fases se alinharam preferencialmente no grão.

Figura 1 – Aços hipoeutetóides

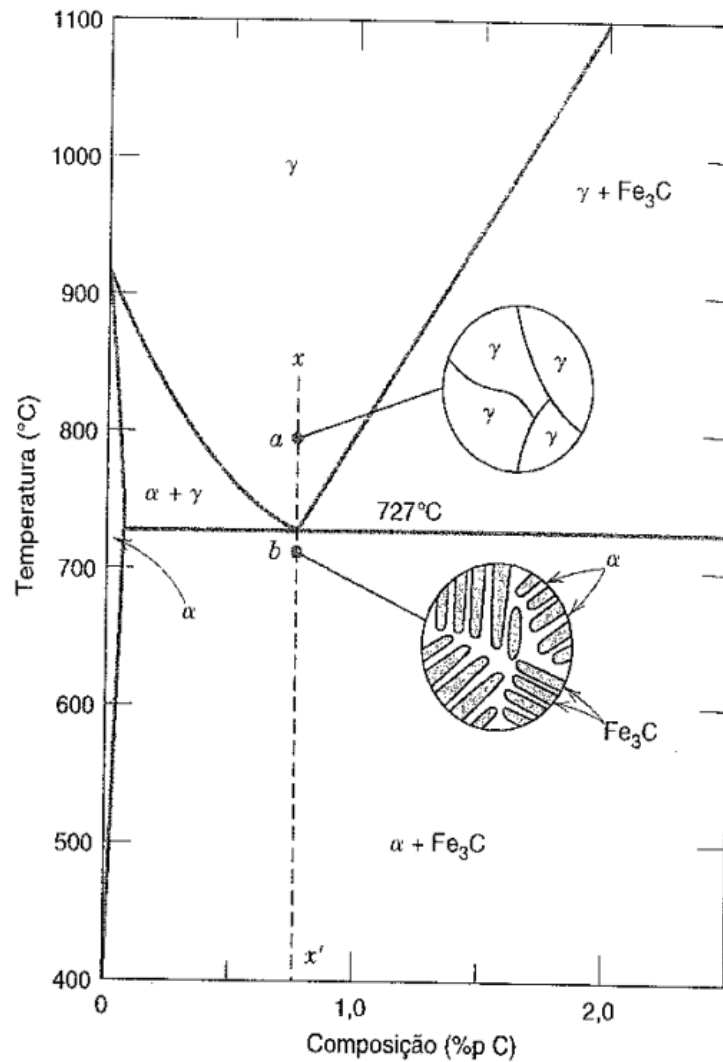


Fonte: Callister (2020)

3.1.2 Aços eutetóides

São aços com a combinação de Fe-C (ver Figura 2) em aproximadamente 0,77% de carbono, e apresenta, em uma temperatura inicial de 800°C, microestruturalmente 100% de austenita. A partir de um resfriamento lento, até atingir o ponto de transição de fase em 727°C, ponto eutético, resulta na formação de perlita, neste caso a espessura relativa da camada é de aproximadamente 8 para 1 (CALLISTER, 2020).

Figura 2 – Aços eutetóides

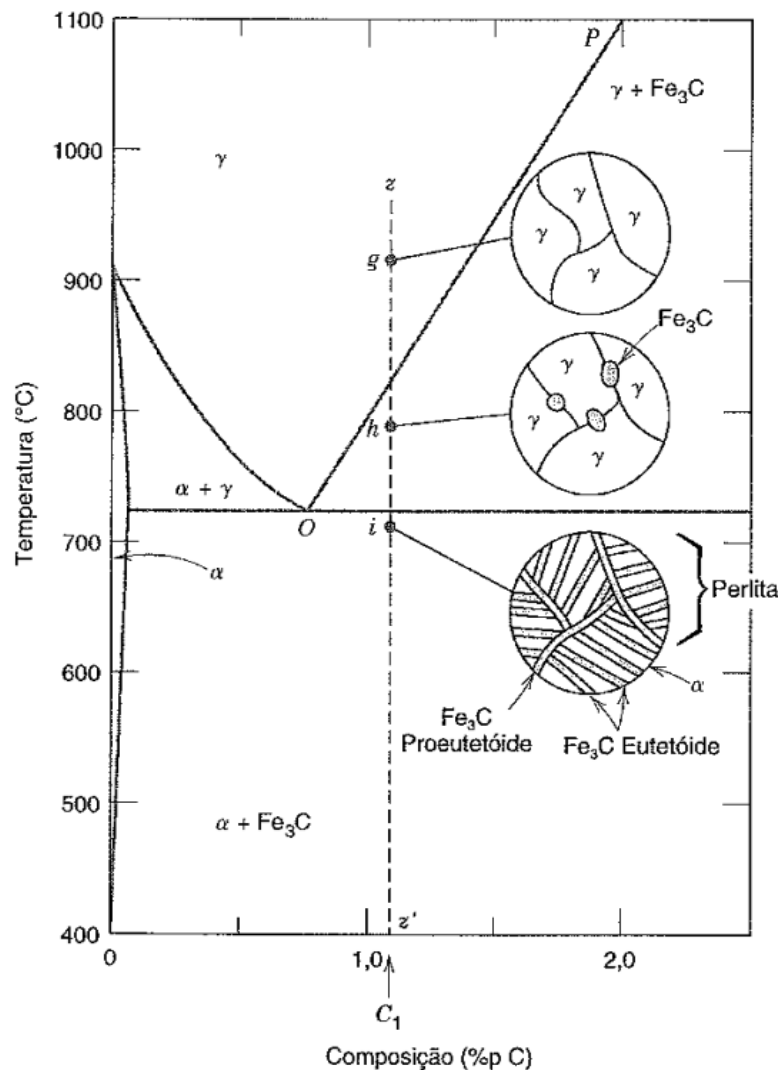


Fonte: Callister (2020)

3.1.3 Aços hipereutetóides

Por fim, ao se analisarem as ligas hipereutetóides (ver Figura 3), encontram-se aquelas com composição entre 0,77% e 2,11% de carbono, aproximadamente. Como nas situações anteriores tem-se que, considerando em temperaturas mais elevadas, 800 °C, por exemplo, encontrar uma microestrutura 100% austenitizada e ao resfriar em condições de equilíbrio, até temperatura superior à eutetóide, obter uma combinação de austenita com cementita proeutetóide.

Figura 3 – Aços hipereutetóides



Fonte: Callister (2020)

Ao diminuir a temperatura até ultrapassar a isoterma, obtém-se a perlita, e a austenita restante, outrora presente, é toda transformada. Assim, a estrutura final será perlita, com a combinação das fases: cementita eutetóide e ferrita, somando-se a cementita proeutetóide.

Assim, tem-se uma breve contextualização das transformações de fases esperadas quando se consideram as condições de equilíbrio para a liga de ferro carbono. Entretanto, ao se trabalhar com condições mais próximas do real, a microestrutura formada tende a aproximar-se dos gráficos plotados a partir da microestrutura específica da liga a ser trabalhada, assim como estabelecer as condições reais de aquecimento e resfriamento que o material será submetido.

Dessa forma, são plotados os diagramas Temperatura, Tempo e Transformação (TTT) e Temperatura, Tempo e Austenitização (TTA). Com base nesses diagramas pode-se direcionar as possíveis rotas para melhor analisar as características de um material, uma vez que se tem parâmetros mais assertivos.

3.2 Transformações de fases

As transformações de fase do aço carbono resultam da decomposição da austenita quando submetida a tratamentos térmicos. Essas alterações ajustam-se de acordo com o percentual do elemento de liga e a velocidade de resfriamento. A transformação da austenita pode acontecer ou por difusão ou cisalhamento, assim como pela combinação desses dois fatores (SILVA, 2010).

Assim, tem-se que quando ultrapassadas as “Temperaturas Críticas” são obtidas, dentre outras fases, a ferrita e a cementita, sendo essas as principais. Ao se analisar mecanicamente as fases obtidas, tem-se que a ferrita apresenta baixa dureza e resistência mecânica além de ser uma fase dúctil, por exemplo. Quando se combinam a ferrita com lamelas de cementita é obtida a perlita, reafirmando que não se trata de uma fase e sim a combinação de duas delas (CALLISTER, 2020).

3.3 Tratamento térmico

Tratamento térmico trata-se de um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam afetar as características de aços

e ligas especiais (CHIAVERINI,2012). Isto é, uma forma de encontrar as melhores propriedades mecânicas, e por vez até química dos materiais.

As temperaturas as quais pode-se trabalhar os aços estão desde temperaturas abaixo de 0°C até temperaturas mais altas que as de austenitização, específica para aquela liga que está sendo trabalhada, no caso dos aços ferro carbono, 723 °C. Desse modo, é de suma importância o conhecimento do diagrama do aço em questão e quais fases são esperadas em condições ideais, para somente então trabalhar fora deste ciclo. O aço carbono hipoeutetóide pode ser usado como modelo padrão para o arame 1073, o qual é o objeto de estudo e análise deste trabalho.

Entretanto, é importante ressaltar que se tem uma grande semelhança com o aço carbono eutetóide, em função da proximidade do percentual de carbono, visto que o aço tem 0,73% de carbono, valor próximo ao esperado por um eutetóide, isto é, 0,77%. Buscando contemplar todas as possibilidades, e melhorar analisar as transformações térmicas do material em questão, leva-se em consideração a sua composição exata para todos os ensaios e simulações termodinâmicas.

Com a interpretação do diagrama de fases Fe-C, é esperada a transformação de fase quando ultrapassa o limite da fase austenítica, especificamente a linha A3. Para isso é necessário considerar as condições ideais de temperatura e pressão, além do resfriamento extremamente lento, como também desconsiderar a influência de elementos de liga.

Entretanto, em condições normais não é possível trabalhar com as informações desse diagrama, uma vez que o resfriamento extremamente lento, por exemplo, requer um controle de temperatura inviável para o cotidiano. Aplicando então para condições experimentais, assim como para processos industriais, seja em função dos custos, seja por carência de equipamentos. Desse modo, é essencial condicionar o meio e a taxa de resfriamento do aço, quando este sai de sua fase austenítica, uma vez que é sabido o poder de influência na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material.

