

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIOGRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação da Influência do Sentido de Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização
no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente

por

Maurício de Almeida Heberle

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho 2019



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Avaliação da Influência do Sentido de Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização
no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente

por

Maurício de Almeida Heberle

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof^a. Cintia C. Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a colaboração de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar meu sincero agradecimento. Aos meus pais e meus irmãos, por estarem sempre ao meu lado me dando apoio e carinho, amo muito vocês. À minha namorada Daniela, por toda ajuda durante esta caminhada, pelas tardes de domingo estudando ao meu lado, por todo carinho e compreensão, te amo muito amor. À minha orientadora, Prof. Cintia Mazzaferro, pela paciência, dedicação e inúmeros ensinamentos durante a orientação deste trabalho. Obrigado a todos.

HEBERLE, M. de A. **Avaliação da Influência do Sentido de Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente.** 2019. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O estudo do desgaste de materiais metálicos é muito importante na engenharia, pois os custos associados a manutenção de materiais devido ao desgaste precoce são demasiadamente elevados. Um material bastante utilizado em diversas aplicações é o aço SAE 1020, usualmente laminado a quente para a fabricação de chapas metálicas que, dependendo da temperatura final de laminação, pode apresentar em sua microestrutura perlita bandeada. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do sentido de laminação e a forma na qual a perlita está disposta na microestrutura no desgaste do aço 1020. Duas amostras de diferentes peças, uma laminada a quente sem tratamento térmico, com perlita bandeada, e outra laminada a quente normalizada foram cortadas no sentido normal, longitudinal e transversal ao de laminação, totalizando seis corpos de prova, e foram avaliadas através de ensaios de deslizamento linear recíproco. Os resultados mostraram que o aço bandeado no sentido transversal à laminação apresentou o menor volume desgastado, devido à homogeneidade perlítica e pelo menor tamanho de grão neste sentido. Já o aço normalizado, conseqüentemente de maior tamanho de grão e sem bandejamento, obteve desgastes ligeiramente menores que o aço sem tratamento térmico, mostrando que o bandejamento da perlita intensifica o desgaste.

PALAVRAS-CHAVE: Desgaste, SAE 1020, Laminação a quente, Normalização.

HEBERLE, M. de A. **Evaluation of the rolling direction and normalization heat treatment influence on wear of 1020 hot rolled steel.** 2019. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The study of the metallic materials wear is very important in engineering, as the costs associated with the maintenance of materials due to early wear are too high. A widely used material in several applications is SAE 1020 steel, usually hot rolled steel for the manufacture of sheet metal which, depending on the final lamination temperature, can have a banded perlite in its microstructure. In this context, the objective of this work was to evaluate the lamination direction and the way in which the perlite is arranged in the microstructure influence in the 1020 steel wear. Two samples of different pieces, a hot laminate without heat treatment, with banded perlite, and another normalized hot rolled were cut in the normal, longitudinal and transversal to the lamination direction, totaling six specimens, and were evaluated through reciprocal linear sliding tests. The results showed that the banding steel in the cross lamination direction showed the lowest volume due to the perlite homogeneity and smaller grain size in this direction. However, the normalized steel, consequently of larger grain size and without banding, obtained slightly less wear than steel without heat treatment, showing that the perlitic banding intensifies the wear.

KEYWORDS: Wear, SAE 1020, Hot rolling, Normalization.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.2.1.1 – Esquematização do processo de recuperação e recristalização do grão na laminação a quente [adaptado de Hensel e Lehnert, 1973]..... | 2 |
| Figura 3.2.2.1 – Esquematização da deformação resultante nos grãos em aços laminados a frio..... | 3 |
| Figura 3.3.1 – Diagrama FeC com os diversos tratamentos térmicos. [Adaptado de Chiaverini, 2008]..... | 3 |
| Figura 3.3.2– Microestrutura do aço laminado a quente a) antes da normalização, apresentando bandeamento da perlita e b) após a normalização, com o bandeamento revertido [Grange, 1971]..... | 4 |
| Figura 3.4.1.1 – Mecanismos de desgaste por abrasão [Stachowiak e Batchelor, 2000]..... | 4 |
| Figura 3.4.2.1 – Mecanismo de desgaste por adesão [Stachowiak e Batchelor, 2000]..... | 5 |
| Figura 3.5.1 – Possíveis configurações para diferentes situações de desgaste da esfera e da amostra plana (a) apenas a esfera desgasta (b) apenas a amostra desgasta e (c) há desgaste da esfera e da amostra [Glasbey e Perkins, 1997]. | 5 |
| Figura 3.5.2 – Resultado após o teste onde: (a) extremidade desgastada da esfera, mostrando um fundo plano, e (b) trilha de desgaste [Adaptado de Sharma et al., 2013]..... | 6 |
| Figura 5.1.1 – Microestruturas com aumento de 100x das amostras laminado a quente: (a) sem bandas longitudinal (SB-L), (b) sem bandas transversal (SB-T), (c) sem bandas normal (SB-N), (d) com bandas longitudinal (CB-L), (e) com bandas transversal (CB-T), (f) com bandas normal (CB-N). O aço sem bandas foi normalizado. | 8 |
| Figura 5.1.2 – Imagens com a perlita destacada em vermelho no <i>ImageJ</i> com aumento de 50x das amostras laminadas a quente cortadas longitudinalmente (a) sem bandeamento da perlita e (b) com bandeamento. | 9 |
| Figura 5.1.3 – Tamanho de grão médio da ferrita das amostras laminadas a quente sem bandeamento (SB) e com bandeamento (CB), nos diferentes sentidos em relação à laminação. L=longitudinal, T=transversal e N=normal em relação à direção de laminação. | 9 |
| Figura 5.2.1 – Dureza média nas amostras laminadas a quente sem bandeamento (SB) e com bandeamento (CB), nos diferentes sentidos em relação à laminação: L=longitudinal, T=transversal e N=normal. | 10 |
| Figura 5.3.1 – Imagens dos corpos de prova e da esfera após o ensaio de desgaste indicando os locais das medições de desgaste. | 11 |
| Figura 5.3.2 –Imagens com as regiões de desgaste abrasivo e adesivo em destaque, nos aços (a) sem badeamento da perlita e (b) com bandeamento, no sentido normal ao de laminação e aumento de 200x..... | 12 |
| Figura 5.3.3 – Volume médio desgastado no ensaio para as amostras sem bandeamento (SB) e com bandeamento (CB), nos diferentes sentidos em relação à laminação..... | 13 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1.1 – Composição química do aço SAE 1020 [Gentil, 1996], | 2 |
| Tabela 5.3.1 – Coeficientes de atrito medidos no ensaio de desgaste para as amostras laminadas a quente sem bandeamento da perlita (normalizado) e com bandeamento, nos diferentes sentido em relação à laminação..... | 10 |

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 1 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 1 |
| 3.1 Aço SAE 1020 | 1 |
| 3.2 Processo de laminação | 2 |
| 3.2.1. Laminação a quente | 2 |
| 3.2.2 Laminação a frio | 2 |
| 3.3 Normalização..... | 3 |
| 3.4 Mecanismos de desgaste | 4 |
| 3.4.1 Abrasão | 4 |
| 3.4.2 Adesão | 5 |
| 3.5 Equação analítica para cálculo de volume desgastado..... | 5 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 6 |
| 4.1 Caracterização do aço..... | 6 |
| 4.2 Ensaio de microdureza | 7 |
| 4.3 Ensaio de desgaste | 7 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 7 |
| 5.1 Caracterização do aço..... | 7 |
| 5.2 Microdureza..... | 10 |
| 5.3 Desgaste e atrito | 10 |
| 6. CONCLUSÕES | 13 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 14 |
| APÊNDICE A – Esquematização dos ensaios, nomenclaturas e cálculos de w e w' | 16 |
| APÊNDICE B – Imagens dos corpos de prova e das regiões da esfera após ensaio de desgaste com ampliação de 100x..... | 17 |

1. INTRODUÇÃO

Dentre os materiais disponíveis para construção mecânica, o aço SAE 1020 destaca-se por sua boa resistência mecânica, boa trabalhabilidade, e baixo custo de mercado. O aço 1020 é um aço-carbono de composição simples, que possui entre 0,18 a 0,23% de carbono, apresentando-se como um metal importante, sendo utilizado em estruturas fixas e bastante empregado nas indústrias ferroviária, automobilística e naval, bem como na fabricação de chapas, tubos e latas de folhas de flandres, entre outros [Rodrigues, 2014].

