



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE ESFEROIDIZAÇÃO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 5140**

Jader André Dal Sochio

171369

Orientadora: Prof. Dr. Liane Roldo

Julho de 2014

JADER ANDRÉ DAL SOCHIO

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE ESFEROIDIZAÇÃO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 5140

Trabalho de Conclusão de curso,
apresentado como requisito parcial à
obtenção do Grau em Engenharia de
Matérias, pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Prof. Dr. Liane Roldo

Porto Alegre

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos professores da UFRGS, em especial os do Departamento de Engenharia de Materiais, pelos ensinamentos. Em especial, aos professores Álvaro Meneguzzi, Vânia Caldas de Sousa, Luis Alberto dos Santos e minha orientadora Liane Roldo pelas oportunidades e aconselhamentos dados.

Agradeço o apoio e amizade de colegas de aula e de LABIOMAT nesta jornada acadêmica.

Quero agradecer à empresa Irwin Ferramentas do Brasil pela oportunidade de estágio dada. Lá conheci grandes profissionais e excelentes pessoas, que sempre estiveram dispostas a me ajudar e me orientar profissionalmente.

Ao meu tio e padrinho Carlos Alberto Machado, pioneiro na família a estudar na UFRGS, que sempre incentivou e apoiou meus estudos na universidade, meu muito obrigado.

Agradeço ao Grupo de Ensaio Mecânicos (GEM) pelos ensaios de tração e ao Wilbur, do Laboratório de Caracterização (LACAR), por entender minha falta de tempo e me ajudar nos tratamentos térmicos realizados para este trabalho.

Aos amigos de Farroupilha pelo apoio e momentos singulares que passamos juntos.

À minha namorada Franciele, que nos momentos bons e ruins esteve sempre comigo.

Por último, a base de tudo, meus pais Alencar e Andréa, por sempre incentivarem a minha liberdade de escolha, por apoiarem minhas decisões, pela educação dada, pelos sacrifícios feitos em prol dos filhos, meu MUITO OBRIGADO.

RESUMO

Devido à constante otimização de processos de fabricação, que envolve a redução de custos de produção e aumento de produtividade, mantendo a qualidade necessária do produto, desenvolvem-se várias técnicas no que se diz respeito ao material para que este seja transformado em produto. Através do tratamento térmico de esferoidização do aço AISI 5140, buscou-se a microestrutura e as propriedades mecânicas que melhor se ajustassem ao processo de conformação a frio. Para obter estes resultados, amostras foram submetidas a 4 e 8 horas de tratamento térmico de esferoidização a 690°C e comparados com o tratamento térmico de recozimento pleno. Após foram realizados ensaios de microdureza Vickers, ensaio de tração, análise de microestrutura em microscópio óptico, bem como análise em microscópio eletrônico de varredura. Também foram realizados testes em máquina de conformação de perfis a frio, a fim de se analisar e comparar o aspecto visual. Os resultados da micrografia mostraram, no tratamento térmico de esferoidização, a evolução com o tempo da decomposição das lamelas de cementita presentes na perlita para, carbeto de ferro coalescidos. Como esperado, o ensaio de dureza mostrou a diminuição da dureza do aço, de acordo com o tempo de tratamento térmico. Assim como os dados fornecidos pelo ensaio de tração mostram que, tanto o limite de escoamento, quanto o limite de resistência à tração aumentaram nas amostras com recozimento pleno enquanto que o alongamento aumentou consideravelmente com o tratamento de esferoidização de 8 horas. Já o acabamento superficial manteve-se constante nos perfis conformados, havendo maior grau de descamamento nas amostras esferoidizadas quando a carga nas amostras era aumentada.

Palavras-chave: AISI 5140, esferoidização, recozimento pleno, conformação a frio, propriedades mecânicas.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama TTT do aço AISI 5140, mostrando as linhas de transformação de fase e principais temperaturas de tratamentos térmicos.	11
Figura 2: Ilustração do ciclo térmico de recozimento pleno traçado em diagrama TTT do aço AISI 5140.	13
Figura 3: Diagrama Ferro-Carbono evidenciando as faixas de temperatura utilizadas para o tratamento térmico de esferoidização.	14
Figura 4: Ciclos Possíveis de Tratamento Térmico de Esferoidização.....	14
Figura 5: Aço hipoeutetóide AISI/SAE 1040 constituído de ferrita (coloração branca) e perlita (coloração escura). Ataque químico de 4% picral, 2% nital. Aumento de 800x.	16
Figura 6: Representação esquemática do estágio em que as lamelas de cementita se fragmentam, no início do processo de esferoidização.	16
Figura 7: Aço hipoeutetóide AISI/SAE 1040, de composição inicial ferrítica-perlítica, após 21 horas de tratamento térmico de esferoidização, a 700 °C. Ataque químico: 4% Picral e 2% Nital.	17
Figura 8: Imagem ilustrativa do processo de conformação de perfil. O aço é comprimido entre dois rolos com recartilhado igual ao perfil da broca.....	24
Figura 9: Micrografia do aço AISI 5140 com recozimento pleno. Nota-se que a microestrutura é composta de ferrita e perlita. Aumento de 500x.	25
Figura 10: Micrografia da amostra original, onde se observa microestrutura composta por ferrita pró-eutetóide (fase clara) e perlita (fase escura). Aumento de 1000x.....	25
Figura 11: Imagem com 1000x de aumento, evidenciando diferente microestrutura em relação à amostra original, onde as lamelas de cementita da perlita transformaram-se em partículas menores.	26
Figura 12: Microestrutura do aço AISI 5140 com carbonetos coalescidos por 8 horas a 690 °C (aumento de 1000x, ataque Nital 2%).	26
Figura 13: Micrografia de MEV revelando a estrutura perlítica da amostra original. Parâmetro de análise: 3000 vezes.	27
Figura 14: A imagem mostra a distribuição da cementita após 4 horas de tratamento térmico de esferoidização, mostrando que o tempo ao qual foi submetida a amostra não foi suficiente para a esferoidização.	28
Figura 15: A microscopia eletrônica evidenciou que o tempo de 8 horas de esferoidização foi eficaz quanto à formação das esferas de cementita.	28
Figura 16: Carbonetos claramente esferoidizados em matriz ferrítica, com aumento de 5000 vezes em MEV, com tempo de esferoidização de 8 horas. .	29
Figura 17: Gráfico representativo da média de valores de limite de escoamento (1), limite de resistência à tração (2) e alongamento máximo (3).	30
Figura 18: Macrografia do início do canal do perfil conformado da ferramenta, com recozimento pleno, evidenciando o bom acabamento superficial.....	31

Figura 19: Macrografia do final do canal do perfil conformado da ferramenta, com recozimento pleno, mostrando a rugosidade superficial.....	32
Figura 20: Macrografia do canal da amostra esferoidizada por 4 horas e conformada a frio, mostrando o bom acabamento superficial.....	32
Figura 21: Macrografia do final do canal do perfil conformado, com esferoidização de 4 horas. Nota-se o aumento da rugosidade e o princípio de descamamento de material.	33
Figura 22: Macrografia do início do canal da amostra esferoidizada por 8 horas. Bom acabamento superficial.	33
Figura 23: Macrografia do fim do canal da amostra esferoidizada por 8 horas. Além da elevada rugosidade, ocorre descamamento de metal no canto direito superior.	34
Figura 24: Comparação do fechamento do perfil da raia das amostras recozida (a) e esferoidizada por 8 horas (b).	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço AISI 5140.....	10
Tabela 2: Valores encontrados em ensaio de dureza Vickers H1, com 4 medições a meio raio e 1 medição no centro de cada amostra.	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 Problema de Pesquisa.....	9
1.2 Objetivo Geral	9
1.2.1 Objetivos Específicos.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Aço AISI 5140	10
2.2 Tratamentos Térmicos.....	12
2.2.1 Tratamento Térmico de Recozimento Pleno	12
2.2.2 Tratamento Térmico de Esferoidização.....	13
2.3 Etapas de Coalescimento da Cementita.....	15
2.4 Métodos de Caracterização e Ensaio Mecânicos	17
2.4.1 Análise Micrográfica	17
2.4.2 Ensaio de Dureza	18
2.4.3 Ensaio de Tração	19
2.5. Conformação Mecânica.....	19
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
3.1 Amostragem.....	22
3.2 O Tratamento Térmico.....	22
3.3 Caracterização e Ensaio mecânicos.....	22
3.3.1 Análise Micrográfica.....	22
3.3.2 Ensaio de Dureza Vickers.....	23
3.3.3 Ensaio de Tração Uniaxial.....	23
3.4 Análise do Material Conformado a Frio.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 Análise de Microestrutura	25
4.2 Ensaio Mecânicos.....	29
4.2.1 Ensaio de Dureza	29
4.2.2 Ensaio de Tração	30
4.2.3 Inspeção Visual.....	31
5. CONCLUSÃO	36
5.1 Proposições para trabalhos futuros.....	37
6. REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

As empresas têm como prática a redução de custos e aumento da produtividade. Produzir mais, utilizando menos, está fortemente ligado à competitividade de preços no mercado. Para isto, tem-se investido fortemente em estudos de novos processos e também na seleção de materiais nos quais serão aplicados estes processos. A definição da matéria-prima adequada para o processo, além das máquinas e equipamentos, tem sido determinante para gerar eficiência no processo produtivo. Além disso, a escolha da matéria prima deve manter as qualidades do produto as quais os clientes já estão acostumados, sejam elas suas características visuais (acabamento), ou mecânicas (resistência mecânica).

Além de manter as características e propriedades finais do produto, a matéria prima selecionada deve apresentar fácil processamento. Caso contrário, haverá aumento do custo de processo, inviabilizando a nova tecnologia. Um exemplo característico disto é a usinabilidade de aços com alto teor de carbono, onde há desgaste excessivo da ferramenta de corte, quando comparado a aços com menor teor de carbono (SANTARRIAGA, Pablo A.C, 2008). Por outro lado, aços de elevada ductilidade reduzem a vida útil da ferramenta devido à formação de aresta postiça.