Além da análise da taxa de resfriamento, pode-se analisar o material quanto a trabalhabilidade de variação da temperatura por meio de simulações termodinâmicas: Diagrama TTA e Diagrama TTT. Todos esses são levantados usando o software de simulação computacional JMatPro versão 7,0 para prever as

fases. Por fim, pode-se usar o software Thermo-Calc 2022a para obter o diagrama de fase específico para a nossa composição.

3.3.1 Diagrama TTA

Um estudo cinético das curvas de tempo, especificamente de Tempo-Temperatura- Austenitização, é utilizado quando se deseja descrever a cinética de transformação austenítica de um material específico, considerando a taxa de aquecimento constante. É possível construir esse diagrama de acordo com a composição especificamente desejada e, assim, obter a temperatura ideal para atingir as transições de fase quando referente às linhas A1 e A3. Sem mencionar na, também, linha de austenitização completa, essa última não tão conhecida, uma vez que é a única fase que não está presente no diagrama metaestável de Fe-C.

Considerando as taxas de aquecimento disponibilizadas pelo software, para que se possa adequar ao forno que será utilizado durante as práticas, é possível identificar qual curva melhor se adequa ao processo. As taxas de aquecimento são 1 °C/s, 10 °C/s, 100 °C/s e 1000 °C/s, e ao cruzar este parâmetro com o objetivo do tratamento térmico, é possível identificar quanto tempo será necessário a amostra ficar ao forno.

3.3.2 Diagrama TTT

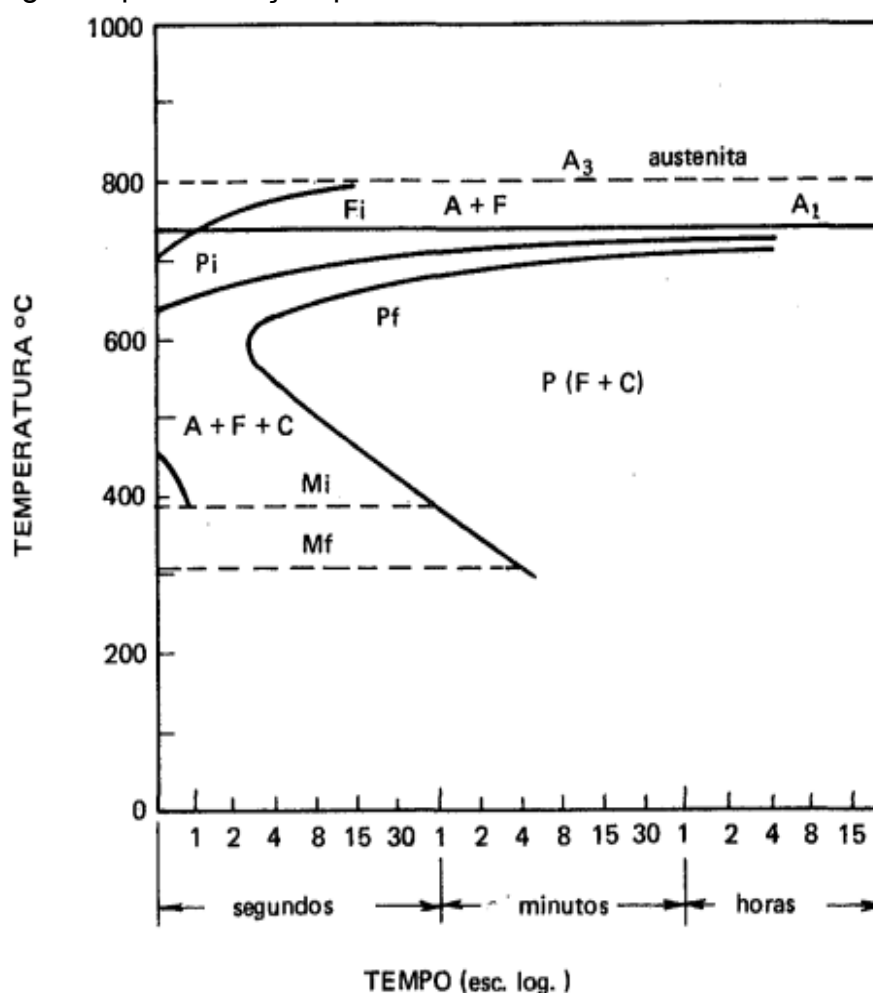
O diagrama de Tempo-Temperatura-Transformação é baseado em um estudo experimental, o qual busca submeter pequenas amostras a temperatura mais elevada, de modo a austenitizar a microestrutura e, somente, então, analisar cada amostra em diferentes condições de resfriamento. Uma vez que cada amostra quando resfriada em diferentes velocidades pode formar fases diferentes, em um resfriamento lento, por exemplo, um aço eutetóide forma a perlita, como também se submete a um resfriamento extremamente rápido, sendo possível encontrar a fase martensítica.

Portanto, pode-se estudar essas condições para diferentes aços, como também direcionar tratamentos isotérmicos. Por exemplo, na Figura 4 se tem o

diagrama para um aço hipoeutetóide, o qual está incluso no intervalo de 0,008 a 0,77% de carbono. Ao analisar o comportamento da curva, é notório, à medida que é feito o resfriamento de um material austenitizado para transição em F_i , a formação inicial de ferrita, seguido da curva P_i , onde há as primeiras perlitas.

Portanto, ao analisar os diagramas é possível obter parâmetros essenciais para a realização dos tratamentos térmicos, como o tempo, temperatura do forno e as condições de resfriamento. Com base nisso, são determinadas quais as fases esperadas. Os tratamentos térmicos, de um modo geral, possibilitam uma infinidade de benefícios aos aços, uma vez que as propriedades podem ser moldadas de acordo com o objetivo de uso do material.

Figura 4 – Diagrama para um aço hipoeutetóide



Fonte: Chiaverini (2012)

3.4 Recozimento

Como exemplo de tratamento térmico, o recozimento tem como objetivo principal remover tensões provocadas por tratamentos mecânicos que o aço tenha sido submetido anteriormente. No caso dos hipoeutetóides, a microestrutura esperada é a ferrita e a perlita (CHIAVERINI, 2012).

Especificamente, ao trabalhar com o tratamento térmico de recozimento subcrítico, esse ocorre a uma temperatura abaixo de A_1 , para o aço carbono seria temperatura inferior a $723\text{ }^{\circ}\text{C}$, e é usado para recuperar a ductilidade do aço trabalhado a frio. Visto que, quando o aço está encruado a dureza aumenta, mas a ductilidade diminui. Após o tempo e temperatura de recozimento sob a peça, a amostra deverá ser resfriada ao ar (SILVA e MEI, 2006).

Vale ressaltar que os aços perlíticos, os quais são conhecidos por sua estrutura lamelar, possuem alta resistência mecânica e essa característica tende a prejudicar o processo de usinagem. Diante disso, se reforça que, pela literatura, o recozimento subcrítico como um tratamento térmico é ideal para contribuir no aumento da ductilidade e na resistência à fadiga (AMOS, 2018).

Outra forma de trabalhar as propriedades dos materiais é através da conformação mecânica, seja a frio ou a quente. Ademais, os caminhos térmicos e mecânicos podem ser traçados em conjunto.

3.5 Laminação

Os aços perlíticos, os quais são objeto de estudo deste trabalho, apresentam uma combinação de alta resistência somada a boa ductilidade. Por isso, podem ser utilizados, por exemplo, na confecção de trilhos. A perlita é um conjunto de duas fases em um equilíbrio metaestável, na forma de lamelas. A forma como essas lamelas se apresenta vem a influenciar no quão resistente mecanicamente é o material. Diante disso, uma das formas de trabalhabilidade do material perlítico é o processo de laminação.

Os aços quando trabalhados mecanicamente tem como objetivo não somente alterar as formas e dimensões, mas também alterar a microestrutura. A laminação é um processo básico para a produção de produtos que precisam de uma pequena espessura. É considerada um processo de conformação mecânica dos

metais, mais utilizado em função da sua alta produtividade e da possibilidade de um preciso controle dimensional do produto (CETLIN; HELMAN, 2005).

Teoricamente o processo consiste em um arco de contato entre os rolos e o metal. Considera-se que o metal se deforma plasticamente e a velocidade dos rolos é assumida como constante. Nem sempre é possível obter o percentual de deformação em apenas um passe entre os rolos, e o processo se repete até ser atingida a espessura inicialmente planejada (MECHANICAL METALLURGY,1989).

Durante o processo de laminação, os cilindros em contato com a superfície provocam deformações plásticas no aço, conduzindo ao aumento da dureza, provocado pelo encruamento. Quanto ao procedimento experimental, é medida inicialmente a amostra, definida a espessura final que se quer obter e então se tem o percentual de deformação. Além disso, é possível estimar quantos passes serão necessários para obter tal redução na espessura.

Alguns problemas podem estar presentes durante o processo de laminação, por exemplo, os rolos tendem a sofrer flexão ao longo do seu comprimento e conseqüentemente se tem variação na espessura. Ao decorrer do processo experimental aqui desenvolvido foi notório a pequena variação na espessura das amostras. É importante ressaltar que a laminação pode acontecer de duas formas, por uma óptica metalúrgica, classificada em: laminação a frio e laminação a quente.

A laminação a frio é um processo de laminação o qual a peça é trabalhada em uma temperatura abaixo daquela de recristalização. De modo geral, as peças passam a ter maior qualidade de acabamento. Quando se deseja obter grandes deformações com a laminação a frio, é recomendável ciclos de deformação e tratamento térmico envolvendo a recristalização do material endurecido, amaciando-o (CETLIN; HELMAN, 2005).

Enquanto que a laminação a quente ocorre em temperatura acima daquela de recristalização da amostra que está sendo trabalhada. Conseqüentemente, as amostras não tem um bom acabamento superficial.