A fabricação de perfis metálicos utilizando o aço 1020 é comumente feita através do processo de laminação. A laminação é um processo de conformação mecânica que tem por objetivo modificar a seção transversal de um metal pela passagem de uma barra, lingote, perfil, etc., através de dois ou mais pares de cilindros que giram em sentidos opostos, sendo a distância entre os rolos menor que a espessura do metal a ser laminado. A laminação é classificada de acordo com a temperatura do metal laminado. Se a temperatura do metal estiver acima de sua temperatura de recristalização, o processo é conhecido como laminação a quente. Se a temperatura do metal estiver abaixo de sua temperatura de recristalização, o processo é conhecido como laminação a frio [Degarmo et al., 2003]. Muitas vezes após o processamento do aço, este pode passar por um tratamento térmico de normalização, que altera o tamanho de grão e a morfologia das fases presentes, visando eliminar quaisquer efeitos de altas temperaturas ou tensões-deformações que o material tenha sofrido em sua microestrutura.

Adicionalmente, a forma e o tamanho de grão, bem como o tratamento térmico pelo qual o aço passa, influenciam diretamente nas propriedades do mesmo, inclusive no seu desempenho em resistência ao desgaste, sendo menores tamanhos de grão e normalização meios de aumentar a resistência ao desgaste [Xu, 2013]. Conforme citado por Baptista e Nascimento, 2014, os tipos de desgaste podem ser por erosão, cavitação, adesão, abrasão, impacto ou desgaste corrosivo. O presente trabalho visa avaliar a resistência ao desgaste por deslizamento linear recíproco, que leva à abrasão e adesão, em função da morfologia, tamanho de grão e sentido de laminação do aço SAE 1020.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência do sentido de laminação do aço 1020 no desgaste através de ensaios de deslizamento linear recíproco, quando laminado à quente com e sem tratamento térmico de normalização, conseqüentemente com diferentes tamanhos de grão e morfologia das fases presentes no aço, considerando as diferentes propriedades mecânicas e microestruturais obtidas quando avaliado no sentido longitudinal, normal e transversal à laminação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço SAE 1020

O aço 1020 é um aço comum com teor de carbono entre 0,18 a 0,23%, possuindo manganês e silício em sua composição, além de pequenas quantidades de fósforo e enxofre [Callister, 2002]. Sua composição química nominal está descrita na Tabela 3.1.1.

Tabela 3.1.1 – Composição química do aço SAE 1020 [Gentil, 1996],

| Aço | C% | Mn% | Si% | P (máx.) % | S (máx.) % |
|------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1020 | 0,18 a 0,23 | 0,3 a 0,6 | 0,1 a 0,3 | 0,04 | 0,05 |

Segundo Callister, 2002, o material em estudo é considerado um aço de baixo teor de carbono, tendo as fases ferrita e perlita, apresentando relativamente baixa dureza e resistência mecânica, possuindo boa ductilidade e tenacidade. Suas principais características mecânicas são: boa soldabilidade, alta tenacidade, baixa dureza e ser de ampla aplicação na indústria mecânica em geral, devido seu baixo custo agregado.

3.2 Processos de laminação

3.2.1. Laminação a quente

O processo de laminação a quente é composto por, basicamente, fornos de aquecimento, rolos de desbaste, rolos de acabamento, mesa de saída com resfriamento acelerado e, por fim, um bobinador. Este processo de laminação é denominado a quente pois os aços são produzidos ou acabados em temperaturas acima da temperatura de recristalização do material, diferente do que ocorre na laminação a frio. Não obstante, as diferentes rotas de produção levam a diferenças significativas em ambas as características de tensão-deformação do material e tensões residuais que surgem nas seções transversais finais. Tensões residuais em aços laminados a quente são, geralmente, de baixa magnitude devido ao resfriamento relativamente uniforme associado com a geometria regular e espessura constante [Gardner et al., 2010].

De acordo com Medina, 1996, a evolução da microestrutura durante o processamento depende da composição química, temperatura de laminação final, temperatura de enrolamento, temperatura de reaquecimento, tempo de reaquecimento, taxa de redução total e espessura da bobina. No final do processo a quente, os grãos alongados por deformação sofrem recuperação e recristalização dinâmica, que ocorrem simultaneamente, e a energia acumulada devido aos defeitos criados no aço é a força motriz para estes eventos [Ouchi et al., 1977], representados na Figura 3.2.1.1.

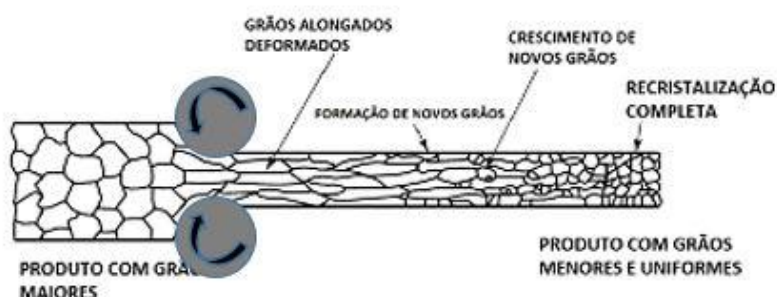


Figura 3.2.1.1 – Esquemática do processo de recuperação e recristalização do grão na laminação a quente [adaptado de Hensel e Lehnert, 1973].

3.2.2 Laminação a frio

O processo de laminação a frio difere da laminação a quente uma vez que este consiste em adicionar algumas etapas após finalizado o processo de bobinamento a quente, sendo o material desbobinado, passado por mais rolos laminadores em temperaturas abaixo da

temperatura de recristalização (ou temperatura ambiente), e por fim bobinado novamente. Estes aços sofrem deformação plástica significativa durante o processo, resultando em maior resistência ao escoamento, porém com ductilidade reduzida. Ainda, de acordo com Gardner et al., 2010, em seções laminadas a frio, a formação de tensões residuais é amplamente associada à deformação plástica não uniforme durante o processo. Ao contrário do que ocorre na laminação a quente, os grãos resultantes do processo de laminação a frio mantêm-se deformados e achatados, uma vez que não sofrem recuperação e recristalização, conforme apresentado na Figura 3.2.2.1.

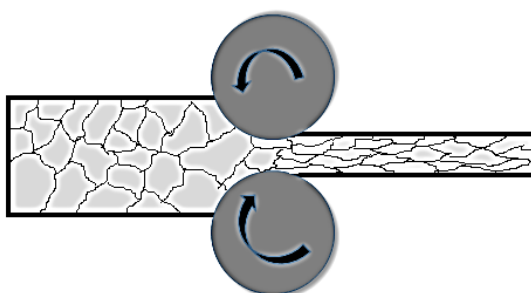


Figura 3.2.2.1 – Esquematização da deformação resultante nos grãos em aços laminados a frio.

3.3 Tratamento térmico de normalização

Dentre os diversos tratamentos térmicos dos aços, um muito utilizado em processos de conformação mecânica, sobretudo quando realizados a frio, é o recozimento. Tratamentos térmicos de normalização são similares aos de recozimento, com a diferença que após a austenitização o material é resfriado ao ar, fora do forno, sendo submetido a uma taxa de resfriamento um pouco maior do que no recozimento, resultando em microestruturas mais refinadas e com melhores propriedades mecânicas. A normalização tem por principal finalidade melhorar a ductilidade e apagar efeitos provenientes de altas temperaturas e esforços mecânicos que o aço tenha sofrido anteriormente.

Segundo Chiaverini, 2008, a temperatura usual de austenitização para o aço SAE 1020 é entre 880°C a 910°C. A Figura 3.3.1 ilustra o diagrama com as temperaturas de trabalho para os tratamentos térmicos de acordo com o teor de carbono. De acordo com os estudos de Grange, 1971, a microestrutura com bandeamento resultante da laminação a quente pode ser revertida com o tratamento térmico de normalização, com um consequente ligeiro aumento de grão, conforme apresentado por ele nas imagens (a) e (b) da Figura 3.3.2.