No processo de laminação a frio, onde as temperaturas de trabalho são abaixo da temperatura de recristalização (Schaeffer, 1995) o metal é submetido a cilindros que comprimem no formato desejado, deixando um acabamento superficial de qualidade e conferindo-lhe propriedades mecânicas e tolerância dimensional. Devido ao fato do processo em questão ser em temperatura ambiente, determinados tipos de aço podem oferecer resistência à conformação, criando defeitos superficiais e internos no produto.

Quando se trata de processamento de materiais metálicos, fatores dependentes do material, como composição química, microestrutura e as propriedades mecânicas no momento em que o este aço será processado,

além de suas dimensões, possuem influência direta nos parâmetros de máquina e características do produto final (*Metals HandBook, 1978*).

Para este estudo foi utilizado o aço AISI 5140, onde foram realizados ensaio de dureza, ensaio de tração uniaxial e análise de microestrutura das condições recozida e esferoidizadas por 4 e 8 horas, além de análise visual do material conformado.

1.1 Problema de Pesquisa

Qual é a condição microestrutural que possibilita excelente conformação a frio do aço AISI 5140?

1.2 Objetivo Geral

Analisar as propriedades mecânicas e de microestrutura de um aço AISI 5140 tratado termicamente por recozimento pleno e por esferoidização, visando a melhor condição para conformação mecânica a frio.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Analisar a microestrutura do aço AISI 5140 com tratamentos térmicos de recozimento pleno e esferoidização por 4 e 8 horas.
- Realizar ensaios mecânicos de microdureza Vickers e de tração uniaxial.
- Realizar inspeção via estereoscópio do acabamento superficial das amostras conformadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aço AISI 5140

O aço AISI 5140 é classificado como um aço de construção mecânica ligado. Em função da temperatura que estes aços podem ser conformados, pode-se classificá-los como trabalho a frio, a morno ou a quente. Os produtos dos aços de construção mecânica, portanto do aço AISI 5140, vão desde barras trefiladas para fabricação de eixos, molas, ferramentas, além de serem empregados na agroindústria e no setor metal mecânico (Belgo,2014).

Segundo a NBR NM 87 a composição química do AISI 5140 pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço AISI 5140.

Aço	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr
5140	0,38-0,43	0,70-0,95	0,035	0,040	0,15-0,35	0,70-0,9

Fonte: NBR NM 87 (2000)

Dentre as principais propriedades que podem ser obtidas, percebe-se a elevada dureza obtida quando temperado em água ou em óleo, alcançando valores entre 57 e 60 HRc na superfície. Além disso, processos alternativos de beneficiamento como nitretação, carbonitretação, austêmpera e martêmpera podem ser utilizados para otimização de propriedades (*Heat Treaters Guide, 1995*). A efetividade dos tratamentos de austêmpera e martêmpera são possíveis devido à presença de cromo na composição, que aumenta a temperabilidade do aço.

A Figura 1 mostra o diagrama TTT característico do aço AISI 5140, apresentando as principais temperaturas de tratamentos térmicos do aço, como as linhas A₁ e A₃, e linhas de início de transformação martensítica.

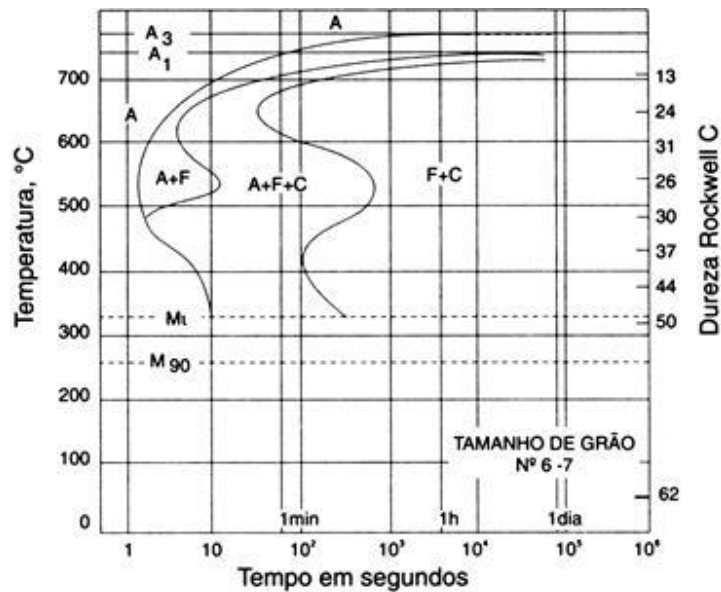


Figura 1: Diagrama TTT do aço AISI 5140, mostrando as linhas de transformação de fase e principais temperaturas de tratamentos térmicos.

Fonte: adaptado de *Heat Treater's Guide*, (1994).

Além disso, o gráfico mostra faixas de dureza que podem ser obtidas relativas às temperaturas utilizadas para resfriamento.

Por ser um aço para beneficiamento, várias técnicas são utilizadas para se obter as propriedades mecânicas desejadas. A nitretação iônica, que têm grandes utilizações industriais devido à rápida penetração do nitrogênio e aumento da resistência à fadiga e ao desgaste (Kowacs, 1986), foi utilizada, variando-se parâmetros como temperatura, tempo e composição de gás utilizado (N₂/H₂), resultando em aumento de até 45% da resistência a fadiga e aumento de até 100% da dureza superficial (Alsaran et al, 2002) do aço AISI 5140.

O aço AISI 5140 também pode ser utilizado no processo de fabricação chamado *Hot Ring Rolling*, onde o material de partida é um anel de paredes espessas (Zhichao, 2010). No final do processo, as paredes do material estão com espessura menor e o diâmetro e altura do anel nas medidas especificadas. A estrutura final dos grãos é circunferencial, melhorando as propriedades mecânicas. As aplicações podem ser turbinas, tubulações e vasos de pressão (Degarmo, 2003)

2.2 Tratamentos Térmicos

Tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento, com controle de tempo, atmosfera e taxas de resfriamento, utilizados para obter propriedades específicas para dado material.

As propriedades do material dependem, a princípio, da sua estrutura.

O tratamento térmico que tem como objetivo reduzir a dureza do material e facilitar o trabalho a frio ou atingir microestrutura e propriedades desejadas para tal processo, é o tratamento térmico de esferoidização (Silva, 2006).

2.2.1 Tratamento Térmico de Recozimento Pleno

O recozimento é o tratamento térmico que consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica, para alcançar objetivos como: remover tensões de trabalho a frio, diminuir dureza para posteriores processos de fabricação, alterar propriedades mecânicas e eliminar tratamentos térmicos aos quais os aços possam ter sido submetidos (Chiaverini, 1979).

No recozimento pleno aquece-se o aço até que haja total transformação da estrutura em austenita, seguido de um resfriamento muito lento, por controle de velocidade de resfriamento do forno ou desligando-o e resfriando o metal dentro dele. Obtém-se então estrutura de ferrita e perlita grosseira.

Quando metais laminados a frio são tratados termicamente, dois processos, recuperação e recristalização, competem pela energia armazenada no trabalho a frio. A recristalização é definida como a reorientação de cristais em um corpo sólido pela migração de contornos de alto ângulo. A recuperação é um termo geral aplicado a todas as outras mudanças que reduzem a energia armazenada de deformação.

O processo de recozimento é uma das etapas na fabricação de aços laminados a frio e consiste em um tratamento térmico que contribui para a obtenção das propriedades requeridas em suas aplicações. Basicamente este tratamento consiste das etapas de recuperação, recristalização e crescimento de grão (Fagundes, 2006).

A Figura 2 mostra o diagrama TTT do aço AISI 5140, com a curva destacada do recozimento pleno, indicando a microestrutura resultante.

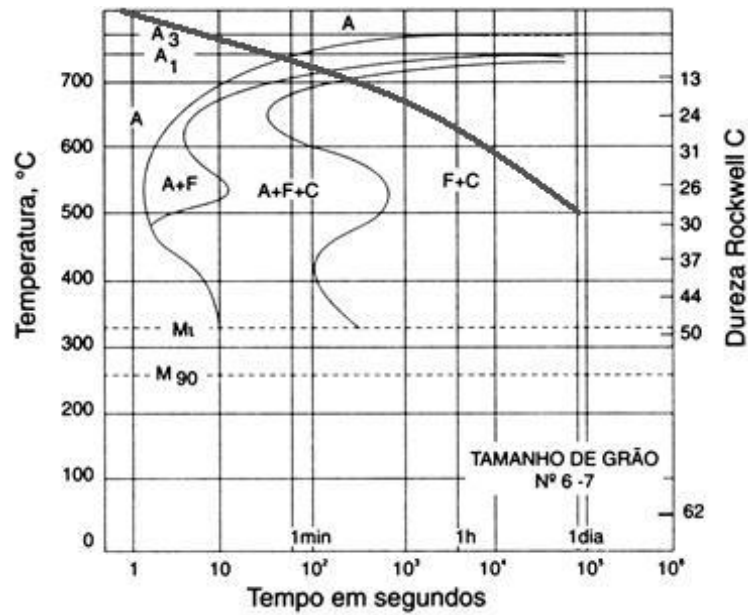


Figura 2: Ilustração do ciclo térmico de recozimento pleno traçado em diagrama TTT do aço AISI 5140.

Fonte: adaptado de Heat Treaters Guide, (1994).

A estrutura resultante do recozimento pleno é ferrita e perlita grosseira para aços hipoeutetóides.