A laminação a frio de metais alcançou uma posição de grande importância na indústria, produzindo chapas, tiras e laminados com bom acabamento superficial e maior resistência mecânica. Ao mesmo tempo, mantém um bom controle das dimensões do produto (MECHANICAL METALLURGY,1989).

3.6 Propriedades mecânicas

Nos processos industriais, depois de aplicados aos materiais uma série de tratamentos térmicos e remanejamento da sua estrutura por meio da conformação mecânica, são realizados testes e ensaios para avaliação e controle das propriedades do aço, podendo ser ensaios destrutivos ou não-destrutivos. Os ensaios destrutivos são utilizados para medir as propriedades mecânicas em determinada posição de peça ou produto, enquanto os não-destrutivos buscam localizar e dimensionar descontinuidades (SILVA; MEI, 2006). O papel do engenheiro está em determinar as tensões e distribuição das tensões dos membros que estão sujeitos a carga, isso pode ser medido por análises teóricas e ensaios (CALLISTER, 2020).

3.7 Ensaio de dureza

Os materiais metálicos apresentam deformação de aproximadamente 0,005, mas quando estes deformam mais do que isso se tem uma deformação permanente ou deformação plástica. Pode-se dimensionar essa deformação a partir dos ensaios de dureza, a qual é realizada uma medida da profundidade ou do tamanho da impressão, quão mais profundo for a impressão mais macio será o material (CALLISTER, 2020).

Os ensaios Rockwell possuem diferentes escalas que são usadas para diferentes penetradores e cargas, aplicando de acordo com o material a ser analisado. Os aços são materiais que podem ser alteradas a sua microestrutura com tratamento térmico, e assim, atingir as propriedades desejáveis para um determinado uso. Assim, tem-se como exemplo o aço perlítico, o qual se pode obter tanto com lamelas grossas quanto lamelas finas, à medida que se varia a temperatura de recozimento, por exemplo.

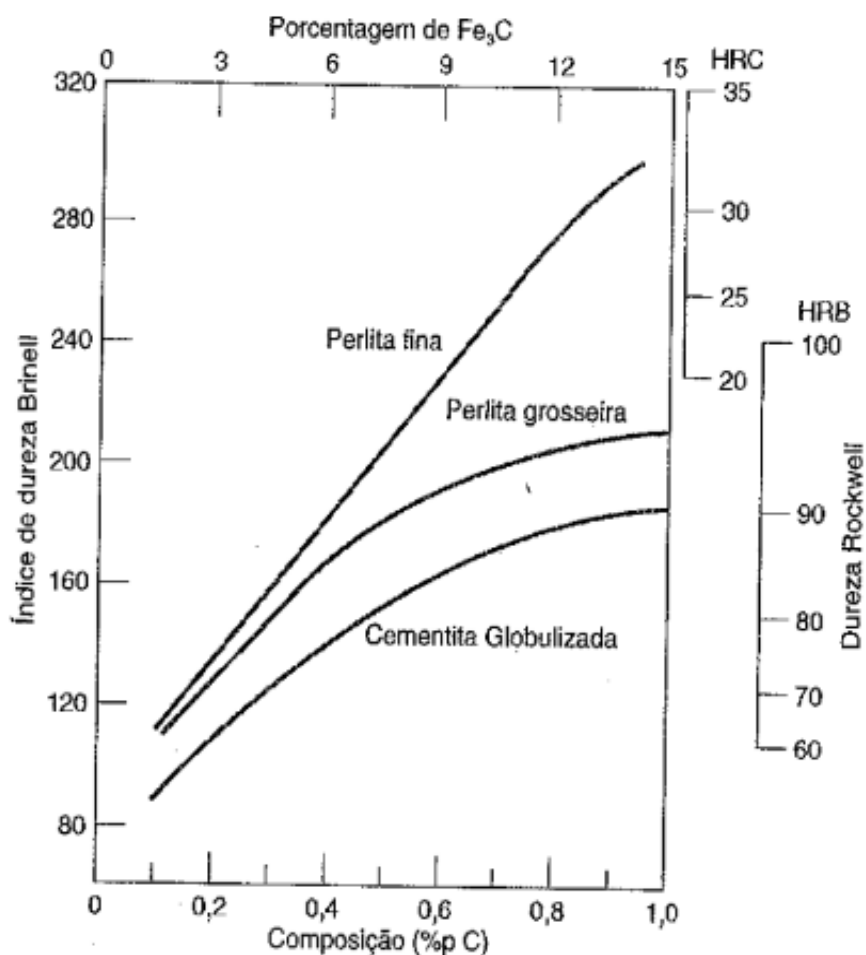
3.8 Influência das lamelas na dureza do aço perlítico

Quando se trabalha com aço perlítico deve-se levar em consideração o espaçamento interlamelar, uma vez que essa característica da microestrutura

influencia nas propriedades mecânicas dos materiais durante a deformação a frio. O menor espaçamento interlamelar é uma perlita fina, possuindo menor área de ferrita e maior área de cementita. Uma vez que a porção de Fe_3C é muito mais dura, conseqüentemente o material é mais resistente, mesmo que com isso comprometa a fragilidade deste (CALLISTER, 2020).

Assim, pode-se esperar que a perlita grossa, com maior área sendo composta por ferrita, obtenha menores valores de dureza. Sendo representado pelo gráfico plotado quanto a dureza em função da concentração de carbono (ver Figura 5).

Figura 5 – Dureza em função da concentração de carbono



Fonte: Callister (2020)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O material de estudo deste trabalho é uma amostra de arame não torcido com as duas faces paralelas e seção transversal retangular, de ferro carbono hipoeutetóide, que possui dimensões de 458,65 mm de comprimento, 14,04 mm de largura e 6,14 mm de espessura, cedido pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM).

A análise de composição química foi obtida através da técnica de espectroscopia de emissão óptica. A análise química utilizando essa técnica foi realizada no Espectrômetro de Emissão Óptica da marca Shimadzu, modelo PDA 7000, pertencente ao LACAM.

A Tabela 1 mostra a composição química da amostra, a qual enquadra o material como um aço hipoeutetóide, uma vez que o percentual de carbono é inferior a 0,77%. Diante disso, foi utilizada a literatura baseada no grupo de materiais de aço carbono hipoeutetóide para direcionar os estudos de tratamento térmico e laminação a frio, para somente então analisar os resultados.

Tabela 1 – Composição química, em % de massa, da amostra como recebida.

Elementos	Porcentagem
C	0,735
Si	0,170
Mn	0,630
P	0,006
S	0,004
Ni	0,014
Cr	0,021
Mo	0,010
Fe	98,410

Fonte: A autora (2022)

4.2 Métodos

4.2.1 Simulação termodinâmica

Após a identificação da composição química do material, foi utilizado o software JMatPro, para que fossem plotados os gráficos, os quais permitiram estimar a temperatura e o tempo que cada amostra deve ser submetida, e assim obter as fases. Portanto, ao alimentar o banco de dados com a composição química do material, são obtidos os diagramas TTT e TTA. Ademais, também foi necessário o uso do software Thermo-Calc 2022a, este apresentou a temperatura de transformação de fase de austenitização, além do valor em percentuais que cada fase deve se apresentar à medida que se varia a temperatura.

4.2.2 Preparação dos corpos de prova

O material recebido pelo Laboratório de Caracterização de Materiais era um arame com as dimensões 6,00mm de espessura, 14,04 mm de largura e 458,65 mm de comprimento. Inicialmente retirou-se uma amostra para utilizá-la como referência e esta foi identificada como: CR, “Como Recebido”. Em seguida foram retiradas amostras para a rota, a qual foi trabalhada apenas o tratamento térmico, sem passar pelo processo de laminação a frio. Estas 3 amostras apresentam dimensões aproximadamente de 10,5 mm de comprimento, 6,00 mm de espessura e 14,04 mm de largura. Cada amostra foi identificada para qual tempo passaria durante o recozimento subcrítico.

Em seguida, realizou-se um segundo corte no arame restante, o qual foram retirados 6,77 mm de comprimento para que fosse realizada a etapa de laminação, seguido do corte de 3 amostras, as quais passaram pelo tratamento térmico de solubilização, seguido de recozimento subcrítico, como na rota descrita anteriormente.

Nesta etapa de laminação, o objetivo inicial era reduzir a espessura do material em 45%, como justificado anteriormente pela diminuição da dureza em função do aumento da área de ferrita nos resultados obtidos por Toledo Junior et al. (2017). Porém, ao passar pelos rolos de laminação, a espessura final obtida foi de aproximadamente 3,00 mm, o que resulta em uma laminação a frio de 50%. O valor de laminação é obtido a partir da fórmula de deformação de engenharia (Equação 1).

$$e = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (1)$$

em que e é a deformação, L_f a leitura final e L_i a leitura inicial. Assim, aplicando os valores, obtém-se:

$$e = \frac{3-6}{6} = 50\%$$

Após o processo de laminação, as amostras cortadas tinham em média as dimensões: 10 mm de comprimento, 3,00 mm de espessura e 16,20 mm de largura.

Quanto à etapa de corte das amostras, vale ressaltar que o corte para a primeira rota, apenas tratamento térmico, foi realizado na máquina cortadora metalográfica de bancada CM40, uma vez que foi realizada uma sequência de pequenos cortes, e por logística foi a melhor opção. Ao trabalhar a segunda rota, a qual se fez necessário um corte inicial maior, este foi realizado com o auxílio da morsa e lâmina de serra fita, também se utilizou a lâmina para os cortes menores.

Depois de cortadas e os processos iniciais feitos, quando necessário, no caso dos laminados, identificaram-se as amostras de acordo com a Tabela 2. Vale ressaltar que além destas ainda foram analisados os resultados da amostra CR.