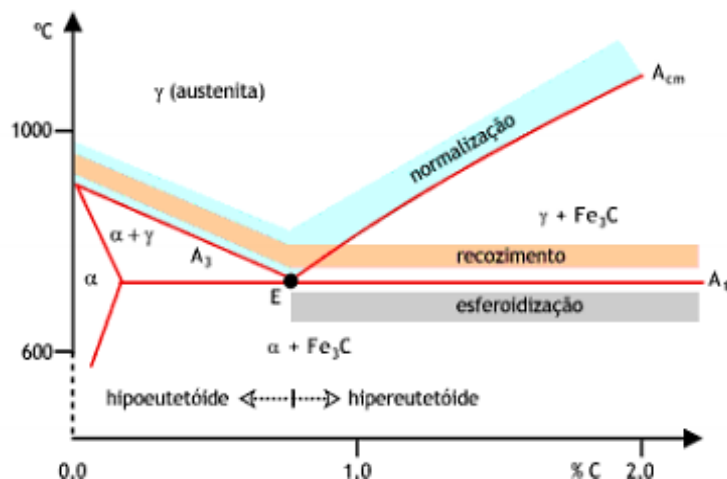


Figura 3.3.1 – Diagrama FeC com os diversos tratamentos térmicos. [Adaptado de Chiaverini, 2008]

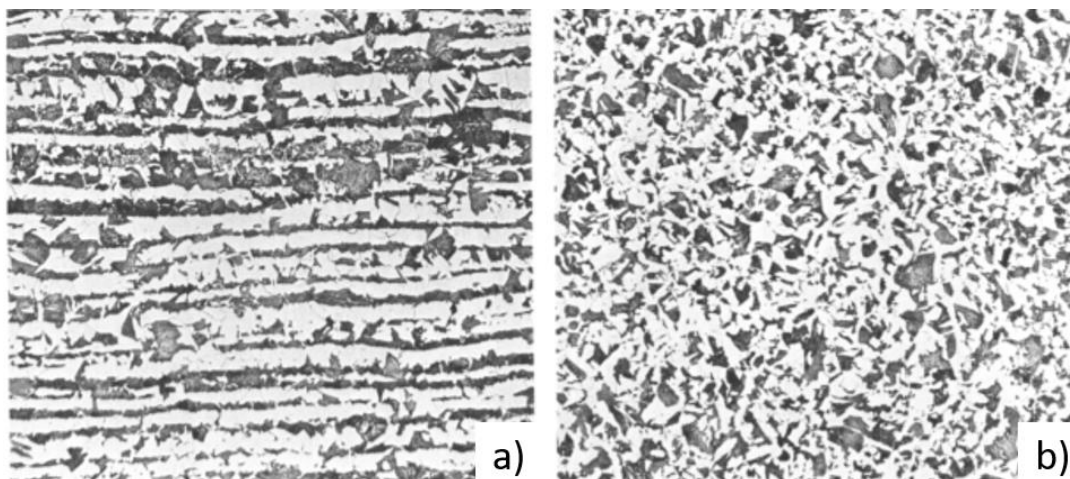


Figura 3.3.2 – Microestrutura do aço laminado a quente a) antes da normalização, apresentando bandejamento da perlita e b) após a normalização, com o bandejamento revertido [Grange, 1971].

3.4 Mecanismos de desgaste

De modo geral, o fenômeno de desgaste pode ser definido como a deterioração, intencional ou não, de um material resultante do uso ou da interação com o meio ambiente ou esforços mecânicos [Coutinho, 1992]. Os principais modos de desgaste estudados são: abrasivo, adesivo, erosivo, corrosivo e por fadiga. Adesão e abrasão são formas de desgaste gerados pelo contato plástico entre materiais. Estes mecanismos de desgaste serão avaliados neste trabalho e são apresentados a seguir.

3.4.1 Abrasão

O desgaste abrasivo pode ser definido como a perda de material devido a passagem de partículas sólidas duras sobre uma superfície de menor dureza. Esta partícula pode ser um fragmento de desgaste endurecido pelo trabalho, sujeira externa ao sistema tribológico ou produto do processo que o material está submetido [Bhushan, 2013]. A Figura 3.4.1.1 mostra os mecanismos de desgaste por abrasão, onde: (a) representa um grão que corta a superfície de um material mais dúctil, (b) ocorre quando o material é frágil, resultando em fratura e trincas, (c) quando um material dúctil é desgastado por deformações sucessivas, resultando em fadiga do metal, e (d) no caso de arrancamento de grãos.

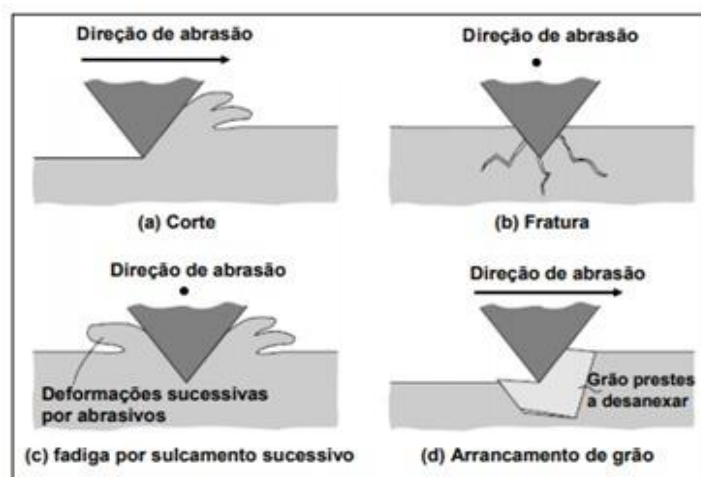


Figura 3.4.1.1 – Mecanismos de desgaste por abrasão [Stachowiak e Batchelor, 2000].

3.4.2 Adesão

O atrito constante entre duas superfícies quaisquer em contato ocasiona a ruptura do material mais fraco nas junções de contato, ocorrendo assim a transferência de material, ficando este aderido no outro. Segundo Zum Gahr, 1987, a adesão está relacionada ao aumento da deformação devido à tensão, à velocidade ou à temperatura, podendo resultar em desgaste por estar associado a um grande aumento do coeficiente de atrito. Na Figura 3.4.2.1 está representado o processo de transferência de um material para outro através do mecanismo de desgaste por adesão.

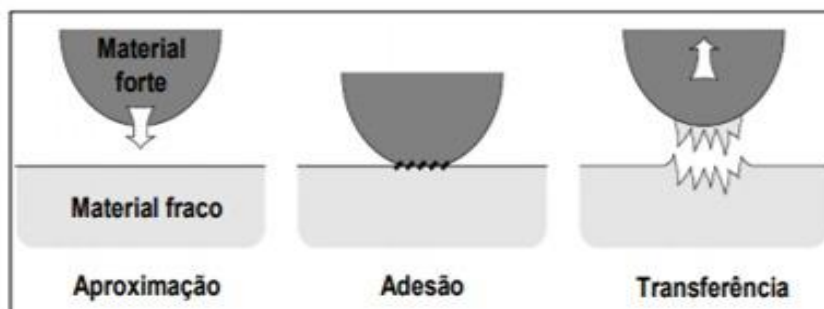


Figura 3.4.2.1 – Mecanismo de desgaste por adesão [Stachowiak e Batchelor, 2000].

3.5 Equação analítica para cálculo de volume desgastado

O volume de material removido é uma das principais informações necessárias para mensurar o desgaste. Existem vários métodos para medir o volume desgastado. O desgaste de deslizamento linear recíproco, envolvendo uma esfera e uma amostra plana é um dos métodos de teste de desgaste de laboratório mais comuns para determinar o comportamento do desgaste dos materiais de engenharia [Sharma et al., 2013]. Três situações diferentes de desgastes são possíveis neste teste, e são apresentadas na Figura 3.5.1.

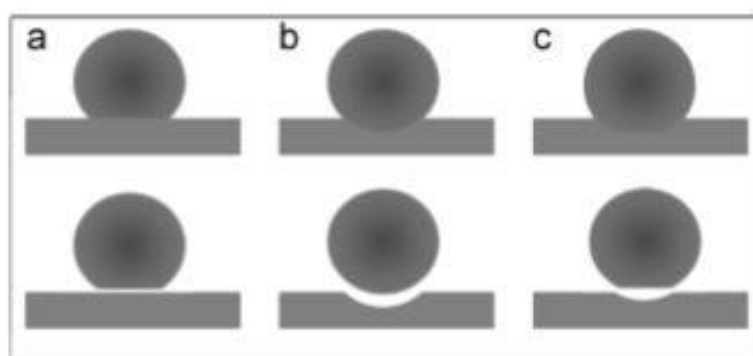


Figura 3.5.1 – Possíveis configurações para diferentes situações de desgaste da esfera e da amostra plana (a) apenas a esfera desgasta (b) apenas a amostra desgasta e (c) há desgaste da esfera e da amostra [Glasbey e Perkins, 1997].