2.2.2 Tratamento Térmico de Esferoidização

Este tratamento visa à obtenção de carbonetos esferoidizados em uma matriz ferrítica. A esferoidização de cementita na matriz de ferrita tem efeito determinante nas propriedades dos aços de médio carbono. Quando a estrutura perlítica é substituída por uma estrutura ferrítica com esferóides de carbonetos, nota-se uma maior facilidade para conformação a frio. (Silva, 2006).

As temperaturas a serem definidas para cada ciclo de tratamento podem ser mais bem analisadas na Figura 3, a seguir.

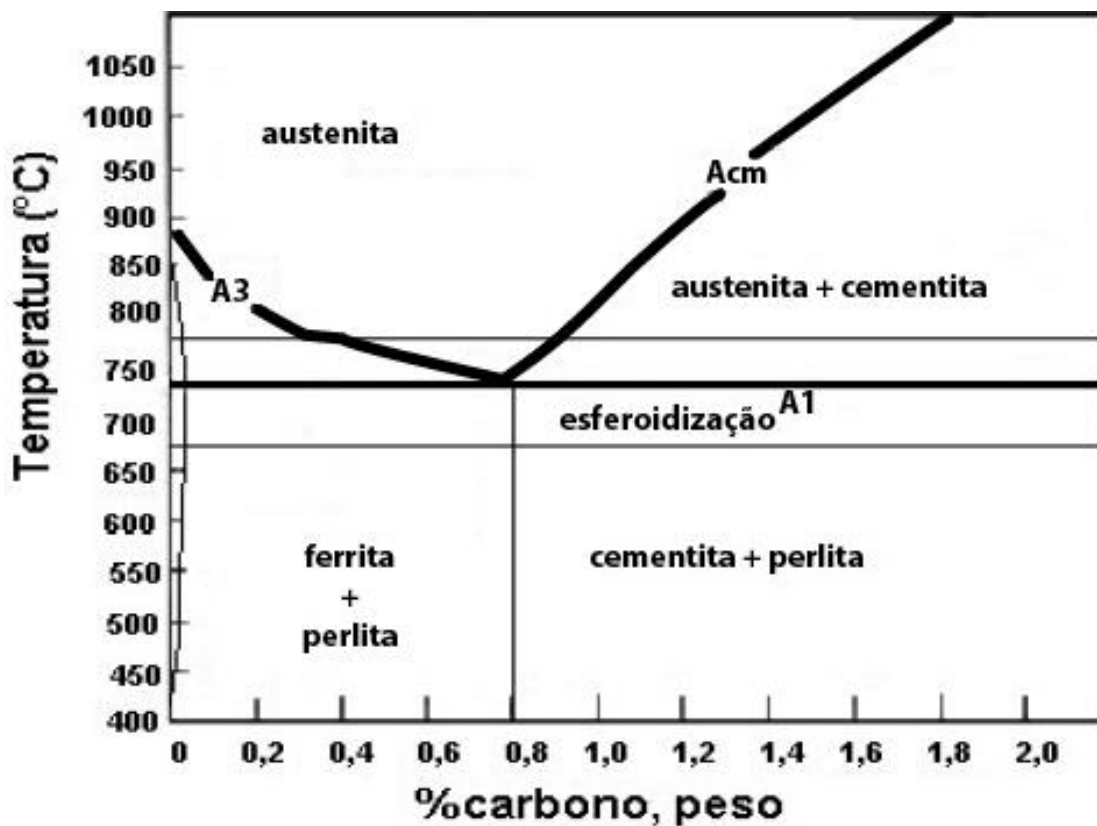


Figura 3: Diagrama Ferro-Carbono evidenciando as faixas de temperatura utilizadas para o tratamento térmico de esferoidização.
Fonte: Metals Handbook vol.03, (1994).

Na Figura 4 abaixo, são apresentados os ciclos térmicos possíveis para esferoidização.

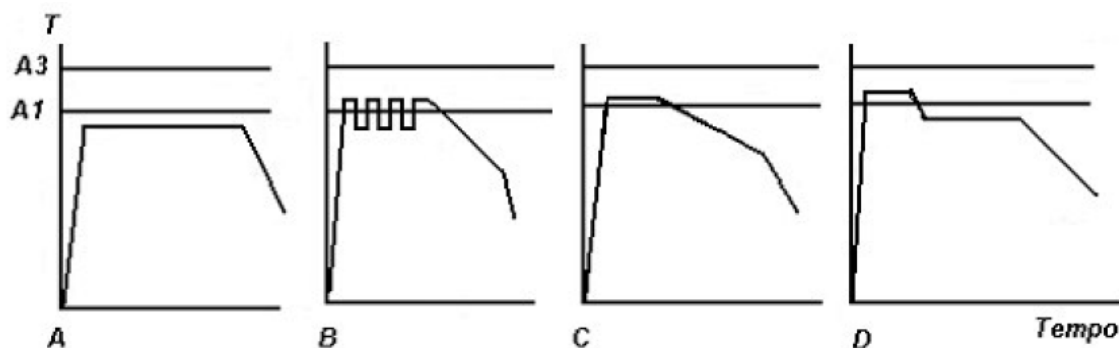


Figura 4: Ciclos Possíveis de Tratamento Térmico de Esferoidização.
Fonte: Rossi, (1983).

De acordo com a Figura 4 há vários ciclos de tratamento de esferoidização (Rossi, 1983).

A) Manutenção em temperatura logo abaixo de A1, por tempo prolongado.

B) Aquecimento e resfriamento alternados entre 2 temperaturas, uma logo acima e uma logo abaixo de A1. A cada vez que se sobe a temperatura, carbonetos finos se dissolvem, e quando se baixa, eles precipitam em carbonetos não dissolvidos.

C) Aquecer 10 a 30 C acima da temperatura A1, mantendo nessa temperatura pelo tempo de encharque, seguido de resfriamento lento controlado (5 a 10 C/h) até temperatura logo abaixo de A1. Isso faz com que não haja uma dissolução completa dos carbonetos, que atuarão na nucleação dos carbonetos esferoidizados.

D) Aquecer o aço entre A1 e A3 ou Acm e resfriar rapidamente abaixo de A1, mantendo nessa temperatura tempo o suficiente para obter-se coalescimento da cementita (4 a 8 horas).

2.3 Etapas de Coalescimento da Cementita

De acordo com o tratamento adotado, pode haver variação no tamanho, forma e distribuição das esferas de carbonetos. O tamanho do grão ferrítico também é afetado pelo ciclo térmico. A Figura 5 mostra a microestrutura do aço hipoeutetóide SAE/AISI 1040, onde os grãos brancos são constituídos de ferrita e os grãos escuros são constituídos de perlita (Samuels, 1980).

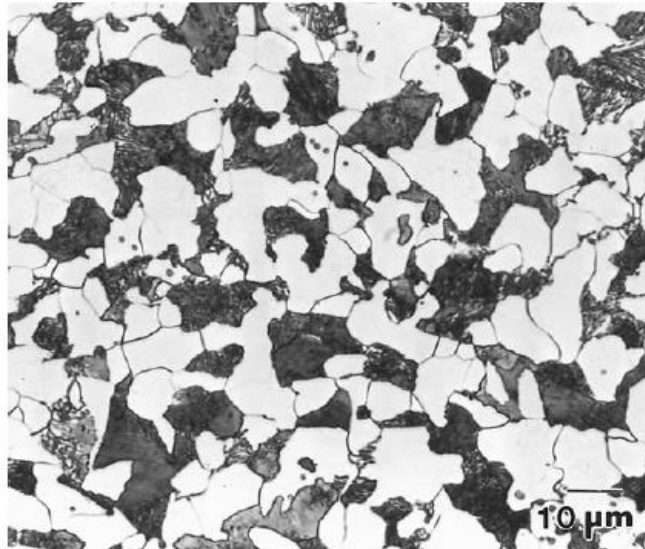


Figura 5: Aço hipoeutetóide AISI/SAE 1040 constituído de ferrita (coloração branca) e perlita (coloração escura). Ataque químico de 4% picral, 2% nital. Aumento de 800x.
Fonte: Samuels, (1980).

Para aços de médio carbono ocorre a decomposição da cementita presente na perlita. Na primeira etapa, as lamelas se fragmentam, através de canais que se formam no seu interior, com razão Comprimento/Largura igual a 8. A Figura 6 mostra um diagrama esquemático que ilustra as lamelas de cementita neste estágio.

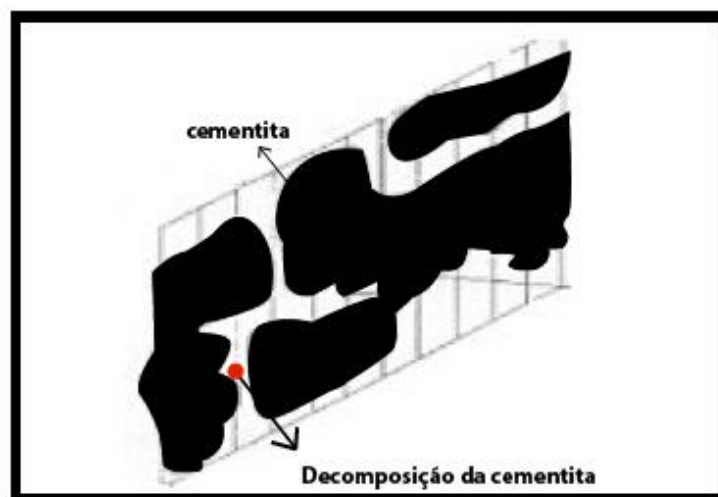


Figura 6: Representação esquemática do estágio em que as lamelas de cementita se fragmentam, no início do processo de esferoidização.
Fonte: Metals Handbook, (1994).

Em seguida, na segunda etapa, a razão entre Comprimento e Largura tende a 1, ou seja, as partículas tornam-se esféricas. Na terceira etapa, ocorre o crescimento de partículas, dado que se incorporam a outras maiores, aumentando assim a distância entre elas.