Tabela 2 – Identificação das amostras durante as etapas experimentais

Tempo (s)	Sem Lam	Lam 50%
10	Solubilização a 740 °C por 2 minutos e Recozimento a 700 °C por 10 seg	Solubilização a 740 °C por 2 minutos e Recozimento a 700 °C por 10 seg
100	Solubilização a 740 °C por 2 minutos e Recozimento a 700 °C por 100 seg	Solubilização a 740 °C por 2 minutos e Recozimento a 700 °C por 100 seg
1000	Solubilização a 740 °C por 2 minutos e Recozimento a 700 °C por 1000 seg	Solubilização a 740 °C por 2 minutos e Recozimento a 700 °C por 1000 seg

Fonte: A autora (2022)

4.2.3 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados após a análise dos resultados plotados por simulações termodinâmicas e o corte das amostras com suas

respectivas identificações. Foram utilizados os fornos do tipo mufla pertencentes ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará.

Tanto na rota que foi trabalhada apenas tratamento térmico, como na amostra que foi somado laminação a frio seguido de tratamento térmico, foi realizado o mesmo procedimento nos fornos. Isto é, o primeiro forno foi aquecido até atingir a temperatura de 740 °C, a amostra é então colocada por 2 minutos. Em seguida, é imediatamente alocada em um segundo forno, o qual já estava previamente aquecido a 700 °C. Cada amostra quando está neste segundo forno permaneceu o tempo específico, seja de 10 segundos, 100 segundos e 1000 segundos.

É importante ressaltar que as amostras seguiram cada etapa de acordo com a identificação feita no momento do corte, e assim se tem a diferentes tempos de recozimentos os quais possibilitou analisar as mudanças na microestrutura e na dureza do aço perlítico. Como também se identificou a necessidade de colocar uma amostra por vez, para que ao abrir o segundo forno a diminuição da temperatura não comprometa o recozimento de amostras que ficariam mais tempo.

4.2.4 Preparação metalográfica

A amostra CR, após o corte, foi embutida em baquelite, em seguida foi lixada com lixas d'água de diferentes granulometrias, seguindo a seguinte ordem: 80, 220, 320, 400, 600, 1200 mesh, e a cada modificação de lixa era alternado em 90 graus a posição da amostra. Posteriormente, foram utilizados panos de lã para realizar o polimento, com uso de pasta de diamante, seguindo a sequência: 3 µm e 1 µm de granulometria. Ao fim de cada etapa, a amostra era secada com uso de álcool e secador para evitar oxidação, comprometendo a qualidade dos resultados.

Por fim, utilizou-se uma solução de Nital, para a etapa de ataque químico à superfície da amostra. O reagente é composto de ácido nítrico diluído em álcool, em uma proporção de 5%. O tempo de imersão de cada amostra no ácido, com a ajuda de uma placa de Petri, era de aproximadamente 5 segundos, para que fosse possível revelar a microestrutura da amostra sem comprometer a superfície recém preparada.

4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Após o ataque químico nas amostras, utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura com Emissão de Campo, modelo FEI Quanta 450, pertencente à Central Analítica da UFC para obtenção das imagens, as quais permitiram uma análise visual das mudanças na microestrutura. Padronizou-se o aumento de 2072 até 41440 vezes, para que fosse possível analisar melhor cada uma das amostras de forma comparativa.

Vale ressaltar que para analisar as imagens de cada amostra fez-se necessário o uso do software ImageJ para tratamento qualitativo das mesmas, retornando percentual de área de cada fase à medida que eram alteradas as condições de tratamento. Com esses dados foi possível alinhar aos resultados de dureza, uma vez que o aumento percentual da área de determinada fase determina a variação da propriedade mecânica do material.

4.2.6 Dureza

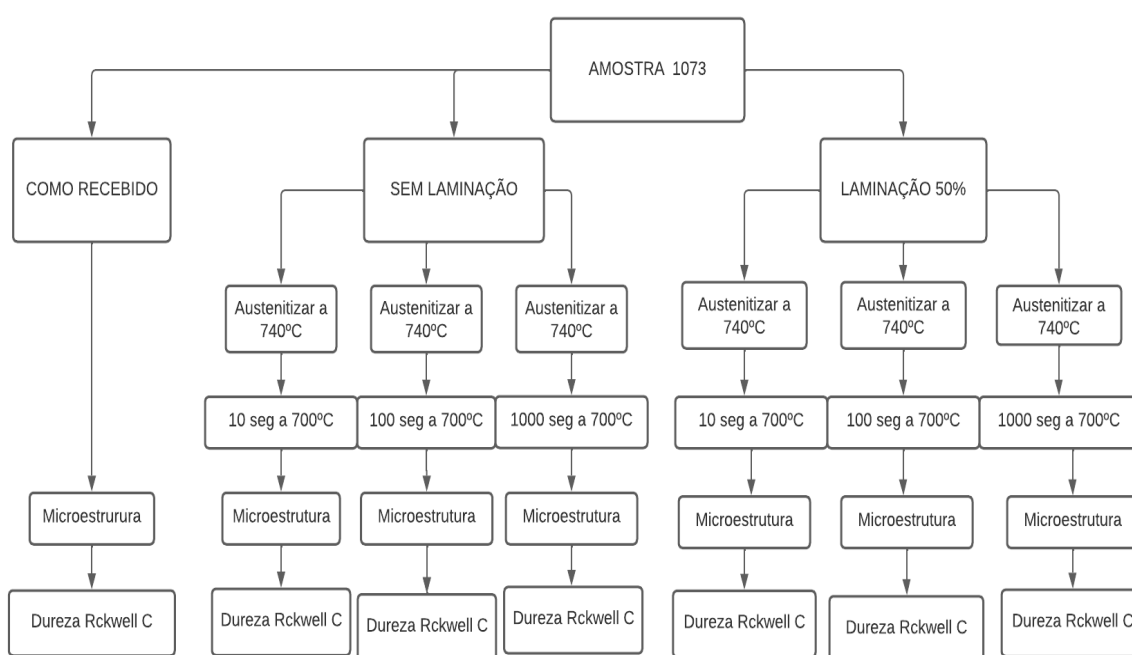
Para análise das propriedades mecânicas foi utilizado como parâmetro a dureza Rockwell C (HRc). Foram realizadas 7 medidas na face do arame de cada uma das amostras de cada grupo, Como Recebido, Sem Laminação, Com Laminação.

Durante o ensaio foi utilizada a carga de 150KgF com o uso de um indentador de diamante. Inicialmente foi aplicada a “pré carga”, para garantir o contato do indentador com a amostra, e somente depois se aplicou a carga oficial por 10 segundos. O valor pode ser lido em um mostrador acoplado à máquina. Vale ressaltar que este método de medição possui escala de A a K. Para os estudos aqui apresentados, se utilizou a escala C, por ser este o mais utilizado para metal mecânico, indo de 20 a 70 HRc. Depois das leituras das 7 medidas realizadas foram descartados o maior e o menor valor e foi realizada uma média aritmética com os 4 valores restantes para obter a dureza de cada amostra.

4.3 Organograma

O organograma da Figura 6 mostra todas as amostras utilizadas, quais rotas foram traçadas e quais os resultados foram analisados para que fosse possível atingir os objetivos deste trabalho.

Figura 6 – Organograma



Fonte: A autora (2022)

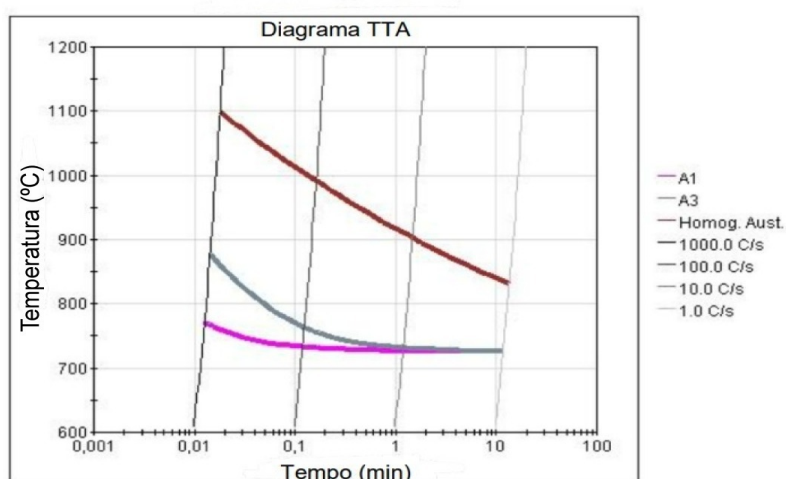
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulação termodinâmica

As simulações termodinâmicas foram realizadas com intuito de estimar quais temperaturas as amostras seriam submetidas e por quanto tempo, para que se pudesse analisar alterações na microestrutura, como também em suas propriedades mecânicas. Para isso foi utilizado o programa JmatPro, no qual ocorreu a alimentação com a composição química obtida pelo espectrômetro, aqui supracitada, obtendo os diagramas TTT e TTA.

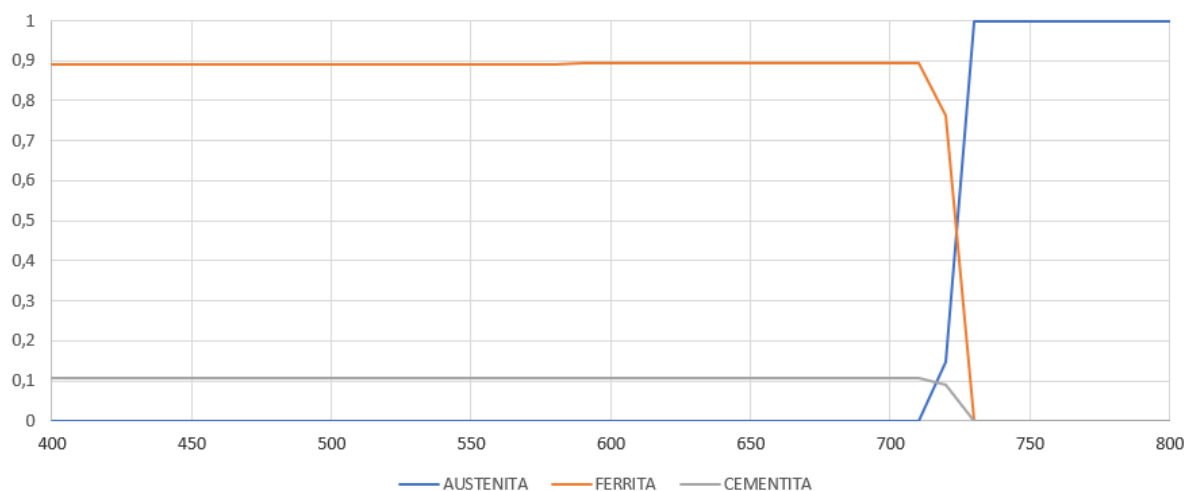
A partir do diagrama TTA é notório que a 740 °C já é possível austenitizar a amostra, uma vez que tem cruzado a linha A3, com tempo médio de um a dois minutos no forno, considerando a taxa de aquecimento de 10°C por segundo. Essa leitura do diagrama TTA reafirma o que se obteve com o uso do ThermoCalc, o qual é alimentado também com a composição química, e retornou a temperatura aproximada de 740 °C para a transformação da ferrita em 100% de austenita. As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados para o TAA.