A Figura 3.5.1 (a) mostra a condição em que apenas a esfera se desgasta, o que acontece quando a amostra possui uma resistência ao desgaste maior que a esfera. Na condição (b) o contrário acontece e somente a amostra se desgasta. Já na condição (c) temos a situação mais comum de desgaste, onde este ocorre tanto na esfera quanto na amostra.

No caso em que tanto a esfera quanto a amostra se desgastam pelo fato da esfera ter uma dureza superior à da amostra, porém não suficientemente alta para resistir ao próprio

desgaste, o cálculo do volume desgastado é apresentado na Equação 3.5.1 [Sharma et al., 2013]. De acordo com estudos prévios de Sharma et al., 2013, aplicando a equação 3.5.1, para o mesmo método de ensaio utilizado neste trabalho, utilizando uma carga de 30N com a média de cinco medidas da trilha de desgaste e empregando também o desgaste da esfera na equação, o erro relativo aproximado foi de 2,9% comparado com a análise em perfilômetro 3D. Ou seja, trata-se de um modelo que se obtém resultados precisos e rápidos.

$$V' = L \left[\left\{ r^2 \sin^{-1} \left(\frac{W}{2r} \right) - \frac{W}{2} \left(r^2 - \frac{W^2}{4} \right)^{1/2} \right\} - \left\{ r^2 \sin^{-1} \left(\frac{W'}{2r} \right) - \frac{W'}{2} \left(r^2 - \frac{W'^2}{4} \right)^{1/2} \right\} \right. \\ \left. + \frac{\pi}{3} \left[2r^2 \left\{ \left(r^2 - \frac{W'^2}{4} \right)^{1/2} - \left(r^2 - \frac{W^2}{4} \right)^{1/2} \right\} - \frac{W^2}{4} \left(r^2 - \frac{W^2}{4} \right)^{1/2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{W'^2}{4} \left(r^2 - \frac{W'^2}{4} \right)^{1/2} \right] \right] \quad (3.5.1)$$

Onde L é o comprimento da trilha de desgaste, r é o raio da esfera, W é a largura da trilha de desgaste e W' é o diâmetro desgastado na esfera. Na Figura 3.5.2 é possível ver estes parâmetros em detalhe.

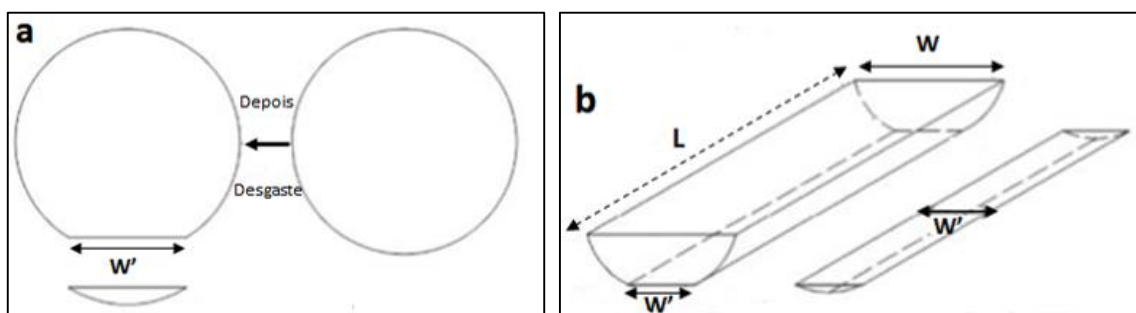


Figura 3.5.2 – Resultado após o teste onde: (a) extremidade desgastada da esfera, mostrando um fundo plano, e (b) trilha de desgaste [Adaptado de Sharma et al., 2013].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização do aço

Duas amostras foram retiradas de duas diferentes peças, uma laminada a quente sem tratamento térmico e outra laminada a quente normalizada. Essas amostras foram cortadas no sentido normal, longitudinal e transversal ao de laminação, totalizando seis corpos de provas. A nomenclatura em códigos dos corpos de prova e o desenho esquemático dos sentidos de corte, estão explícitos no Apêndice A. As amostras foram embutidas, lixadas, polidas com solução de alumina e foram atacadas quimicamente com Nital 10%. Após, foram feitas imagens das microestruturas utilizando um microscópio ótico Zeiss AxioLab A1 com os aumentos de 50, 100 e 200x.

Com a finalidade de se confirmar a classe do aço, utilizando o software de processamento de imagens ImageJ, foram medidas as frações volumétricas de fases na

microestrutura de ambos os corpos de prova. Foram tratadas por contraste imagens das amostras cortadas longitudinalmente ao sentido de laminação com aumento de 50x, uma vez que o software deixa na cor vermelha todo o microconstituente perlita, fornecendo a fração em volume de perlita. Com esse resultado, utilizando a “regra da alavanca” e o diagrama de equilíbrio Fe-C foi possível descobrir a composição estimada de carbono no aço. Para a análise de tamanho de grão foi utilizado a norma ASTM E112-13, através do método do intercepto linear de Heyn, nas imagens com aumento de 200 vezes.

4.2 Ensaio de microdureza

O ensaio de dureza foi realizado utilizando o microdurômetro *Insize*, com a escala Vickers HV 0,3 (carga de 300 g) e um tempo de carga de 10s. Foram feitos cinco medições de dureza para cada sentido de corte ao de laminação de cada amostra, e então realizadas as respectivas médias e desvios padrão.

4.3 Ensaio de desgaste

Para os ensaios de desgaste, foi utilizado o método do deslizamento linear recíproco, conforme a norma ASTM G133-05, em um microtribômetro da marca TTP Indústria Mecânica Ltda., desenvolvido no trabalho de Postal, 2018. Neste ensaio, os corpos de prova foram submetidos ao desgaste através de uma esfera de alumina de 4,76 mm de diâmetro com 1500 HV de dureza. A carga aplicada nas amostras foi de 10 N, durante 2 horas, em um curso de 4 mm, com uma frequência de 1Hz, sem a aplicação de lubrificantes.

Foram executados três ensaios de desgaste para cada sentido de corte ao de laminação de cada amostra. Após cada ensaio foram realizadas as medidas de largura da trilha de desgaste e o diâmetro desgastado na esfera. Estes parâmetros foram medidos utilizando o software de processamento de imagens ImageJ, através das imagens realizadas no microscópio ótico com aumento de 50, 100 e 200 vezes. Além disso, o equipamento também fornece coeficiente de atrito por meio de uma célula de carga presente na estrutura. A esquematização dos ensaios e cálculos de W e W' podem ser visualizados no Apêndice A deste trabalho.

A metodologia de medição de desgaste foi em triplicata através da média de 5 retas transversais ao sentido do desgaste do corpo de prova, e da média de 3 retas longitudinais na esfera de alumina. Todas as medições foram introduzidas na Equação 3.5.1, que resulta no volume desgastado, e então calculou-se as respectivas médias e desvios padrão. Trata-se de um método simples para quantificar o desgaste, já que não leva em consideração profundidade, e só envolve a medição de imagens obtidas a partir de microscópio ótico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do aço

Na Figura 5.1.1 é possível ver a microestrutura das duas amostras de aço laminados a quente, sendo o normalizado à esquerda, nos diferentes sentidos de corte, com o aumento de 100x. Através da análise das imagens, pode-se dizer que nos seis corpos de prova, as microestruturas apresentam as fases perlita e ferrita, sendo que o laminado a quente não normalizado, à direita, possui grãos de perlita na forma de bandas e os grãos de ferrita de menor tamanho em relação à amostra com o tratamento térmico. Também, é possível observar

que ambas as amostras possuem os grãos de ferrita equiaxiais resultantes da laminação a quente devido a recristalização dos grãos.

Na imagem (e) da Figura 5.1.1 onde temos o aço sem o tratamento térmico de normalização no sentido transversal ao de laminação, podemos notar que a perlita está mais homogênea e não em formas de bandas como na imagem (d). Já na imagem (f) onde o corte é normal ao sentido de laminação, podemos verificar uma microestrutura também com a perlita bandeada, porém em colônias. Tanto na imagem (a), (b) e (c) da Figura 5.1.1 é possível ver que a microestrutura é mais homogênea, resultado do tratamento térmico de normalização que este aço sofreu.