Quando o intervalo de temperatura é alto, pode ocorrer grafitização. Na Figura 7, um aço AISI/SAE 1040 esferoidizado a 700 °C, durante 21 horas, partindo de uma estrutura ferrítica-perlítica recozida.

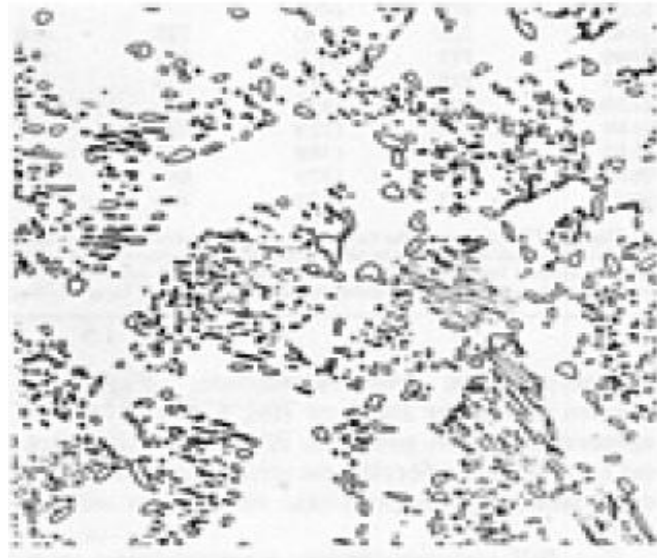


Figura 7: Aço hipoeutetóide AISI/SAE 1040, de composição inicial ferrítica-perlítica, após 21 horas de tratamento térmico de esferoidização, a 700 °C. Ataque químico: 4% Picral e 2% Nital.

Fonte: Samuels, (1980).

A estrutura da Figura 7 é proveniente da decomposição da cementita contida nos grãos de perlita da Figura 5.

2.4 Métodos de Caracterização e Ensaios Mecânicos

2.4.1 Análise Micrográfica

Existem várias técnicas para se analisar a estrutura de aços em escala microscópica em que a preparação da amostra é muito semelhante uma à outra. Entre as principais, estão a microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET).

A microscopia ótica utiliza a interação da luz visível com a amostra, permitindo a observação do relevo, cor e polarização da amostra. Para se

observar a microestrutura através de microscopia óptica primeiramente se localiza a seção a ser analisada. A seguir, lixa-se e faz-se polimento para obtenção de uma superfície plana e polida. Com um ataque químico com um reagente adequado, pode-se fazer o exame no microscópio, para observação da microestrutura. Por último, faz-se o registro do observado através de fotografia. (COLPAERT, 2008).

2.4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A principal característica do microscópio eletrônico de varredura é que uma área relativamente grande da amostra pode ser observada, pois o feixe de elétrons varre a superfície da amostra. À medida que o feixe varre a amostra, os sinais gerados são coletados por detectores e apresentados em uma tela com varredura sincronizada com a varredura do feixe sobre a amostra. Além disso, a análise por MEV permite uma visualização com pouco preparo de superfície, sendo muito utilizado para análise de fraturas (COLPAERT, 2008)

2.4.2 Ensaio de Dureza

Existem várias definições de dureza, que não caracterizam todas as situações, pois ela assume um significado diferente conforme o contexto em que é empregada (SOUZA, 1974). Apesar das diversas definições, um material com grande resistência à deformação plástica permanente também terá alta resistência ao desgaste, alta resistência ao corte e será difícil de ser riscado, ou seja, será duro em qualquer uma dessas situações. Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência do que qualquer outro ensaio mecânico, pois são simples, mais baratos e não comprometem funcionalmente a peça ensaiada (CHANG et al., 1976).

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada "F" pela área de impressão "A" deixada no corpo ensaiado (SOUZA, 1974).

O ensaio de microdureza Vickers é similar ao Vickers, exceto pelo fato de que as identações são microscópicas e os aparelhos são mais sofisticados.

Para fins comparativos, conversões podem ser feitas de HV para HB, por meio de tabelas de conversão.

2.4.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um dos principais ensaios mecânicos relacionados às propriedades dos materiais. Os resultados são influenciados por fatores como: temperatura, velocidade de deformação, microestrutura do material, percentual de impureza e condições ambientais (GARCIA, 2012).

De acordo com o andamento do ensaio, a máquina gerará um gráfico de Tensão x Deformação, que pode ser dividido em duas partes.

- Na primeira parte, a elasticidade é a propriedade do material de retornar à forma original, uma vez removida a força externa atuante. Esse fenômeno ocorre em todos os materiais sólidos, pelo menos no estágio inicial de deformação. Os átomos são deslocados e, cessada a aplicação da carga, eles retornam ao seu estado original. Não há, portanto, formação de defeitos nos cristais (GUY, 1980; FERRAZ, 2003).

- Na segunda etapa, ocorre a deformação plástica, onde há um rompimento de ligações atômicas e, posteriormente, essas ligações são reativadas com novos átomos. Tal fato faz com que o objeto não retorne ao seu formato original (GUY, 1980).

Quando a deformação plástica é atingida, ocorre alteração da estrutura interna do material, ocorrendo o encruamento e é acompanhado da elevação do valor da resistência e redução da ductilidade do metal (FERRAZ, 2003).

2.5. Conformação Mecânica

Os processos de conformação mecânica são processos de fabricação que utilizam a deformação plástica para dar forma a corpos metálicos, mantendo sua massa e integridade. Como exemplo, podemos citar forjamento

e laminação, trefilação e extrusão; estiramento, dobramento e corte por cisalhamento (Button, 2000).

Tanto os trabalhos primários, que envolvem a produção de tarugos e chapas, bem como os trabalhos secundários, feitos em cima destes produtos, podem ser feitos a quente ou a frio.

Na conformação a quente, o metal é aquecido e trabalhado acima da temperatura de recristalização. Já na conformação a frio, o trabalho é realizado abaixo da temperatura de recristalização e o material apresenta-se encruado, ou parcialmente encruado, ou seja, os grãos estão alongados na direção da deformação (Schaeffer, 1995).

Existe também o trabalho a morno, que alia as vantagens de ter menor grau de endurecimento da conformação a quente e de apresentar bom acabamento superficial e precisão dimensional devido à diminuição da oxidação e da dilatação térmica da conformação a frio. Além disso, há recuperação parcial da ductilidade do material e redução da deterioração da ferramenta (ASM Handbook, 1993).

Para a maioria dos metais o regime elástico permite deformações de até 0,005. A partir deste ponto a tensão não é mais proporcional à deformação e ocorre a deformação permanente. Para os metais, esta deformação ocorre pelo movimento de discordâncias. Como os cristais dos metais apresentam orientação aleatória, o escorregamento varia de um grão para outro, ocorrendo ao longo da direção mais favorável (Callister, 1999).

A integridade dos grãos é mantida durante o processo de conformação, ou seja, não ocorre rompimento ou abertura. Assim, cada grão está restrito à forma dos grãos vizinhos (Callister, 1999).

Em materiais policristalinos, há interações com partículas de segunda fase, átomos de solução sólida e contornos de grão, então outros mecanismos estão presentes durante a deformação.

2.5.2 Fatores de Influência na Deformação Plástica a Frio

Além da presença de elementos de liga em solução sólida, há outra maneira de se ter uma maior resistência mecânica dos metais, que pode ser conseguida através da obtenção de ligas com duas ou mais fases. Fatores como tamanho, forma, densidade, distribuição, resistência, ductilidade, orientação cristalográfica e energia têm influência sobre a deformação plástica. A situação ideal são partículas finas dispersas uniformemente. Existe uma maior ductilidade de estruturas de aço que contenham cementita esferoidizada, quando comparadas com a cementita lamelar (Dieter, 1981).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Amostragem

O aço AISI 5140 é fornecido à empresa Irwin recozido plenamente. As amostras para análise metalográfica e para teste de laminação consistiam em barras de dimensões $\Phi 10,1$ mm x 160 mm retiradas de um lote, fornecida pela empresa, no seu estado inicial de recozimento pleno. As barras foram cortadas em torno GoodWay. Em seguida, foram feitos os tratamentos térmicos de esferoidização.

3.2 O Tratamento Térmico

O tratamento térmico de esferoidização utilizado foi baseado no proposto no *Heat Treater's Guide Practice and Producers for Irons and Steels*, que consiste em aquecer o aço até 750 °C, com tempo de permanência até homogeneização da temperatura e em seguida resfriamento rápido até 690 °C, mantendo nessa temperatura por 8 horas.

Esse processo foi feito em forno Sanchis cedido pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sem atmosfera controlada e o resfriamento das amostras foi ao ar calmo.

Já o recozimento pleno é feito pelo fornecedor do aço à empresa. Após a conformação, o aço é aquecido a 830 °C e resfriado a taxas controladas, para atingir baixos valores de dureza para facilitar o processamento do metal.

3.3 Caracterização e Ensaios mecânicos

3.3.1 Análise Micrográfica

Para este ensaio, foi utilizada uma cortadeira (Modelo CSK-80- Marca SKILL-TEC) para extrair uma pequena porção do material, que foi então embutida em baquelite através de uma embutidora, lixada em uma sequência de lixas (número 100, 220, 320, 600 e 1000). Após, para melhor acabamento superficial, foi utilizada pano de polimento de feltro e como lubrificante uma suspensão de água e alumina 3 μ m por 5 minutos.

As amostras embutidas foram analisadas com ataque químico para visualização da microestrutura em microscópio ótico AXIO LAB. A1 ZEISS e as imagens foram capturadas por software AXIO CAM ERC 55, com aumento de até 1000 vezes e microscópio eletrônico de varredura HITACHI TM 3000 (MEV), com aumentos de até 5000 vezes. O reagente utilizado foi Nital2% (2ml de ácido nítrico, 98 ml de álcool etílico).