Figura 7 – Diagrama TAA das amostras



Fonte: A autora (2022)

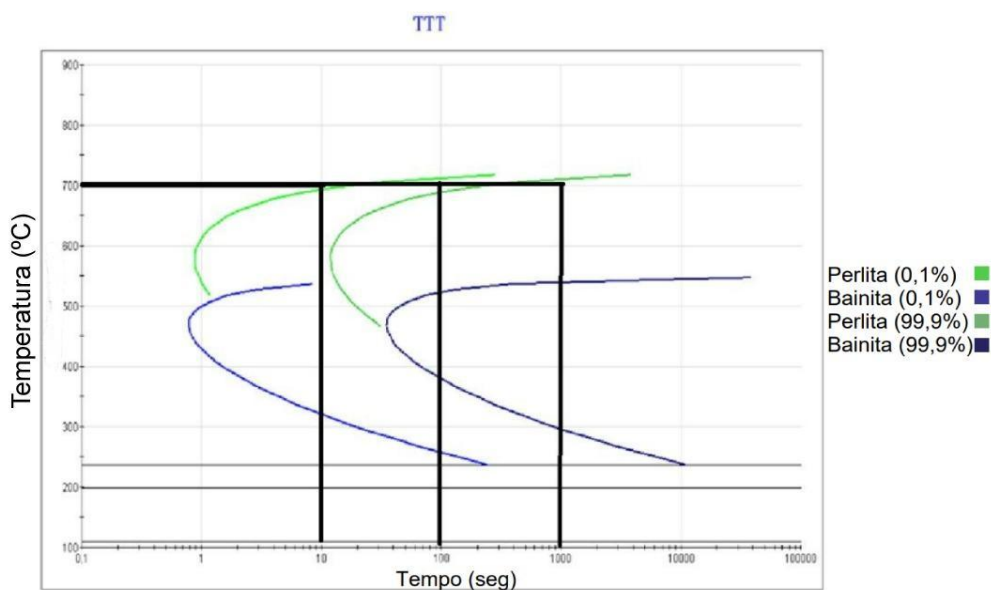
Figura 8 – Thermocalc do material como recebido



Fonte: A autora (2022)

Assim, o TTA apresentou o tempo, temperatura e velocidade do forno, enquanto o ThermoCalc reafirmou os resultados. Após a análise para a austenitização das amostras, é importante apresentar o Diagrama TTT (ver Figura 9), o qual apresenta as curvas de transformação de fase, quando o material passa determinado tempo em tal temperatura. Assim, pode-se identificar a formação de perlita, nos três tempos estabelecidos para modo comparativo das amostras, 10, 100 e 1000 segundos. Vale ressaltar que as amostras foram consideradas resfriadas ao ar.

Figura 9 – Diagrama TTT das amostras



Fonte: A autora (2022)

5.2 Micrografias

5.2.1 Amostra Como Recebida

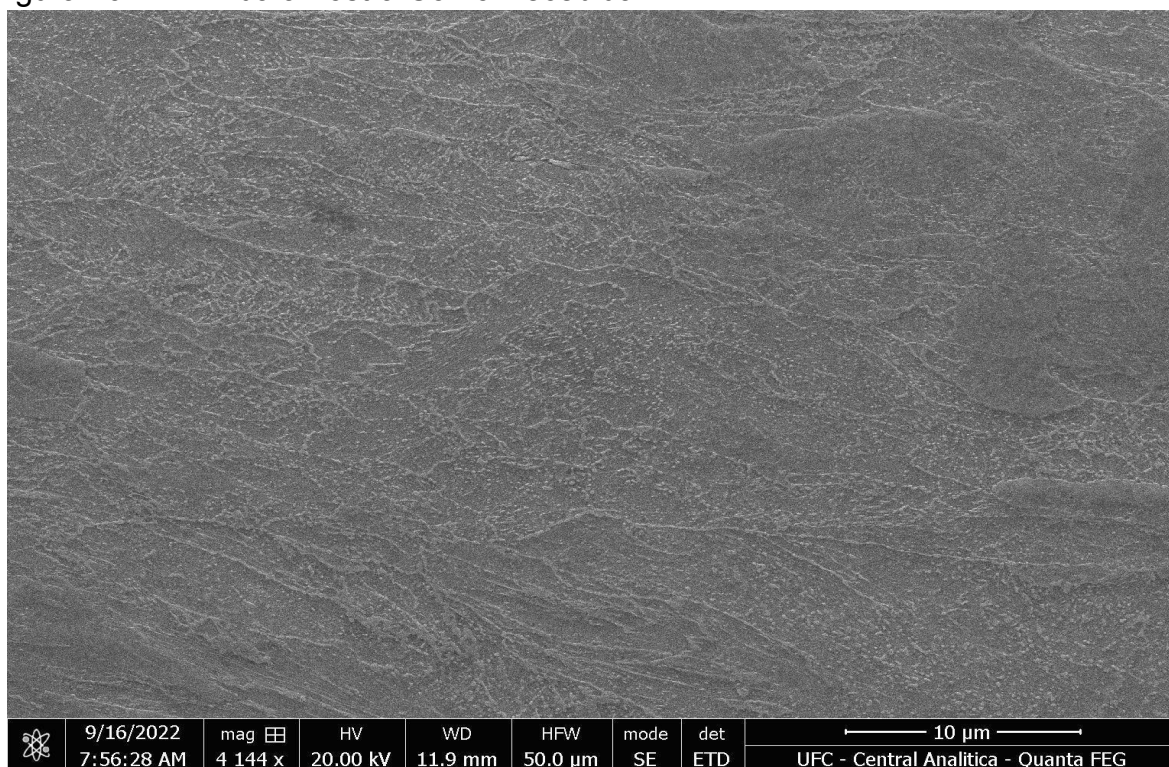
A amostra Como Recebida trata-se de um material que foi entregue como um arame não torcido, com as duas faces paralelas, de aço 1073, no qual a micrografia apresenta a perlita esferoidizada. É notório a predominância de cementita quando comparada à área de ferrita, para compor a perlita.

É válido ressaltar que para estas amostras não se obteve o histórico de conformações que o material passou, conseqüentemente os resultados que aqui foram analisados devem levar em consideração que o mesmo já vem com histórico de possível encruamento.

Além da análise visual, objetivando melhor analisar as amostras, não apenas com critérios qualitativos, mas também quantitativos, foi calculada a área de cada fase em todas as situações as quais foi variada a condição térmica, como também quando adicionada a etapa de laminação. Assim, o percentual de ferrita da amostra Como Recebida, após o processamento da imagem no software ImageJ, foi de 39%.

Como foram traçadas duas rotas para analisar o arame hipoeutetóide, com e sem a etapa de laminação, é possível analisar a influência da conformação na microestrutura somada ao tratamento térmico de recozimento subcrítico, além da influência do tempo de recozimento quando a amostra não tem sua espessura reduzida (ver Figura 10).

Figura 10 – MEV da amostra Como Recebida



Fonte: A autora (2022)

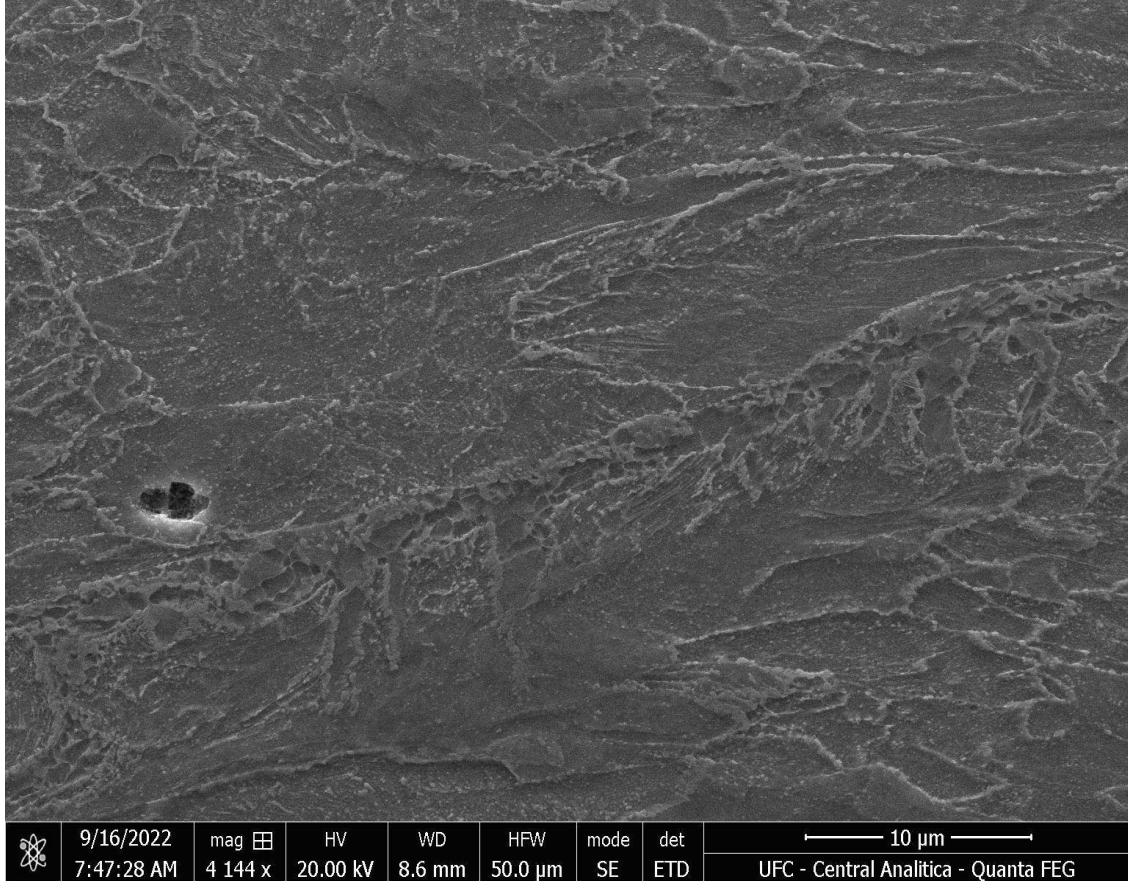
5.2.2 Termicamente tratadas e sem laminação a frio

Inicialmente, objetivou-se analisar como as amostras se comportam apenas com as consequências do tempo ao forno, variando o tempo de recozimento subcrítico, a 700°C. Assim, os resultados foram apresentados nos subitens seguintes.