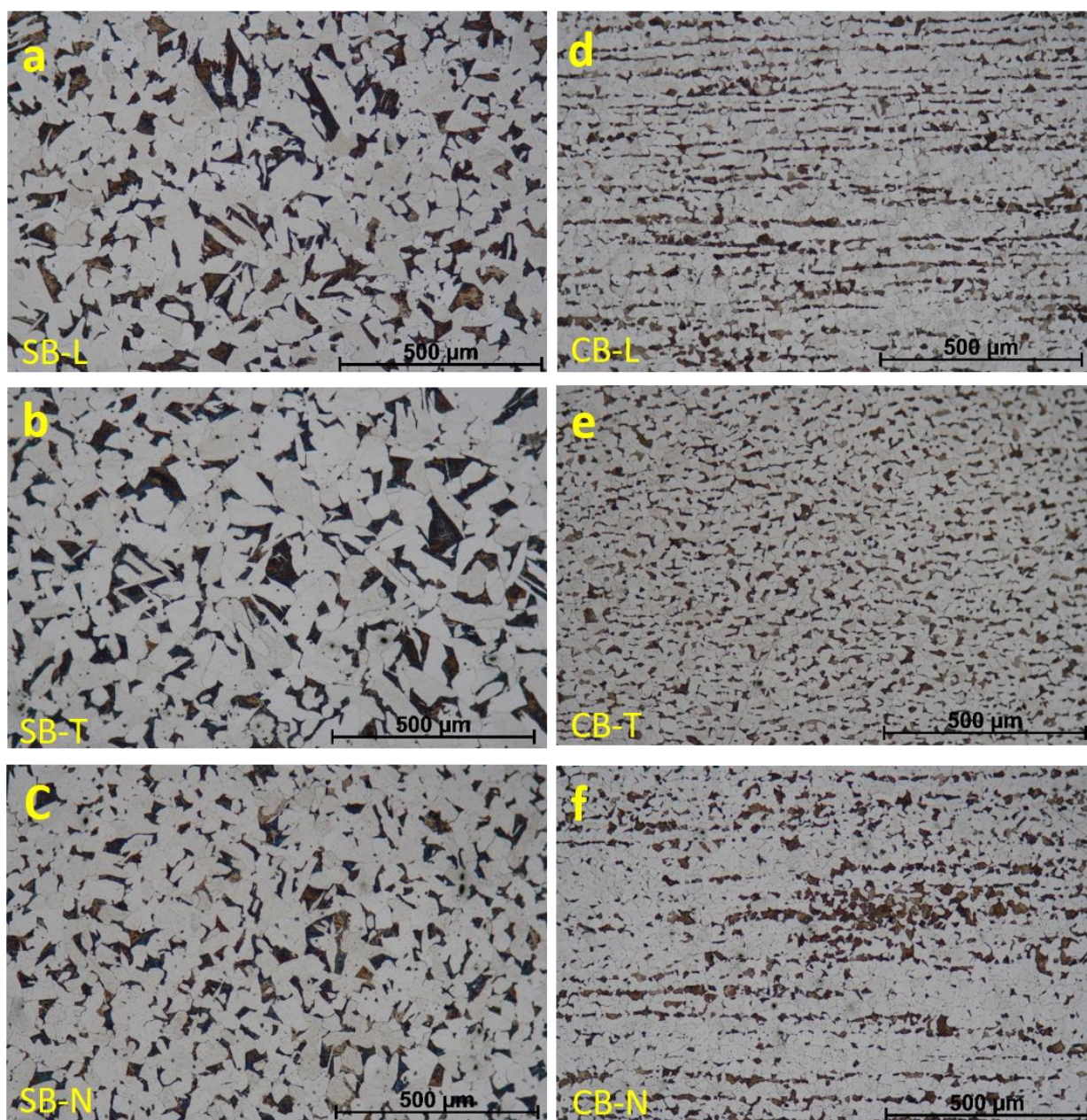


Figura 5.1.1 – Microestruturas com aumento de 100x das amostras laminado a quente: (a) sem bandas longitudinal (SB-L), (b) sem bandas transversal (SB-T), (c) sem bandas normal (SB-N), (d) com bandas longitudinal (CB-L), (e) com bandas transversal (CB-T), (f) com bandas normal (CB-N). O aço sem bandas foi normalizado.

Pela análise do software *ImageJ*, obteve-se um resultado de 22,9% de volume de perlita (fase escura) no aço normalizado e 22,6% de perlita no aço não normalizado, o que corresponde a 0,194% e 0,192% de carbono, respectivamente, pela “regra da alavanca” utilizando o diagrama Fe-C. As imagens analisadas pelo software *ImageJ* para o cálculo do percentual de perlita pode ser visualizada na Figura 5.1.2, onde (a) é da amostra sem bandeamento da perlita e (b) da amostra com bandeamento.

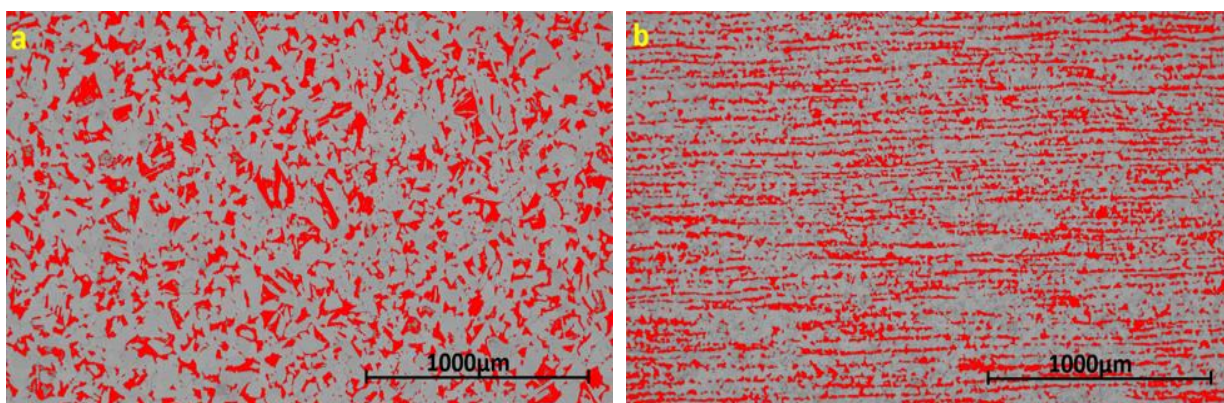


Figura 5.1.2 – Imagens com a perlita destacada em vermelho no *ImageJ* com aumento de 50x das amostras laminadas a quente cortadas longitudinalmente (a) sem bandeamento da perlita e (b) com bandeamento.

Ainda com o uso do software *ImageJ* e através do método do intercepto linear de Heyn descrito na norma ASTM E112, foi calculado o tamanho de grão médio da ferrita para as amostras laminadas a quente com e sem tratamento térmico, nos sentidos longitudinal, transversal e normal em relação ao sentido de processamento. De acordo com esta análise, pode-se confirmar que a amostra não normalizada (com bandeamento da perlita), possui o tamanho de grão de ferrita menor que o aço normalizado. Pode-se observar também que no sentido longitudinal à laminação o tamanho de grão calculado foi maior do que nos demais, e isso deve-se principalmente ao processo de laminação estirar os grãos no sentido dos rolos. Os tamanhos de grãos médios da ferrita medidos são apresentados na Figura 5.1.3.

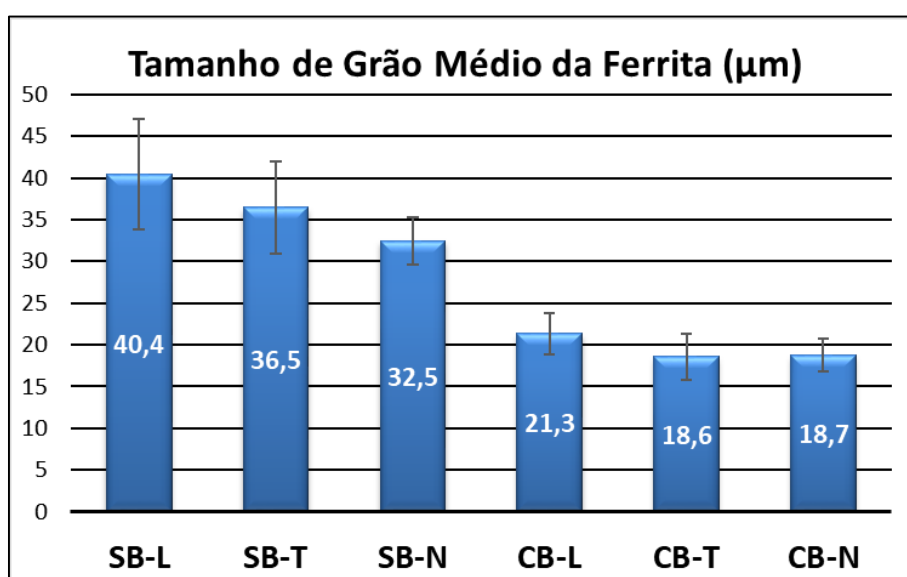


Figura 5.1.3 – Tamanho de grão médio da ferrita das amostras laminadas a quente sem bandeamento (SB) e com bandeamento (CB), nos diferentes sentidos em relação à laminação. L=longitudinal, T=transversal e N=normal em relação à direção de laminação.