3.3.2 Ensaio de Dureza Vickers

Foi realizado ensaio de microdureza Vicker (HV 1) em um microdurômetro Leco M400 H1, com impressões a distâncias de meio raio por 4 vezes e no centro da amostra, somando 5 medições por amostra. As médias e desvios padrões da amostra foram calculados e computados para fins comparativos.

3.3.3 Ensaio de Tração Uniaxial

Amostras com diâmetro inicial de 10,1 mm e comprimento de 150 mm foram usinadas e ensaiadas de acordo com a ASTM E8. Uma amostragem de três corpos de prova foi ensaiada para cada condição proposta neste trabalho.

3.4 Análise do Material Conformado a Frio

A conformação do perfil foi feita por uma Laminadora de Perfis TL50, da empresa Cavour. O processo consiste em comprimir o metal entre dois rolos com recartilhado idêntico ao perfil da broca. Estes rolos têm rotação no mesmo sentido e mesma velocidade angular. Uma velocidade linear é imposta a um dos rolos, que avança em direção ao aço, aproximando-se do outro rolo até uma distância pré-determinada, conformando o perfil.

A análise da superfície do material conformado foi feita através de um estéreo microscópio Olympus SZX16, e as imagens capturadas através do software *AnalySIS Started*. Foram feitas imagens do canal do material conformado, tanto no início quanto no final, e também da raia.

A Figura 8 ilustra o processo de conformação, bem como as regiões analisadas a inspeção via estereoscópio.

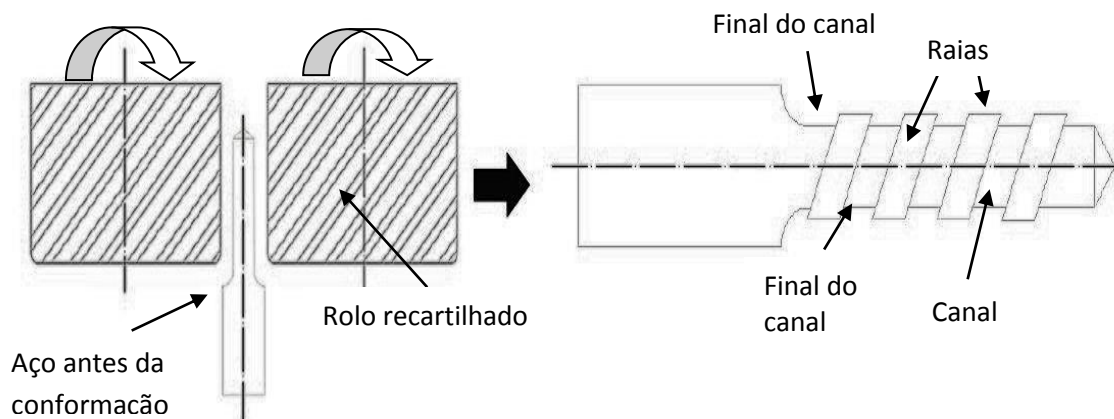


Figura 8: Imagem ilustrativa do processo de conformação de perfil. O aço é comprimido entre dois rolos com recartilhado igual ao perfil da broca.

Além de ilustrar o recartilhado dos rolos perfiladores, a Figura 8 mostra as principais regiões a serem analisadas após a conformação, sendo elas o canal, o final do canal e a raia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Microestrutura

As análises em microscópio óptico da condição inicial revelaram nas Figuras 9 e 10 a microestrutura. Podem-se observar as regiões mais claras, que são compostas por ferritapró-eutetóide e as regiões escuras, que são compostas por perlita, conforme observado por Samuels (1980).

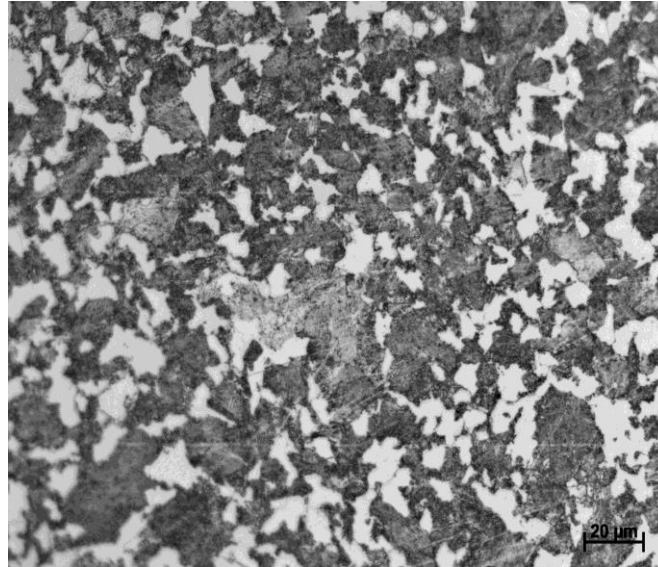


Figura 9: Micrografia do aço AISI 5140 com recozimento pleno. Nota-se que a microestrutura é composta de ferrita e perlita. Aumento de 500x.

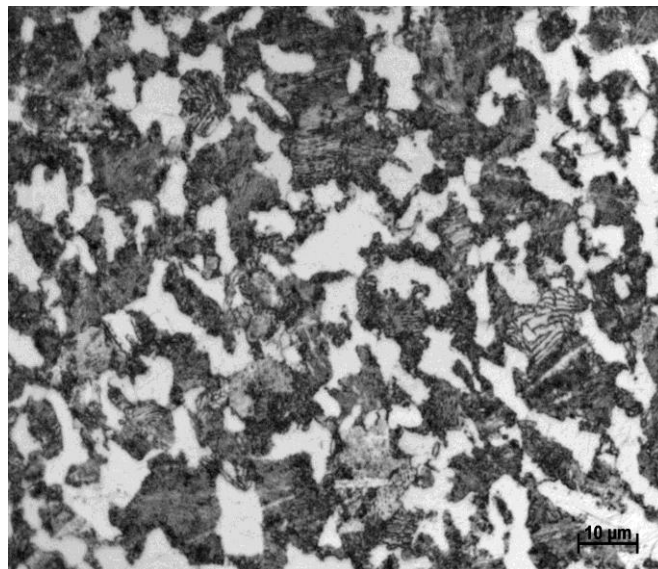


Figura 10: Micrografia da amostra original, onde se observa microestrutura composta por ferrita pró-eutetóide (fase clara) e perlita (fase escura). Aumento de 1000x.

A Figura 11 apresenta a microestrutura da amostra que foi submetida ao tratamento de esferoidização por 4 horas, a 690°C. Nota-se os tamanhos e a forma de dispersão dos carbonetos esferoidizados, formados a partir da decomposição das lamelas de cementita da perlita (Metals Handbook, 1994).

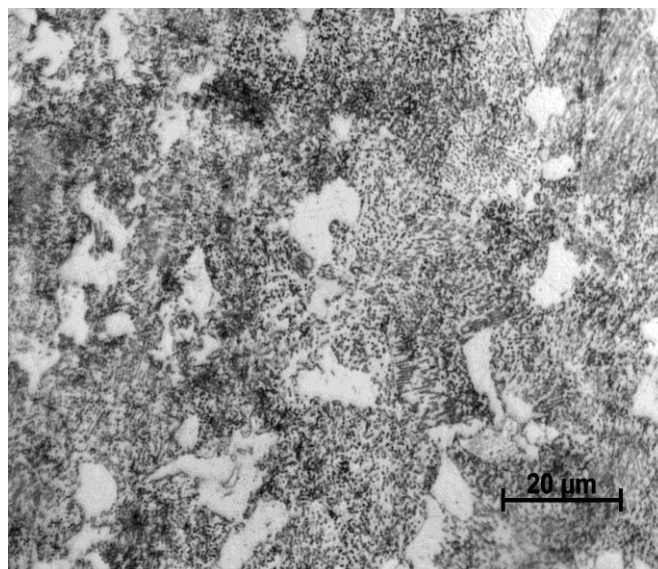


Figura 11: Imagem com 1000x de aumento, evidenciando diferente microestrutura em relação à amostra original, onde as lamelas de cementita da perlita transformaram-se em partículas menores.

A Figura 12 revela a microestrutura do aço AISI 5140 coalescido, com tempo de permanência em forno de 8 horas. Na Figura 12, nota-se a diferença do tamanho de carbonetos da amostra esferoidizada por 8 horas quando comparado com a amostra esferoidizada por 4 horas.

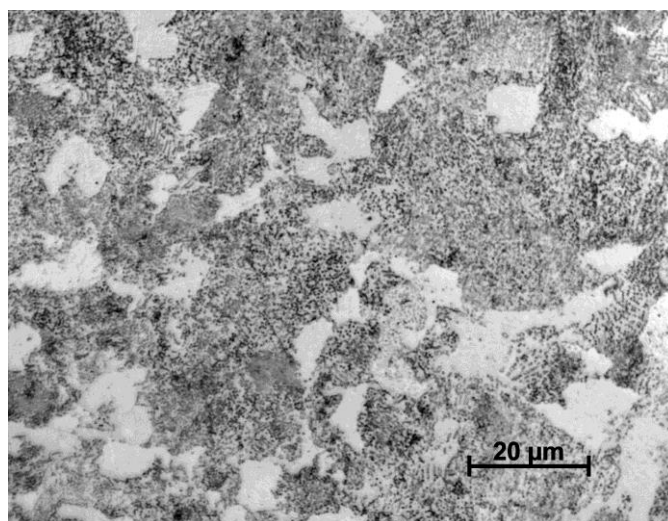


Figura 12: Microestrutura do aço AISI 5140 com carbonetos coalescidos por 8 horas a 690 °C (aumento de 1000x, ataque Nital 2%).