5.2.2.1 Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos

Nesta micrografia observa-se que a microestrutura do material se manteve semelhante, quanto ao fato de a cementita ainda apresentar o aspecto esferoidizado, quando comparada a amostra Como Recebida. Porém, aumentou-se visualmente a área de ferrita, e em valores percentuais, foi obtido 48% da área (ver Figura 11).

Figura 11 – Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos

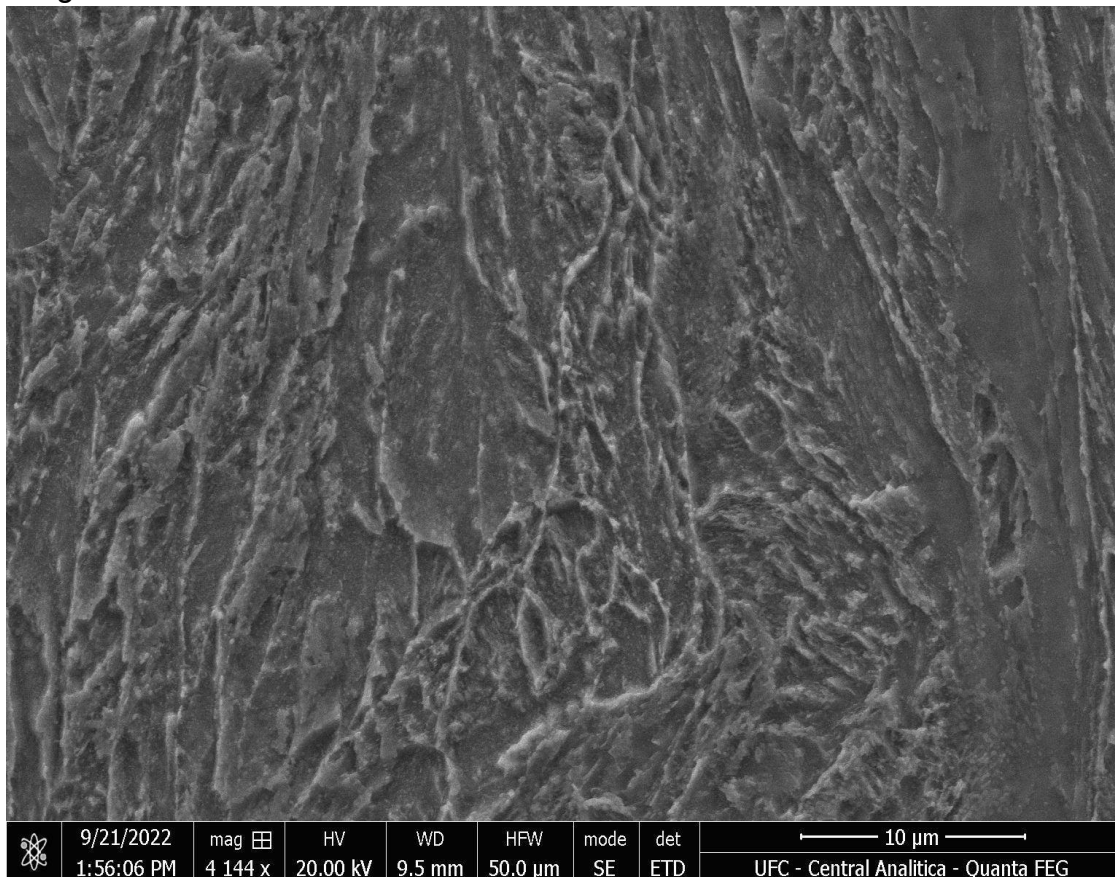


Fonte: A autora (2022)

5.2.2.2 Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos

Com o aumento de tempo no segundo forno as esferas da cementita apresentaram o coalescimento entre elas, retirando o aspecto outrora destacado por esferas. Além de aumentar, mesmo que minimamente, a área de ferrita, a qual em percentuais chegou a 49% (ver Figura 12).

Figura 12 – Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos

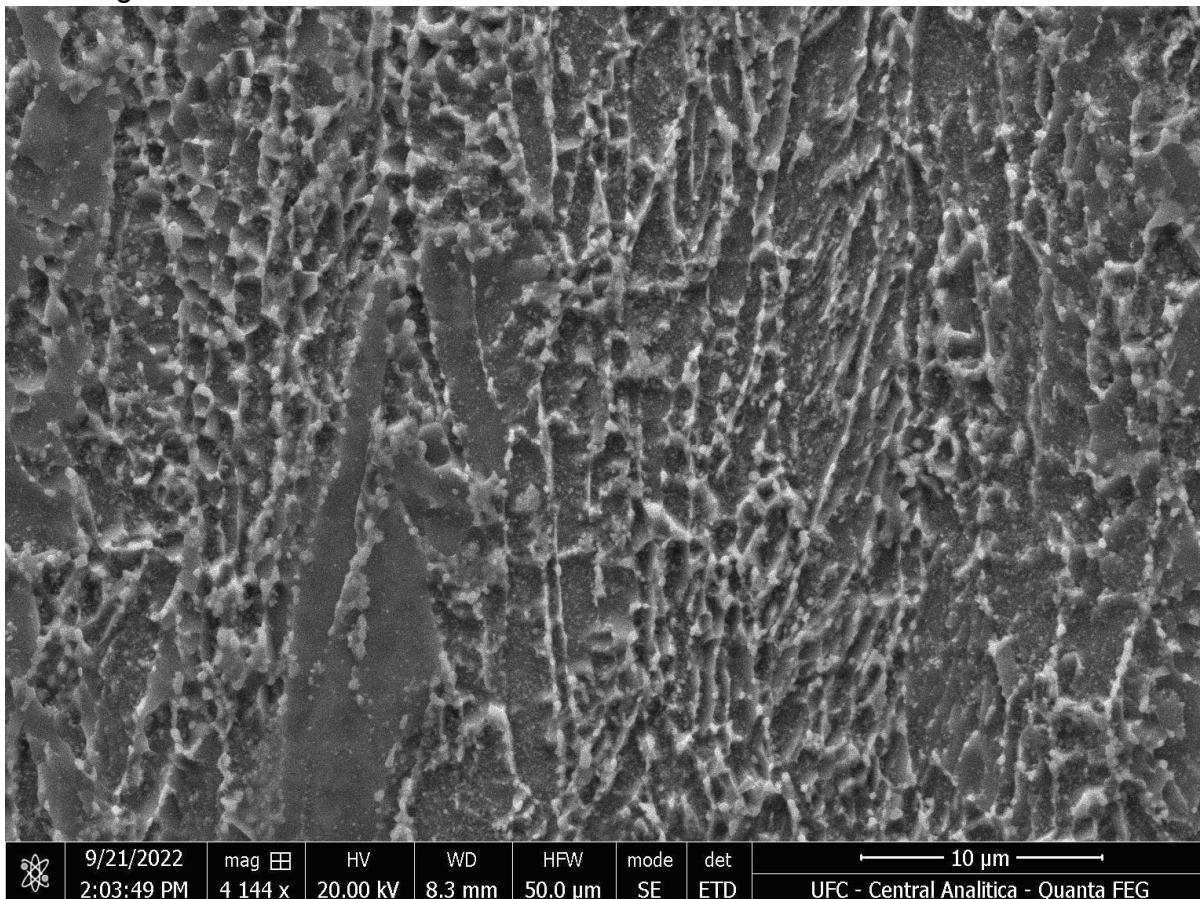


Fonte: A autora (2022)

5.2.2.3 Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos

Finalizando as micrografias das amostras que foram submetidas apenas ao tratamento térmico, tem-se que com mais tempo de recozimento subcrítico, as esferas predominantemente coalesceram e com isso a área de ferrita atingiu 53% da área total em análise (ver Figura 13).