5.2 Microdureza

Observando o gráfico da Figura 5.2.1, onde estão apresentadas a microdureza média e respectivos desvios, pode-se verificar que os resultados foram muito similares o que juntamente com os teores de carbono calculados no item 5.1, indicam que ambos aços podem ser classificados como SAE1020. Esse espectro de medições deve ser analisado com cuidado, uma vez que por se tratar de microdureza, pode-se acabar medindo regiões específicas de perlita ou ferrita, ou seja, de maior ou menor dureza, o que acaba refletindo em valores de desvios elevados, principalmente nas orientações normal à laminação em ambos os aços. Adicionalmente, os resultados de dureza mostram maior heterogeneidade entre as orientações longitudinal (L) x transversal (T) x normal (N) no aço com bandejamento do que no aço sem bandejamento (normalizado).

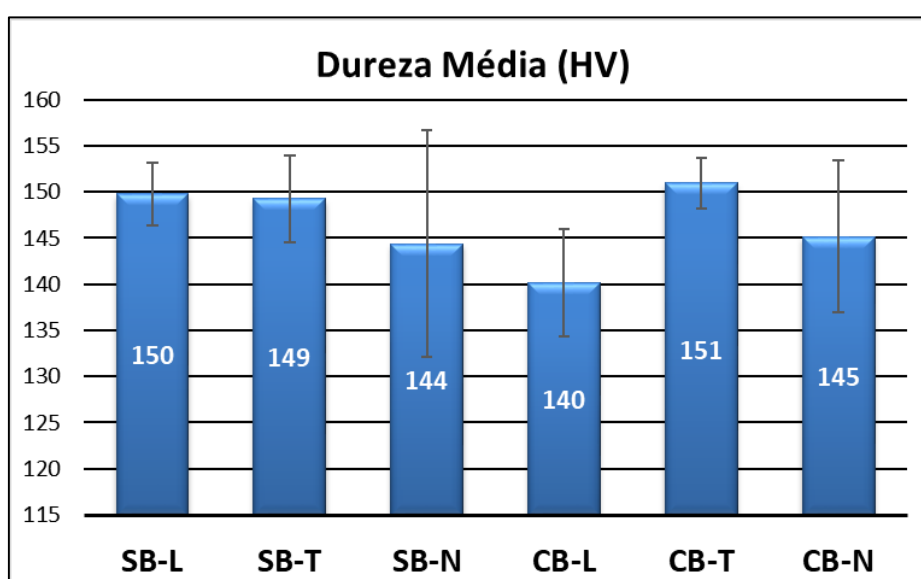


Figura 5.2.1 – Dureza média nas amostras laminadas a quente sem bandejamento (SB) e com bandejamento (CB), nos diferentes sentidos em relação à laminação: L=longitudinal, T=transversal e N=normal.

5.3 Desgaste e atrito

Dos ensaios de desgaste no microtribômetro com esfera de alumina foram obtidos os seguintes resultados de coeficiente de atrito apresentados na Tabela 5.3.1.

Tabela 5.3.1 – Coeficientes de atrito medidos no ensaio de desgaste para as amostras laminadas a quente sem bandejamento da perlita (normalizado) e com bandejamento, nos diferentes sentido em relação à laminação.

| Coeficiente de atrito | SB-L | SB-T | SB-N | CB-L | CB-T | CB-N |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Média | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,40 |
| Desvio Padrão | 0,004 | 0,007 | 0,003 | 0,002 | 0,007 | 0,002 |

Analisando esses valores, podemos observar que os coeficiente de atrito são levemente maiores para o aço sem badeamento. É importante ressaltar que, usualmente, um coeficiente de atrito mais elevado indica maior deformação plástica envolvida no processo de desgaste

uma vez que a área de contato entre a esfera e a amostra plana é maior. Dependendo da afinidade química entre esfera e material testado, e também das condições de ensaio, o maior valor do coeficiente de atrito também pode indicar maior adesão.

Exemplos de amostras após os ensaios de desgaste, com as respectivas regiões de medição para fazer o cálculo do volume desgastado, podem ser vistas na Figura 5.3.1, onde (a) mostra o corpo de prova, CB-L, 1º ensaio, com aumento de 50x, após o ensaio de desgaste com as regiões onde foram realizadas as medições, e (b) a região da esfera desgastada após o ensaio de desgaste de (a). A imagem (c) é o corpo de prova, SB-L, 2º ensaio, com aumento de 50x após o ensaio de desgaste, e (d) é a região da esfera desgastada onde foi realizado o ensaio de desgaste de (c). Também é possível ver nas imagens (b) e (d) alguns debris (fragmentos gerados no processo de desgaste) na esfera.

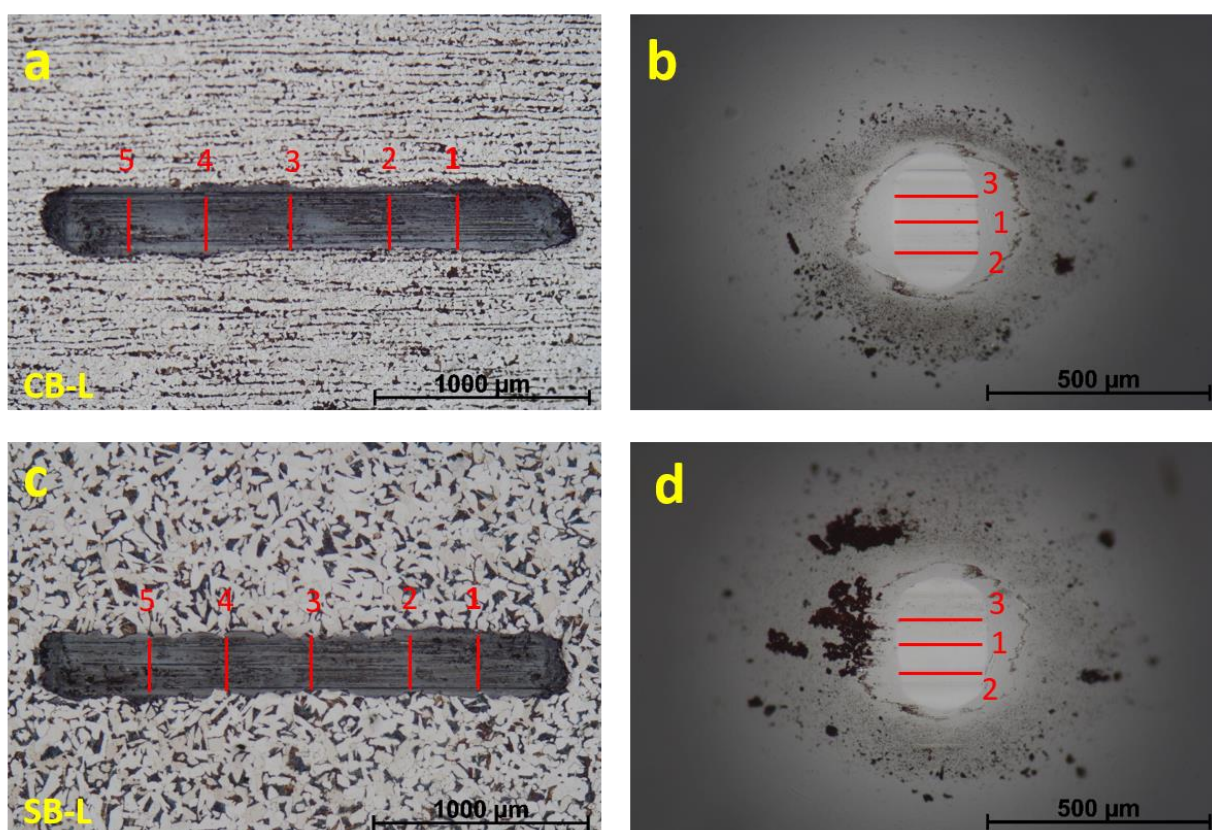


Figura 5.3.1 – Imagens dos corpos de prova e da esfera após o ensaio de desgaste indicando os locais das medições de desgaste.