Para fins comparativos, as amostras foram submetidas à microscopia eletrônica com aumentos de 3000 e 5000 vezes. A Figura 13 revela a microestrutura obtida da amostra original, com aumento de 3000 vezes.

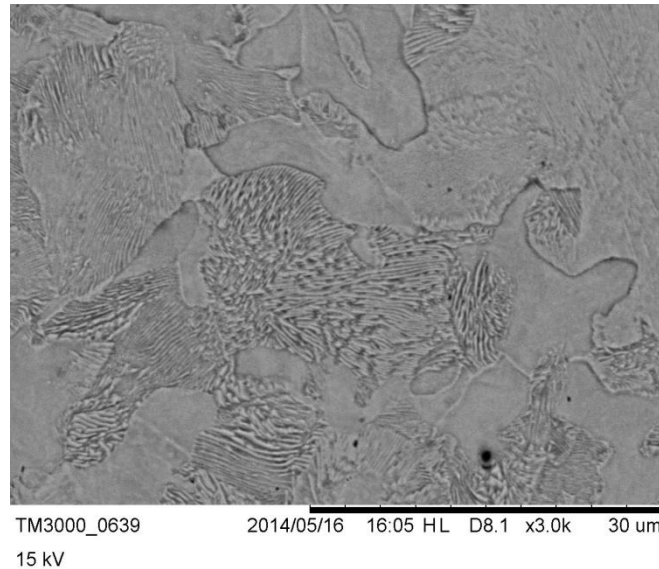


Figura 13: Micrografia de MEV revelando a estrutura perlítica da amostra original.
Parâmetro de análise: 3000 vezes.

A Figura 13 ilustra claramente a microestrutura do material recozido plenamente, onde se pode notar os grãos de ferrita pró-eutetóide e as lamelas de cementita da perlita.

Uma análise minuciosa feita por Microscopia Eletrônica de Varredura compara os tamanhos e o grau de decomposição das lamelas de cementita da perlita, em relação ao tempo de esferoidização aplicado.

As Figuras 14 e 15 comparam o formato e distribuição da cementita na matriz ferrítica.

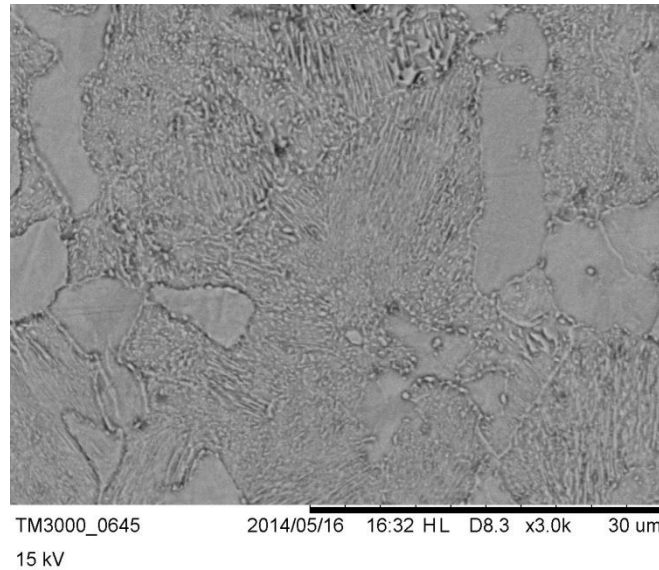


Figura 14: A imagem mostra a distribuição da cementita após 4 horas de tratamento térmico de esferoidização, mostrando que o tempo ao qual foi submetida a amostra não foi suficiente para a esferoidização.

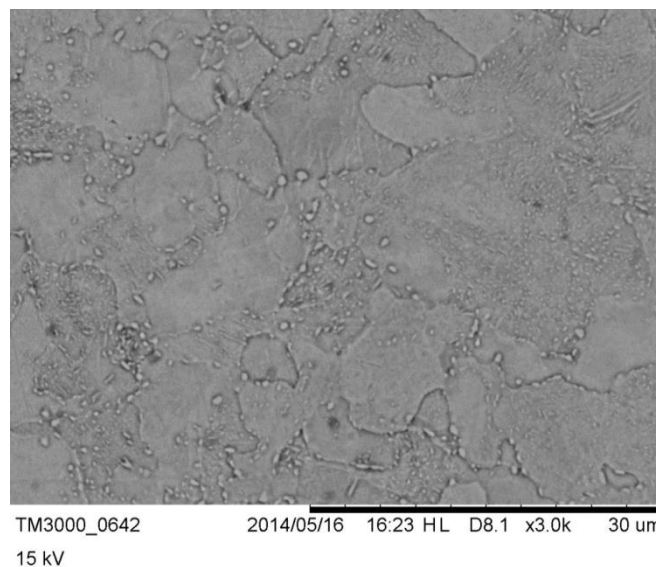


Figura 15: A microscopia eletrônica evidenciou que o tempo de 8 horas de esferoidização foi eficaz quanto à formação das esferas de cementita.

A partir das Figuras 13, 14 e 15, pode-se comparar a microestrutura quanto à decomposição das lamelas de cementita da perlita e o quanto se decompôs em cada caso. O tratamento de esferoidização de 4 horas não foi efetivo quanto à formação de esferas de carbonetos, ocorrendo apenas uma pequena decomposição das lamelas, esperada em estágios iniciais de esferoidização dos carbonetos de ferro, conforme ilustrado pela Figura 6, do Metals Handbook (1994). Quanto à amostra submetida a 8 horas de tratamento

térmico, este tempo foi efetivo para a formação dos carbonetos esferoidizados, obtendo-se microestrutura semelhante à Figura 7, observada em Samuels (1980), porém em menor tamanho, dado que o coalescimento do carboneto é função do tempo de tratamento térmico. A Figura 16, obtida por MEV, mostra claramente a distribuição e a morfologia dos carbonetos.

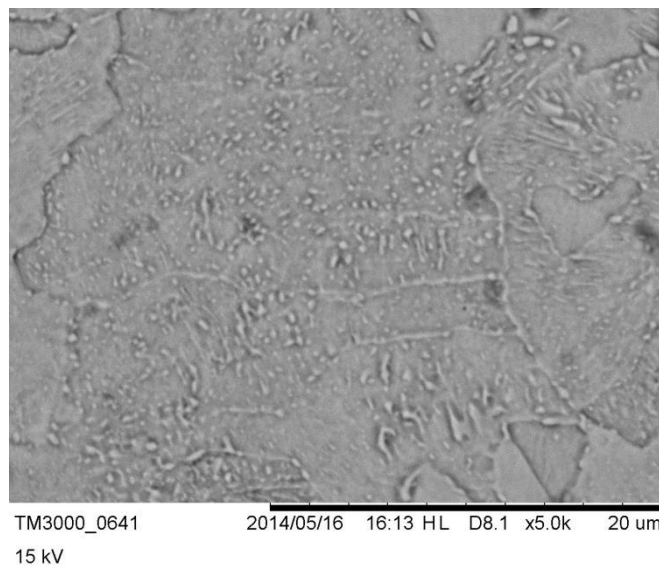


Figura 16: Carbonetos claramente esferoidizados em matriz ferrítica, com aumento de 5000 vezes em MEV, com tempo de esferoidização de 8 horas.

4.2 Ensaaios Mecânicos

4.2.1 Ensaio de Dureza

A tabela de durezas Vickers obtidas das amostras original e esferoidizadas com diferentes tempos de tratamento.

Tabela 2: Valores encontrados em ensaio de dureza Vickers H1, com 4 medições a meio raio e 1 medição no centro de cada amostra.

Amostra	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Recozimento Pleno	256,4	261,5	255,1	269,5	267,8	262,06	6,50
Esferoidização 4 horas	208,3	221,8	215,4	214,8	222,0	216,46	5,69
Esferoidização 8 horas	197,1	205,7	196,2	203,4	208,5	202,18	5,37

Os dados mostram uma grande diminuição da dureza do material da amostra original para a esferoidizada por 4 horas, mostrando que o tratamento térmico proposto foi efetivo, obtendo uma dureza intermediária, em caso em que a estrutura ainda não havia esferoidizado (Figura 13). Para a amostra esferoidizada por 8 horas, houve maior queda de valores de dureza, condizendo com a microestrutura de esferas de cementita obtida e visualizada através da Figura 15, evidenciando o aumento da ductilidade do material, efeito esperado por Dieter (1981).

4.2.2 Ensaio de Tração

A Figura 17 mostra a variação do limite de escoamento, do limite de resistência e do alongamento máximo com o tratamento térmico. Verificou-se a queda dos valores dos limites das amostras recozidas para as amostras esferoidizadas, porém, sem variação significativa para as amostras esferoidizadas por 4 e 8 horas. O alongamento, no entanto, teve acentuado crescimento, de valores próximos a 13% a 22%. Esta diminuição dos valores de limite de escoamento e limite de ruptura, bem como o aumento do alongamento na ruptura evidenciam o aumento de ductilidade do material através da esferoidização da cementita (Dieter, 1981).