Figura 13 – Solubilização a 740 °C seguido de Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos



Fonte: A autora (2022)

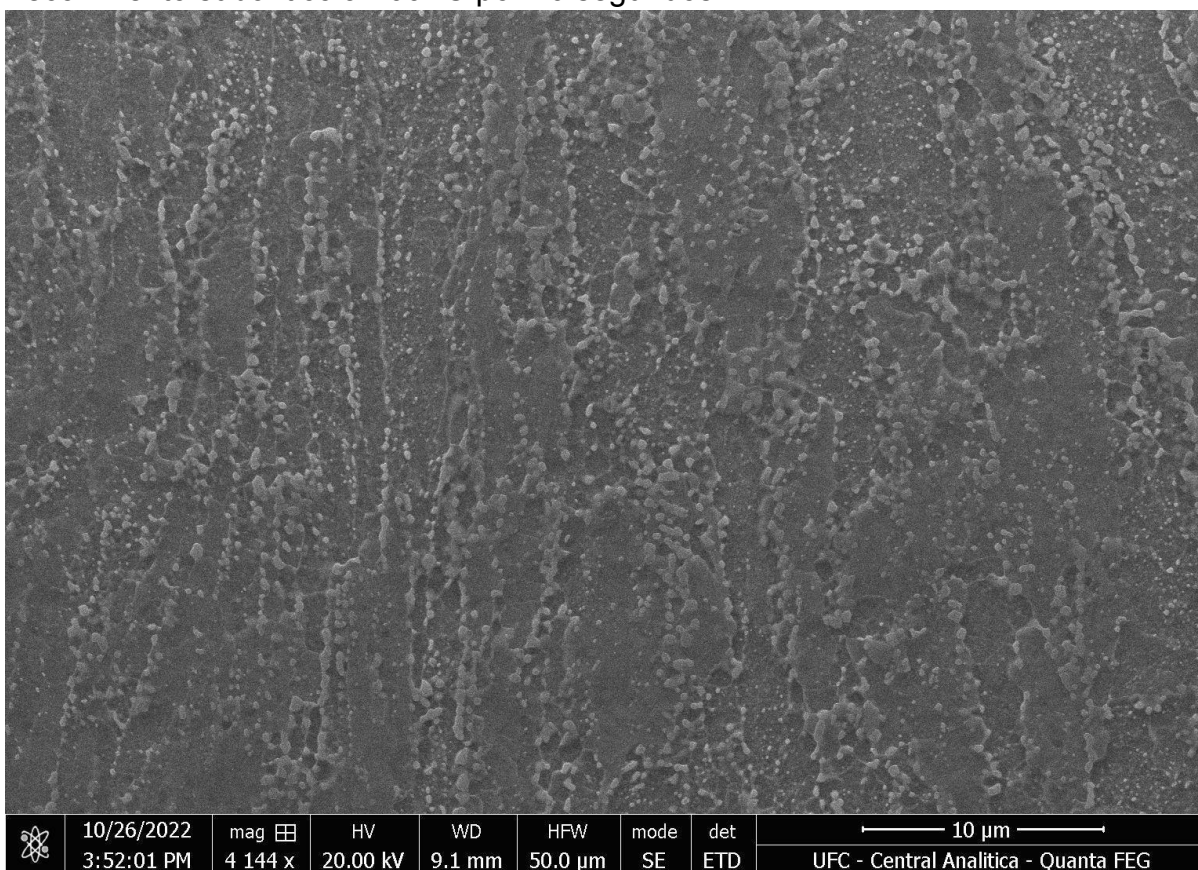
5.2.3 Termicamente tratadas após 50% de Laminação a frio

O segundo grupo de amostra encontrou-se submetido tanto por influência de maior encruamento, proporcionado pela etapa de laminação, como também pela transformação de fases obtida a partir dos tratamentos térmicos de solubilização e recozimento subcrítico.

5.2.3.1 Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos

Nessa primeira micrografia, a cementita apresenta-se esferoidizada mesmo após o tratamento térmico. Porém, pode-se observar uma direção preferencial, o qual resulta da direção de laminação. Além disso, é visto uma área maior de ferrita, quando comparada a amostra como recebida, quantitativamente se tem 56% da área total (ver Figura 14).

Figura 14 – Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 10 segundos



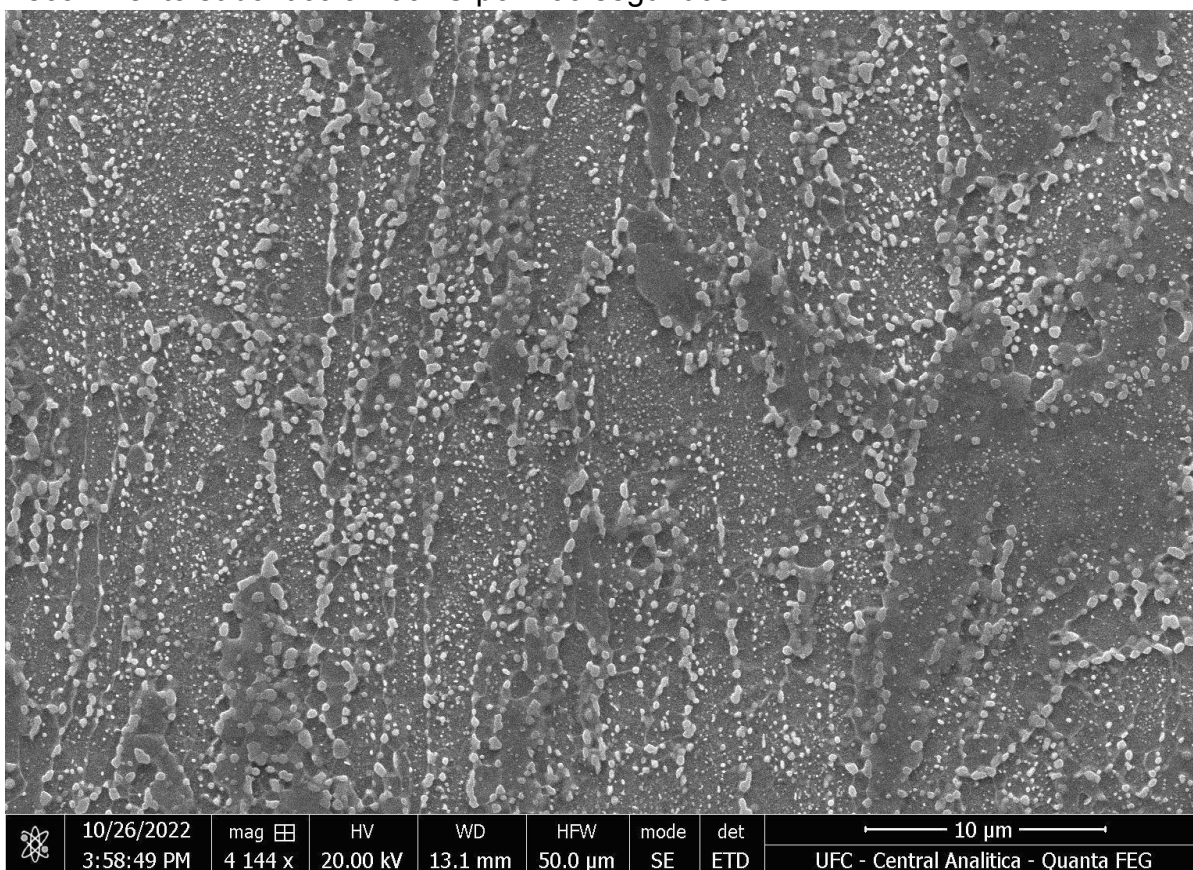
Fonte: A autora (2022)

5.2.3.2 *Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos*

Mesmo com o aumento do tempo de recozimento, não se obteve o coalescimento esperado das esferas na cementita, comportamento este que se acredita ser resultado do maior grau de encruamento do material, proporcionado pela laminação a frio. Isso ocorre uma vez que o mesmo apresenta um histórico de conformações mecânicas não documentado.

Quanto maior o grau de encruamento da amostra maior seria o tempo de solubilização que a amostra precisaria ser submetida para que fosse possível avaliar a contribuição de um tratamento térmico após a conformação mecânica. É válido ressaltar que a área de ferrita teve um aumento percentual não significativo, mas atingiu 57% da área total (ver Figura 15).

Figura 15 – Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 100 segundos

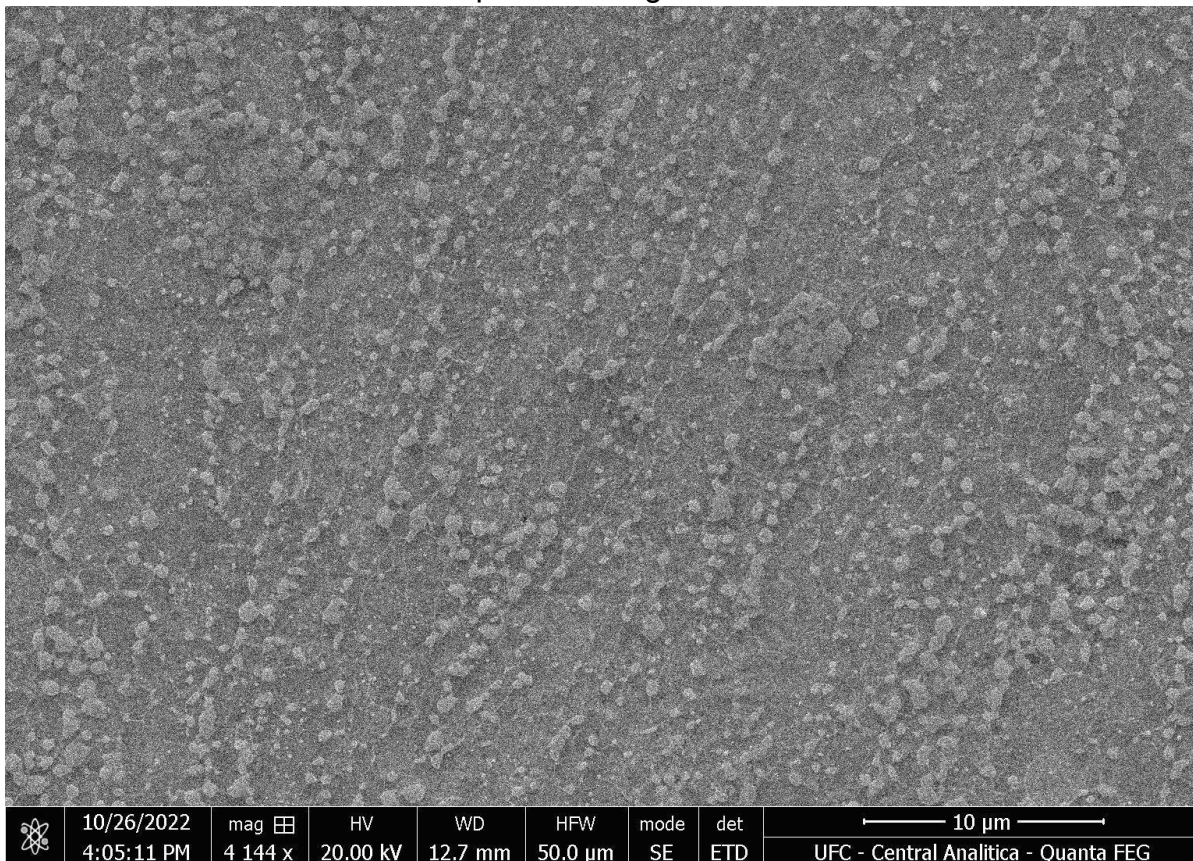


Fonte: A autora (2022)

5.2.3.3 *Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos*

Por fim, na última amostra com o máximo de tempo pré determinado para o segundo forno também não foi obtida a alteração das esferas na cementita, mesmo aumentando para 58% na área de ferrita da amostra (ver Figura 16).