Em todas as trilhas de todas as condições foi possível visualizar sulcos paralelos, evidenciando desgaste por abrasão, e áreas escuras correspondentes a material arrancado da trilha, apontando para desgaste adesivo. As imagens mostrando esta análise estão expostas no Apêndice B deste trabalho. A Figura 5.3.2 exemplifica regiões de desgaste por abrasão e adesão, onde em (a) tem maior volume de material arrancado (adesão) e maiores quantidades de sulcos (abrasão) em comparação com (b), no aço com perlita bandeada.

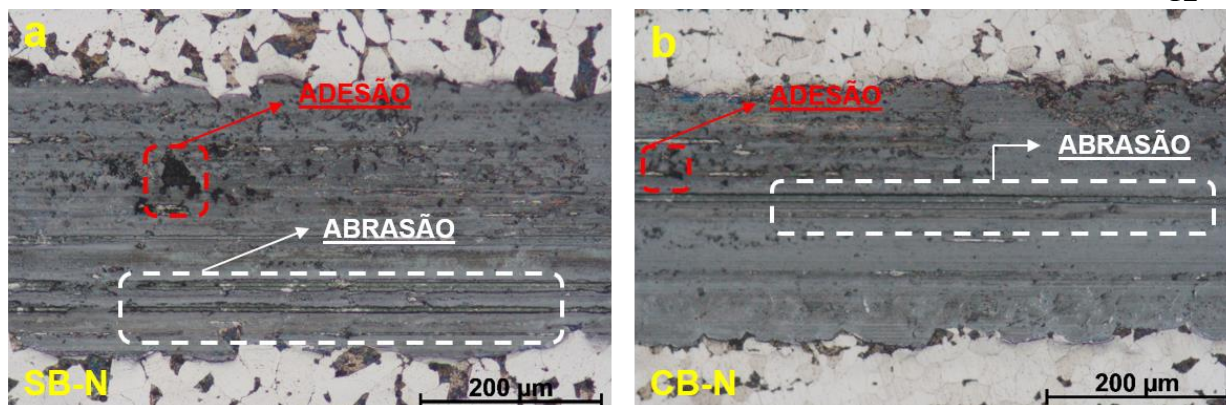


Figura 5.3.2 – Imagens com as regiões de desgaste abrasivo e adesivo em destaque, nos aços (a) sem bandejamento da perlita e (b) com bandejamento, no sentido normal ao de laminação e aumento de 200x.

Observando o Apêndice B, onde temos as imagens dos corpos de provas após o ensaio de desgaste nos sentidos longitudinal, transversal e normal ao de laminação, também é possível inferir, que qualitativamente, ou seja, por análise visual das trilhas, o aço que não possui bandejamento da perlita teve maiores áreas de material arrancado, ou seja, a adesão aparentou ser maior do que no aço bandejado. E isso pode ser relacionado aos maiores tamanhos de grãos de ferrita, que é uma fase com baixa dureza e alta deformação plástica. Este resultado vai de encontro com os valores de atrito mostrados na tabela 5.3.1 onde indica maiores deformações plásticas para o aço sem bandejamento que apresenta um coeficiente de atrito ligeiramente maior.

Os volumes médios de desgaste calculados estão apresentados na Figura 5.3.3, tanto para a amostra laminada a quente normalizada (sem bandejamento da perlita) quanto para a amostra não normalizada (com bandejamento), nos diferentes sentidos em relação à laminação. Através dessa análise pode-se afirmar que o maior desgaste ocorreu no sentido normal à laminação em ambos os aços, e isso deve-se no aço não normalizado, principalmente, pela maior facilidade no arrancamento dos grãos quando eles estão bandeados. O mesmo ocorreu com o sentido longitudinal à laminação no aço com bandejamento da perlita, onde o volume desgastado também foi maior quando comparado ao aço normalizado.

O menor desgaste ocorreu no sentido transversal do aço com bandejamento da perlita, uma vez que menor tamanho de grão e maior área de contorno apresentam-se como barreiras ao desgaste. Outro fato é que, neste sentido transversal ao bandejamento da perlita, esta estava distribuída de forma mais homogênea na microestrutura, colaborando para o fato de que o desgaste é mais acentuado quando ocorre no sentido do bandejamento perlítico.

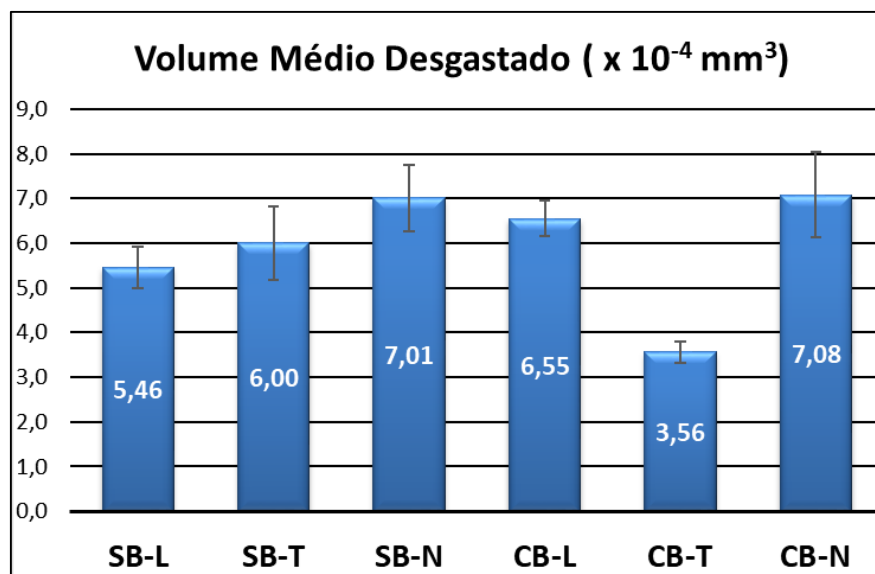


Figura 5.3.3 – Volume médio desgastado no ensaio para as amostras sem bandeamento (SB) e com bandeamento (CB), nos diferentes sentidos em relação à laminação.

6. CONCLUSÕES

Através do presente trabalho, onde avaliou-se a influência do sentido de laminação do aço 1020 quando laminado à quente com e sem tratamento térmico de normalização no desgaste, através de ensaios de deslizamento linear recíproco, por meio de uma esfera de alumina e uma carga de 10N, é possível afirmar que:

- No aço bandeado (sem tratamento térmico de normalização), tanto no sentido longitudinal quanto normal ao de laminação houve um desgaste mais acentuado em comparação ao transversal pelo motivo do desgaste ser na mesma direção do bandeamento da perlita. No corpo de prova com bandeamento, sentido transversal ao de laminação, foi o que houve o menor volume desgastado, pois, o mesmo além de possuir o menor tamanho de grão da ferrita dos 6 corpos de prova e ter maior microdureza média, também possuía a perlita homogênea na microestrutura, sem bandeamento. Isso mostra que tanto o efeito do sentido de laminação, quanto da morfologia da fase influenciaram no desgaste.
- É possível perceber também que após o aço passar pelo tratamento térmico de normalização e ficar com a microestrutura mais homogênea e com o tamanho de grão maior, analisando o volume desgastado e seus desvios, pode-se perceber que o sentido de laminação teve pouca influência no desgaste do aço normalizado, porém percebe-se que os grãos de ferrita e de perlita estarem homogêneos compensou o maior tamanho de grão comparado ao aço não normalizado em relação ao desgaste.

Podemos afirmar com este estudo que, para aplicações do aço SAE 1020 laminado a quente, onde o mesmo será submetido a desgastes transversal ao sentido de laminação, é interessante que o aço não passe pelo tratamento térmico de normalização. Contudo, se o sentido do desgaste for desconhecido, é importante que o aço passe pelo tratamento térmico de normalização a fim de deixar as propriedades o mais homogêneas possíveis, retirando a influência do sentido da laminação no desgaste do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E112-13 – **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**, 2013.

ASTM G133-05 – **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**, 2016.