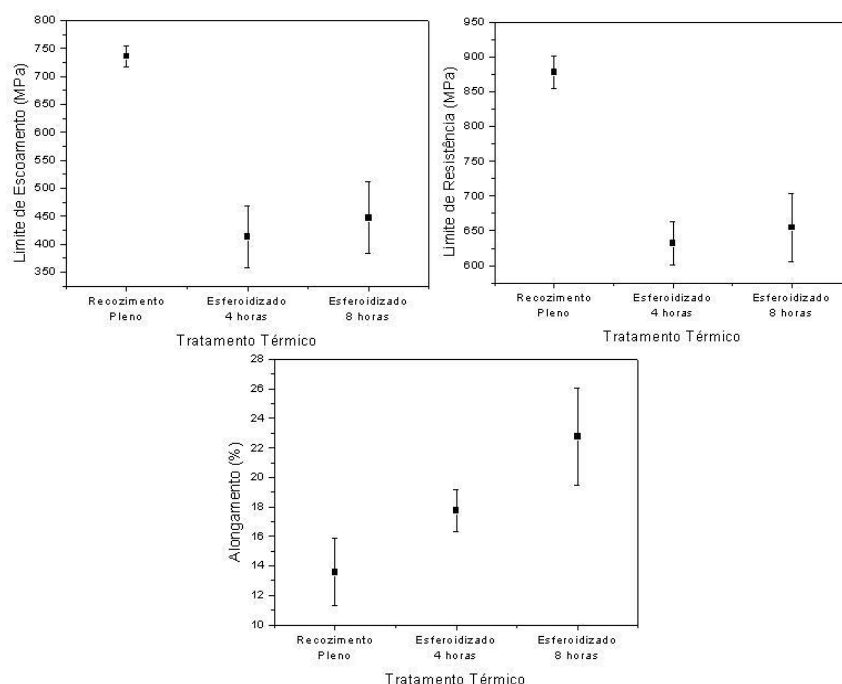


Figura 17: Gráfico representativo da média de valores de limite de escoamento (1), limite de resistência à tração (2) e alongamento máximo (3).

Uma explicação para a queda dos valores dos limites de resistência e escoamento é a decomposição da cementita lamelar e sua tendência a formar carbonetos coalescidos, aliviando as tensões do material (Callister,1999).

O aumento do alongamento máximo mostra o aumento da ductilidade do material, que aceitará maior deformação na conformação mecânica.

4.2.3 Inspeção Visual

A partir da análise por estereoscópio do canal do material conformado, pôde-se verificar a influência que os tratamentos térmicos tiveram sobre o acabamento e o aspecto superficial dos perfis conformados.

A Figura 18 mostra o início do canal do perfil conformado. O perfil se encontra em bom estado, com bom acabamento superficial.

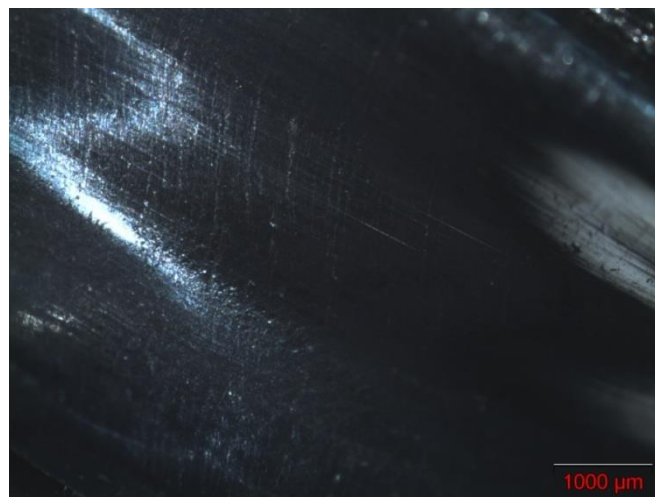


Figura 18: Macrografia do início do canal do perfil conformado da ferramenta, com recozimento pleno, evidenciando o bom acabamento superficial.

Ainda, foi feita a análise do final do canal, região que apresentou maiores diferenças entre as amostras. A Figura 18 foi feita a partir da região do fim do canal.

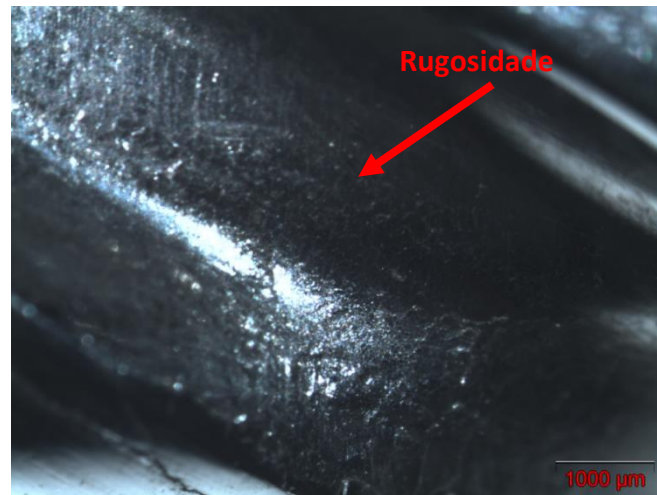


Figura 19: Macrografia do final do canal do perfil conformado da ferramenta, com recozimento pleno, mostrando a rugosidade superficial.

A diferença de rugosidade presente no canal indicada nas Figuras 18 e 19 é devido a regulagem de máquina, que imprime maior deslocamento de material na região do final do canal.

A Figura 20 mostra o aspecto superficial da amostra esferoidizada por 4 horas.

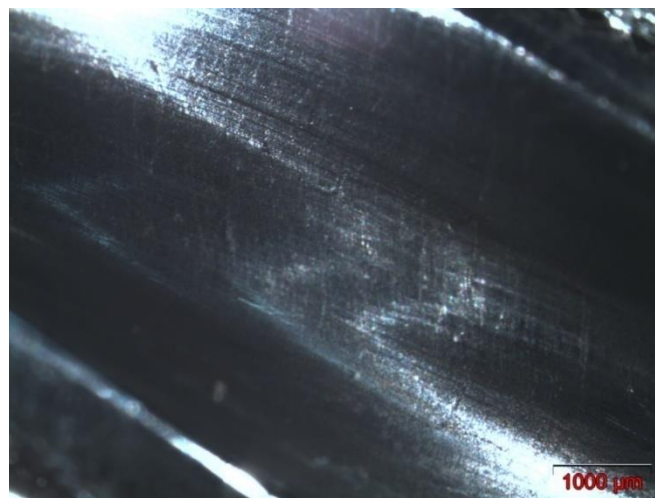


Figura 20: Macrografia do canal da amostra esferoidizada por 4 horas e conformada a frio, mostrando o bom acabamento superficial.

O aspecto superficial ilustrado na Figura 20 assemelha-se ao apresentado na Figura 18.

Porém, no final do canal, houve maior grau de rugosidade na superfície, prejudicando ainda mais o processo de conformação.

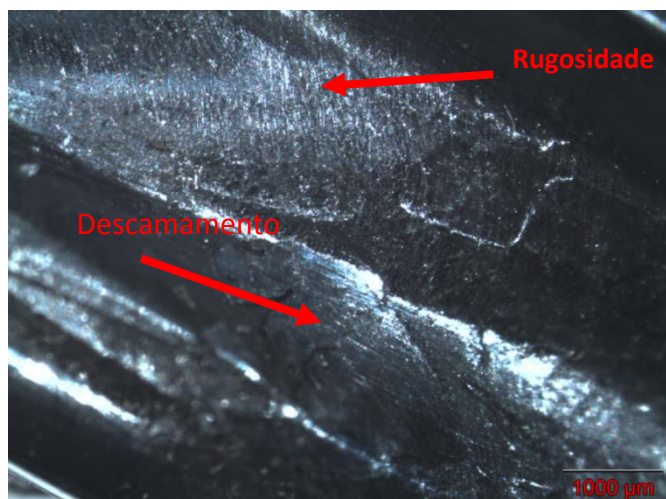


Figura 21: Macrografia do final do canal do perfil conformado, com esferoidização de 4 horas. Nota-se o aumento da rugosidade e o princípio de descamamento de material.

O descamamento na Figura 21 é mais visível e mais pronunciado que na Figura 19, indicando que o tratamento térmico tornou o material mais susceptível a este problema.

A Figura 22, capturada a partir da análise do início do canal da amostra esferoidizada por 8 horas, mostra igual aspecto superficial às outras amostras.

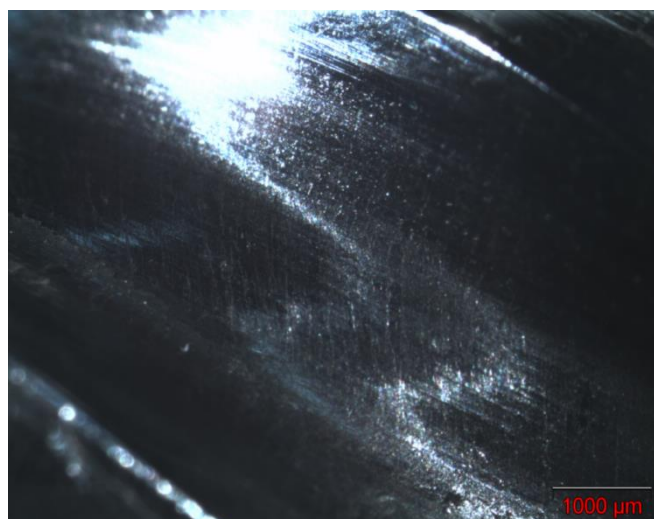


Figura 22: Macrografia do início do canal da amostra esferoidizada por 8 horas. Bom acabamento superficial.

Como ocorreu uma diferença entre o aspecto superficial da amostra recozida e esferoidizada por 4 horas, ocorreu também com a amostra esferoidizada por 8 horas. A Figura 23 indica elevado grau de rugosidade, ocorrendo o descamamento do metal da superfície.

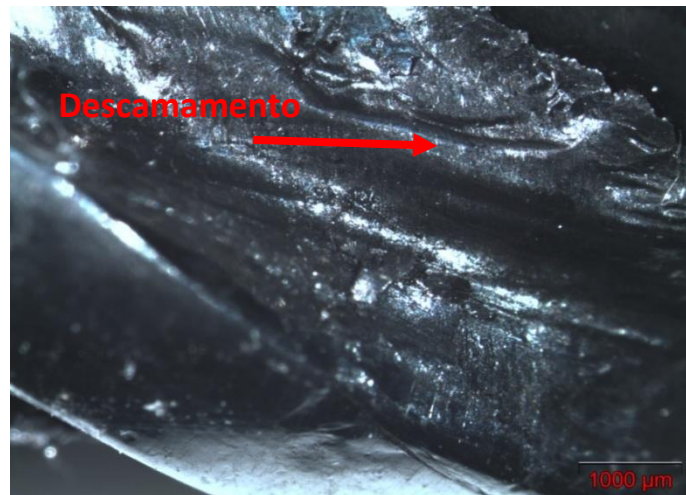


Figura 23: Macrografia do fim do canal da amostra esferoidizada por 8 horas. Além da elevada rugosidade, ocorre descamamento de metal no canto direito superior.