Figura 16 – Laminação a Frio de 50% seguido de Solubilização a 740 °C e Recozimento subcrítico a 700 °C por 1000 segundos



A autora (2022)

5.3 Dureza

O parâmetro de dureza foi utilizado para avaliar a influência dos tratamentos térmicos de solubilização e recozimento subcrítico realizados em diferentes tempos, além da adição da etapa de laminação a frio com redução de 50% no aço perlítico esferoidizado. Sabe-se que o espaçamento interlamelar influenciará de forma direta no resultado de dureza do aço, uma vez que representa uma maior ou menor área de ferrita em relação à área de cementita. Essas duas fases que compõem a perlita diferem-se pelo fato de a ferrita ser menos dura que a Fe₃C. Assim, é possível analisar os resultados obtidos pelo durômetro Rockwell e avaliar a relação com a área de perlita identificada nas microestruturas já discutidas. Na Tabela 3 tem-se todos os resultados obtidos, e se pode observar primeiramente que a dureza do material ainda como recebido já apresenta uma elevada resistência,

fato este que se acredita ser resultante de processos anteriores que não foram documentados.

Quando a amostra é apenas laminada a dureza tende a aumentar em função do maior encruamento. Nas amostras, o aumento foi de 45,25 HRC para 47,5 HRC. É notório que mesmo sendo um valor de dureza alto, a variação entre eles não é significativa, sendo isso uma consequência do quão encruado o material já se encontrava (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados de dureza

DUREZA HRC	SEM TT	10 SEG	100 SEG	1000 SEG
COMO RECEBIDA	45,25 HRC			
COM LAMINAÇÃO	47,5 HRC	36,7 HRC	33,1 HRC	28,5 HRC
SEM LAMINAÇÃO		45,8 HRC	45,9 HRC	38 HRC

Fonte: A autora (2022)

Ao avaliar a dureza, tanto do material laminado quando não laminado, à medida que estes aumentam o tempo de recozimento subcrítico, é notório que ambos tendem a diminuir o valor de dureza quando comparados o tempo de 10 segundo no forno com o tempo de 1000 segundos para recozimento, sendo isso uma consequência direta do aumento da área de Ferrita. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.

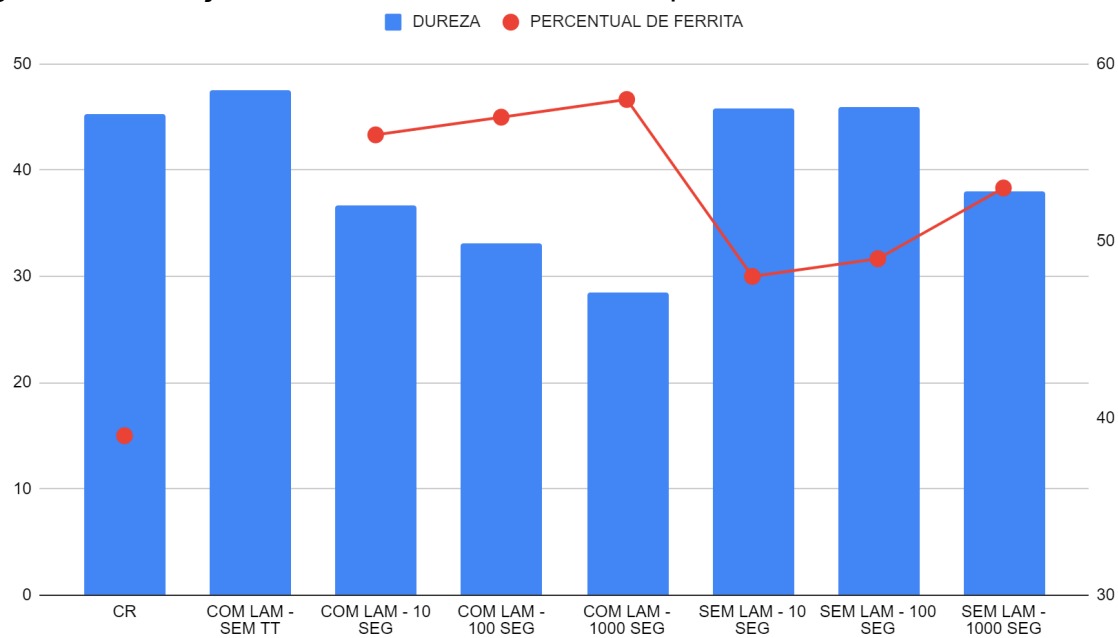
Tabela 4 – Aumento da área de ferrita

FERRITA %	SEM TT	10 SEG	100 SEG	1000 SEG
COMO RECEBIDA	39%			
COM LAMINAÇÃO		56%	57%	58%
SEM LAMINAÇÃO		48%	49%	53%

Fonte: A autora (2022)

Com os percentuais de ferrita também pode-se compreender a diferença de dureza entre os dois grupos, com laminação e sem laminação. No caso das amostras com laminação, mesmo que se apresentem mais encruadas, ainda tem menor dureza visto o maior percentual de ferrita. Por fim, tem-se uma representação gráfica de todas as variáveis aqui analisadas e suas relações entre si (ver Figura 17).

Figura 17 – Relações entre as variáveis dureza e percentual de ferrita



Fonte: A autora (2022)

6 CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi possível analisar o comportamento da microestrutura perlítica esferoidizada quando submetida apenas ao tratamento térmico de solubilização a 740 °C por 2 minutos seguido de recozimento subcrítico a 700 °C tanto com 10, 100 e 1000 segundos. Desse modo, foi observado a diminuição do aspecto esferoidizado, uma vez que as esferas coalesceram, caracterizando a perlita grossa, assim como foi apresentado qualitativamente o aumento da área de ferrita, sendo também um dos fatores que contribuíram para diminuição da dureza HRC das amostras.

Ademais, conclui-se por meio da segunda rota, a qual foi adicionada a etapa de laminação a frio com redução de 50% na espessura da peça, que o encruamento provocado na peça contribuiu para o aumento imediato da dureza. Porém, quando submetido aos tratamentos térmicos de solubilização a 740 °C por dois minutos e recozimento subcrítico a 700 °C nos tempos de 10 e 100 segundos, a redução na dureza foi significativa quando comparada à primeira rota, uma vez que foi notório o aumento da área de ferrita, mesmo sem o coalescimento das esferas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é indicado analisar a variação dos tempos de solubilização quando trabalhado com a etapa de laminação, visando encontrar o tratamento térmico ideal para modificar o perfil esferoidizado das amostras, quando a peça é submetida a esse processo de redução de espessura. Assim como também é importante estudar a possibilidade de alterar a ordem dos procedimentos, implementando a etapa de laminação após o tratamento térmico para observar como a dureza irá se comportar.

REFERÊNCIAS

- ABREU, H. F. G. **Avaliação da microestrutura e da micro e macrotextura dos aços presentes nas armaduras de tração e pressão de dutos flexíveis (risers) utilizados na produção de petróleo e injeção de gás**. Relatório Técnico Parcial 2, 2022.
- AMOS, P. G. K.; BHATTACHARYA, A.; NESTLER, B.; ANKIT, K. Mechanisms of pearlite spheroidization: insights from 3d phase-field simulations. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 161, p. 400-411, dez. 2018.
- BRITO, C. M. G. **Influência dos tratamentos térmicos de recozimento pleno e normalização na microestrutura e propriedades mecânicas de aços com baixo e alto teor de carbono**. 2017. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2020.
- CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 2012.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2ª Edição. ed. Belo Horizonte: Artliber, 2005.
- HIGGINS, R. A. **Applied Physical Metallurgy**. 6 ed. Londres, Inglaterra: Arnold ñ Hodder Headline Group, 1993.
- TOLEDO JÚNIOR, F. G.; RODRIGUES, H. C.; FERREIRA, K. G; FERNANDES, M. A. G.; ALVARENGA, V. P. Melhoria da Laminabilidade a frio do aço SAE 1070 Produzido na Aperam South America. In: 54º Seminário de Laminação e Conformação, 2017, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: AMB WEEK, 2017
- LIMA, P. H. P. **Evolução da textura cristalográfica de aços perlíticos submetidos a deformações e tratamentos térmicos distintos**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2022.
- MELO, I. M. **Análise da influência de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades e no espaçamento entre as lamelas da perlita no aço SAE 1075**. 2022. 38 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- OLIVEIRA, A. V. M.; FRAGA, F. E. N.; ALMADA, L. F. A. Determinação na taxa de resfriamento de diferentes meios de extração de calor e a influência sobre a dureza do aço ABNT 862. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 2, n. 1, p. 82-90, 2020.

OLIVEIRA, B. F. **Efeito dos tratamentos térmicos sobre a microestrutura e as propriedades de um aço ARBL microligado com estrutura bruta de solidificação**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

SÁ, S. M. **Influência da temperatura de revenimento nas propriedades mecânicas do aço AISI 5150**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P.R. **Aços e Ligas especiais**. 1ª ed. São Paulo, Blucher, 2006.

SILVA, E. X. B. **Influência do espaçamento interlamelar da perlita nas propriedades mecânicas do aço ABNT – 1080**. 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2022.