Baptista A.L.B.; Nascimento I.A., "Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas". Spectru Instrumental Científico Ltda, p. 4-8, 2014.

Bhushan, B., "**Introduction to Tribology Handbook**". CRC Press, LLC. 2nd ed., Ohio, 2013.

Callister, W., "**Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**". 5^a ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.

Centro de Informação Metal Mecânica – CIMM, "**As consequências da conformação a frio**". https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7748-as-consequencias-da-conformacao-a-frio. Acessado em 20/04/2019.

Chiaverini, V., "**Tratamento térmico das ligas metálicas**". 2^a ed., p. 61-64, São Paulo, ABM, 2008.

Coutinho, C. B., "**Materiais metálicos para engenharia**". Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia, UFMG, p. 183, 1992.

Degarmo, E. Paul; Black, J. T.; Kohser, Ronald A., "**Materials and Processes in Manufacturing**", 9^a ed., Wiley, 2003.

Gardner, L.; Saari, N.; Wang, F., "**Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections**". *Thin-Walled Struct.* n.º.48 (7), p. 495-507, 2010.

Gentil, V., "**Corrosão**", 3^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

Glasbey, C. A.; Perkins, M. G., "**Recovery of depth information from optical microscope images by constrained deconvolution**". *Scandinavian Image analysis Conference 97*, p. 79-86, 1997.

Grange, R. A., "**Effect of Microstructural Banding in Steel**". *Metallurgical Transactions*, vol. 2, p. 417-426, 1971.

Hensel, A.; Lehnert, L., "**Neue hütte 18**". N. 11, p. 654-662, 1973.

Medina, S. F., "**Microstructural Modeling for Low Alloy and Micro alloyed Steels**". 2nd *International Conference on Modeling of Metal Rolling Process*, p. 501-510, 1996.

Ouchi, C.; Sanpei, T.; Okita, T.; Kozasu, I., "**Microstructural Change of Austenite During Hot Rolling and Their Effect on Transformation Kinetics**". AIME, p. 316-340, 1977.

Postal, G. T., "**Projeto e fabricação de microtribômetro para análise de juntas soldadas**". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica UFRGS, Porto Alegre, 2018.

Rodrigues, L. M.; Santos, C. H. R.dos; Veloso, R. R.; Lemos, M. V.; Santos, C. dos; Cabral, R. de F., “**Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060**”. Cadernos UniFOA, p. 39-44, 2014.

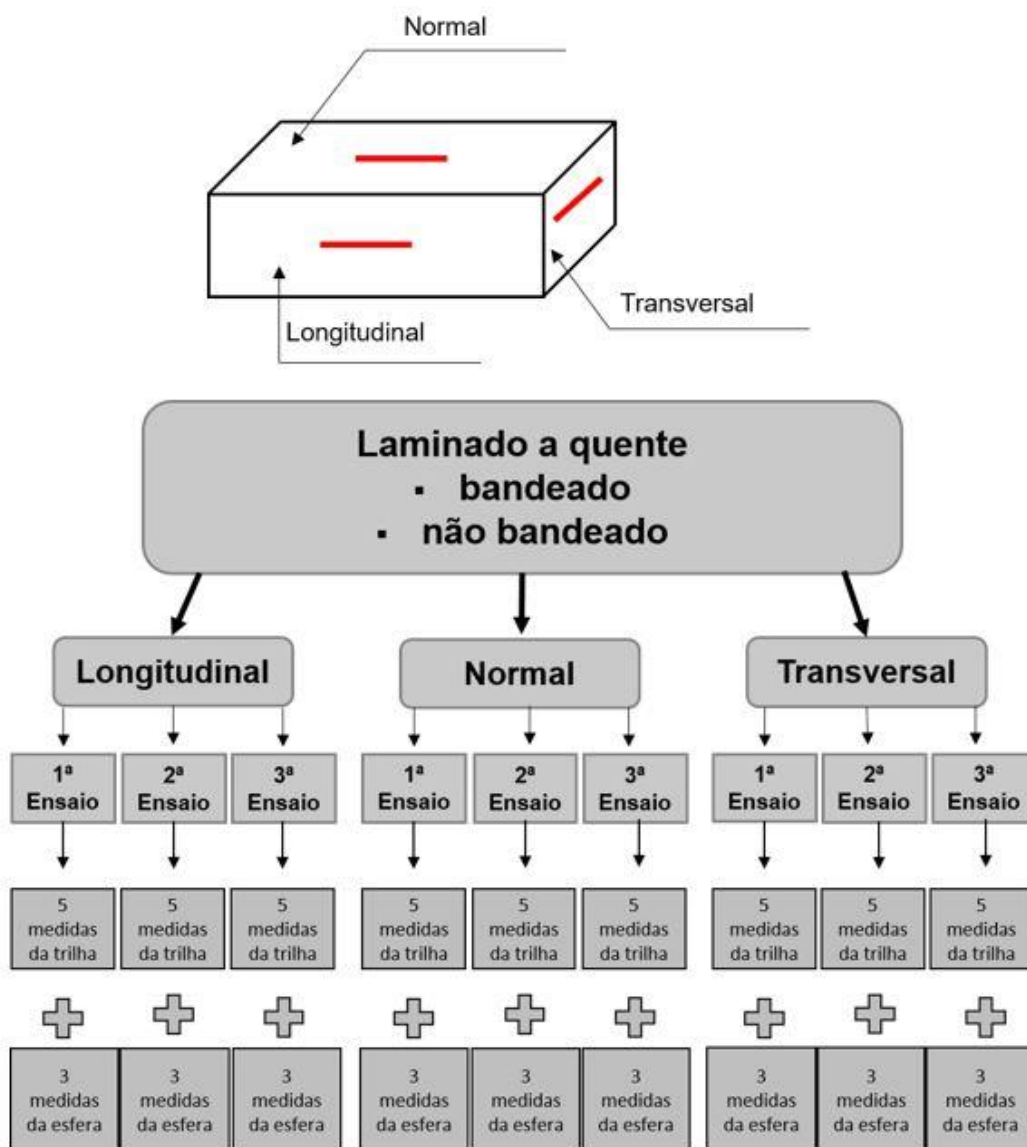
Sharma, S.; Sangal, S.; Mondal, K., “**On the optical microscopic method for the determination of ball-on-flat surface linearly reciprocating sliding wear volume**”. *Wear*, n° 300, p. 82-89. Elsevier, 2013.

Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W., “**Engineering Tribology**”. 2° ed. Butterworth-Heinemann, Australia, 2000.

Xu, X.; Xu, W.; Ederveen, F. H.; van der Zwaag, S., “**Design of low hardness abrasion resistant steels**”. *Wear*, n° 301, p. 89-93. Elsevier, 2013.

Zum Gahr, K. H., “**Microstructure and wear of materials**”. Elsevier, Amsterdam, 1987.

APÊNDICE A – Esquematização dos ensaios, nomenclaturas e cálculos de W e W'



| ENSAIOS | | Não Bandeado | | | Bandeado | | |
|-----------|---------------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|----------|
| | | Longitudinal | Transversal | Normal | Longitudinal | Transversal | Normal |
| W (200x) | Média_Trilha | 2,48E-04 | 2,52E-04 | 2,54E-04 | 2,50E-04 | 2,21E-04 | 2,42E-04 |
| | Desvio_Trilha | 8,00E-06 | 9,28E-06 | 5,62E-06 | 6,89E-06 | 2,01E-06 | 6,66E-06 |
| W' (100x) | Média_Esfera | 1,99E-04 | 1,97E-04 | 1,91E-04 | 1,91E-04 | 1,89E-04 | 1,78E-04 |
| | Desvio_Esfera | 5,44E-06 | 5,14E-06 | 1,19E-06 | 3,31E-06 | 2,19E-07 | 1,98E-06 |

| | |
|------|--|
| SB-L | Sem bandeamento da perlita - sentido de corte longitudinal ao de laminação |
| SB-T | Sem bandeamento da perlita - sentido de corte transversal ao de laminação |
| SB-N | Sem bandeamento da perlita - sentido de corte normal ao de laminação |
| CB-L | Com bandeamento da perlita - sentido de corte longitudinal ao de laminação |
| CB-T | Com bandeamento da perlita - sentido de corte transversal ao de laminação |
| CB-N | Com bandeamento da perlita - sentido de corte normal ao de laminação |

APÊNDICE B – Imagens dos corpos de prova e das regiões da esfera após ensaio de desgaste com ampliação de 100x.