Através desta análise notou-se que o tratamento térmico de esferoidização não teve influência positiva sobre o acabamento superficial após conformação a frio, tendo as amostras conformadas um bom acabamento superficial do canal, assim como esperado por Schaeffer (1995), apenas contribuindo para que houvesse problemas de rugosidade e descamamento em regiões onde a amostra sofreu maior solicitação mecânica.

A Figura 24 mostra uma comparação entre o fechamento do perfil externo conformado da amostra recozida e da amostra esferoidizada por 8 horas.

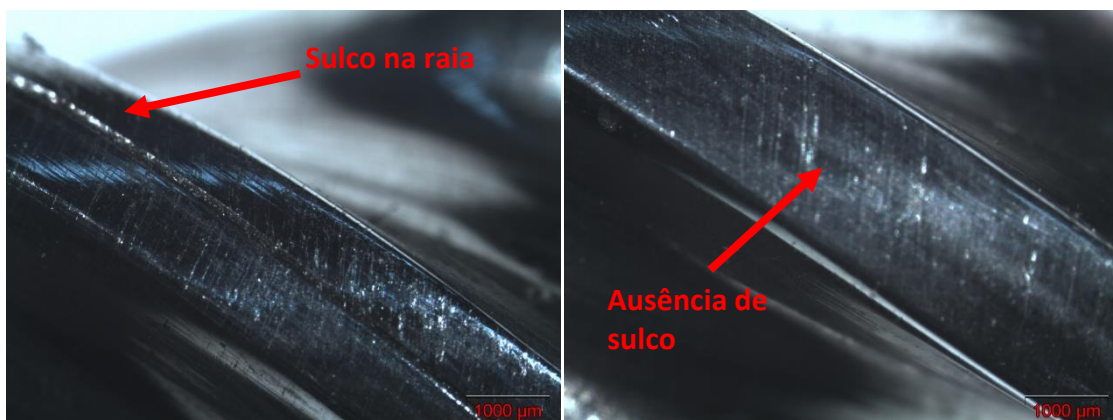


Figura 24: Comparação do fechamento do perfil da raia das amostras recozida (a) e esferoidizada por 8 horas (b).

Como as dimensões iniciais das amostras a serem conformadas e os parâmetros da máquina (pressão, velocidade de avanço, tempo de ciclo e

avanço máximo) permaneceram constantes, nota-se que na amostra recozida – Figura 24(a) não houve o deslocamento necessário de material para o fechamento do perfil da peça, o que pode ser observado pela presença de sulco ao longo da raia da broca. Já na amostra esferoidizada por 8 horas, pode-se observar o fechamento do perfil da peça, conforme ilustrado na Figura 24(b). Segundo Callister (1999), este comportamento pode ser explicado através do aumento da capacidade de deformação do material, pelo alívio das tensões residuais, resultando em pequena quantidade remanescente de discordâncias (defeitos lineares).

O maior alongamento resultante do tratamento de esferoidização confirma o aumento da ductilidade do material indicando, assim, uma maior deformação na conformação mecânica propiciando o preenchimento dos espaços e o fechamento dos perfis resultantes do recartilhado do rolo da laminadora.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios e estudos realizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os tratamentos térmicos de esferoidização tiveram forte influência nas propriedades mecânicas do aço AISI 5140.
- Houve diminuição da dureza dos aços tratados termicamente, mostrando que a estrutura de esferas de carbonetos em matriz ferrítica tornou-se mais dúctil.
- O tratamento térmico de esferoidização por 8 horas não teve maior influência nos limites de resistência e limite de escoamento do aço, quando comparado com a esferoidização por 4 horas.
- O percentual de alongamento teve influência do tempo de tratamento térmico, com aumento médio de 5 pontos percentuais em cada condição de tratamento térmico – de recozido para esferoidizado de 8 horas.
- Devido ao tempo aos quais as amostras foram esferoidizadas, somente as amostras tratadas por 8 horas tiveram a esferoidização dos carbonetos. Enquanto que as amostras tratadas por 4 horas mostraram a decomposição das lamelas de cementita das colônias de perlita.
- No geral, não houve mudança no acabamento superficial entre os três modelos de amostras conformadas, mostrando que o tratamento térmico de esferoidização não tem influência neste parâmetro.
- O tratamento térmico de esferoidização tornou o material pouco resistente, ocorrendo descamamento na superfície das amostras, principalmente na esferoidizada por 8 horas.
- O aço AISI 5140 com tratamentos térmicos de esferoidização e recozimento pleno devido a microestrutura resultante, carbonetos, principalmente de ferro, esferoidizado ou ferrita com colônias de perlita grosseira são mais fáceis de conformar devido à baixa dureza, e maior ductilidade.

- Observa-se que o tratamento térmico de esferoidização de 8 horas, apresentou ótimos resultados quanto ao fechamento do perfil. Assim, os resultados indicam que o defeito que ocorre no final do canal é devido a conicidade da laminadora, pois todas as amostras mostraram o mesmo problema na mesma região.

5.1 Proposições para trabalhos futuros

Através das análises e resultados feitos e obtidos neste trabalho, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar o efeito de outros ciclos térmicos de esferoidização nas propriedades e microestrutura do aço AISI 5140.
- Definir melhor temperatura e tempo de tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões do material conformado.
- Estudar a influência da esferoidização de carbonetos nas propriedades e microestrutura em posterior tratamento térmico de têmpera e revenimento.
- Realizar estudo de vida útil de ferramentas utilizadas no processo de conformação a frio.
- Estudar os efeitos dos tratamentos térmicos de esferoidização sobre o dimensional de um produto conformado.
- Realizar uma análise de impacto da utilização do tratamento térmico de esferoidização nos custos de produção e sua influência no sistema *Lean Manufacturing*.

6. REFERÊNCIAS

ALSARAN, Akgun, KARAKAN, Mehmet, ÇELIK, Ayhan. The investigation of mechanical properties of ion-nitrided AISI 5140 low-alloy steel, *Material Characterization* 48, ELSEVIER, 2002.

ASM HANDBOOK, Forming and Forging, ASM International, v.14, 9ª ed. USA, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 87: Aço Carbono e Ligados para construção mecânica – Designação e composição química, 2000, p. 10.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISSO 6892: Materiais Metálicos – Ensaio de tração a temperatura ambiente, 2002.

BELGO, <https://www.belgo.com.br/produtos/industria/solucoes/acos_construcao_mecanica/pdf/acos_construcao_mecanica.pdf> acessado 19/05/2014.

BUTTON, S. T. Apostila de conformação plástica dos metais. Campinas: Editora Unicamp, 2000.

CALLISTER, WILLIAM D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, LTC. Rio de Janeiro, 2006.

CHANG, S. C. et al. *Journal of Mater. Sci*, v.11, p.623, 1976.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 4ª ed. Associação Brasileira de Metais, 1979.

DEGARMO, E. Paul; Black, J. T.; Kosher, Ronald A. *Materials and Processes in Manufacturing*, 9ª, 2003 p. 387.

DIETER, G., *Metalurgia Mecânica*, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.

FERRAZ H. O Aço Na Construção Civil, *Revista Eletrônica de Ciências*. 22ª ed, 2003.

GARCIA, A; SPIM, J. A., DOS SANTOS, C. A. *Ensaaios dos Materiais*. 2ed. Rio de Janeiro, 2012.

GUY A. G. *Ciência dos Materiais*. São Paulo, 1ª Edição LTC, 1980.

HEAT TREATERS GUIDE: PRACTICE AND PROCEDURES FOR IRONS AND STEELS, ASM International, 1995, pg. 408.

KOWACS W, Russell W. An introduction to ion nitriding, What is it? Why is it used? Proc of an Int Conf on Ion Nitriding, Cleveland, Ohio, USA, September 15–17 1986; 9– 17.

METALS HANDBOOK, Heating Treating: Annealing of Steel, 8 ed., v.4, USA, ASTM Intern., 1994. P. 42-55.

METALS HANDBOOK, Properties and Selection: Irons and Steels, v. 1, ASM M. Park, 1978, p. 153-162.

ROSSI, H. E. COTINHO, C. A. B. Influência das Variáveis de Processamento na Esferoidização do Aço SAE 52100. METALURGIA-ABM, v. 39, n. 310, Set. 1983.

SALTARRIAGA, Pablo, A. C. Estudo dos tempos de tensão gerados por inclusões durante o processo de torneamento em aços ABNT 1045 utilizando o método dos elementos finitos. USP, Tese, 2008.

SAMUELS, L.E., Optical Microscopy of Carbon Steels, American Society for metals, 1980, p. 563-574.

SCHAEFFER, L. Conformação dos Metais: Metalurgia e Mecânica. Ed. Rigol, Porto Alegre, Brasil, 108 p. 1995.

SILVA, André Luiz V. da Costa e, Aços e Ligas Especiais, André Luiz V. da Costa e Silva, Paulo Roberto Mei – São Paulo, Edgard Blucher, 2006.

SOUZA, S.A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Edgard Blucher LTDA, 3ª ed, 1974.

ZHICHAO, Sun, HE, Yang, XINZHE, Ou. Effects of process parameters on microstructural evolution during hot ring rolling of AISI 5140 steel, Computational Materials Science, ELSEVIER, 2010.