

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CAIO SOARES DO AMARAL

**ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO NO
DESGASTE DO AÇO DE GRÃO ORIENTADO (GO)**

BELO HORIZONTE

2016

CAIO SOARES DO AMARAL

**ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO NO
DESGASTE DO AÇO DE GRÃO ORIENTADO (GO)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2016

CAIO SOARES DO AMARAL

**ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO NO
DESGASTE DO AÇO DE GRÃO ORIENTADO (GO)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

07/06/2016

BANCA EXAMINADORA:

Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Marcello Rosa Dumont

João Bosco dos Santos

Wellington Lopes

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos, colegas e professores do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG.

“Thus, the task is not so much to see what no one yet has seen, but to think what nobody yet has thought about that which everybody sees.” (A. Schopenhauer)

RESUMO

Os aços siliciosos ou elétricos são ligas metálicas compostas por ferro-silício que têm como uma das características básicas o tamanho de grão elevado e uma textura cristalográfica específica e definida. Devido a essa textura e ao tamanho de grão característico, esse aço apresenta comumente um tipo de imperfeição quando deformado plasticamente denominado casca de laranja, que ocasiona intensa rugosidade na superfície do material. Considerando isso, este trabalho apresenta o estudo da influência do processamento mecânico no desgaste microabrasivo do aço de grão orientado, aço GO, submetido aos ensaios mecânicos de cisalhamento (direto e direto e reverso) e tração, com e sem a realização de tratamento térmico (650 °C por 15 minutos e subsequente resfriamento em água). A presença da casca de laranja e a variação da rugosidade superficial em função dessa imperfeição foi avaliada a partir do ensaio de desgaste microabrasivo (*Calowear*) para quantificar e analisar os efeitos dos ensaios mecânicos na taxa de desgaste das amostras. Os resultados indicaram que não foi perceptível nenhuma alteração na microestrutura e na microdureza superficial após o material ser submetido ao tratamento térmico e de modo adicional, verificou-se ainda que a casca de laranja se formou de modo mais destacado (maior rugosidade) após a realização do ensaio de cisalhamento. Por fim, notou-se que a formação da casca de laranja dificulta a identificação da taxa de desgaste devido às irregularidades que esse tipo de imperfeição provoca na superfície da chapa.

Palavras-chave: Aço GO, cisalhamento e ensaio microabrasivo.

ABSTRACT

The siliceous or electrical steels are Iron-silicon based alloys which have the basic characteristics of the large grain size and a specific and defined crystallographic texture. Due to this characteristic texture and grain size, the steel is commonly presents a kind of imperfection, when plastically deformed, called orange peel, which causes intense roughening of the surface of the material. Considering this, this paper presents the study of the influence of mechanical processing in microabrasive wear of the grain-oriented steel, GO steel, subjected to mechanical tests of shear (direct and direct and reverse) and traction, with and without conducting heat treatment (650°C for 15 minutes and subsequent water cooling). The presence of orange peel and the variation of surface roughness, due to this imperfection, was evaluated from microabrasive wear test (*Calowear*) to quantify and analyze the effects of mechanical tests on the samples wear rate. The results indicated that no change in the microstructure and microhardness was noticeable after the material was subjected to heat treatment and furthermore, it was observed that the orange peel formed more prominently (higher roughness) after the shear test. Lastly, it was noted that the formation of orange peel hinders the identification of the wear rate due to imperfections that it causes in the surface of the plate.

Keywords: GO steel, shear and microabrasive test.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVO.....	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivo específico	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Aços siliciosos ou elétricos	13
3.2	Desgaste dos materiais	14
3.3	Defeitos superficiais em chapas	24
3.4	Processamento mecânico <i>versus</i> propriedades dos aços elétricos	30
4	METODOLOGIA	37
4.1	Preparação dos corpos de prova.....	37
4.2	Tratamento térmico	38
4.3	Caracterização microestrutural	39
4.4	Caracterização mecânica.....	39
4.5	Processamento mecânico	40
4.6	Ensaio de desgaste microabrasivo	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Caracterização.....	47
5.2	Condição de carregamento: Cisalhamento direto	51
5.3	Condição de carregamento: Cisalhamento direto e reverso.....	53
5.4	Condição de carregamento: Tração	56
5.5	Ensaio de desgaste	57
6	CONCLUSÃO.....	67
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste	18
Figura 2 - Contato e transferência de partículas no desgaste adesivo	19
Figura 3 - Desgaste abrasivo de dois corpos (Adaptado)	20
Figura 4 - Desgaste abrasivo de três corpos (Adaptado)	20
Figura 5 - Desgaste por fadiga - Pitting	22
Figura 6 - Desgaste por fadiga - Spalling	22
Figura 7 - Desgaste por fadiga - Fretting	23
Figura 8 - Desgaste corrosivo	23
Figura 9 - Vazios	25
Figura 10 - Trincas em uma chapa	26
Figura 11 - Casca de Laranja	26
Figura 12 - Carepa incrustada	27
Figura 13 - Laminado ondulado	27
Figura 14 - Representação do Banding e fotos do cilindro	28
Figura 15 - Representação do Peeling e fotos do cilindro	28
Figura 16 - Representação das marcas de vibração e seus efeitos no produto laminado	29
Figura 17 - Representação do desalinhamento dos cilindros	29
Figura 18 - Efeito da deformação plástica nas perdas histeréticas de aços 2% Si	31
Figura 19 - Perdas histeréticas de Alta e Baixa Indução em relação a direção de laminação (DL)	32
Figura 20 - Efeito do tamanho de grão nas perdas magnéticas totais (P total), perdas histeréticas (P hist), perdas clássicas (P paras) e perdas de excesso (P exc) de um aço com 2% Si ...	32
Figura 21 - Instrumento de cisalhamento simples	33
Figura 22 - Geometria de uma amostra de cisalhamento. O volume deformado é delimitado pelas indentações resultados das laterais das garras	34
Figura 23 - Orientação de uma amostra para um experimento a α graus dos eixos de referência X e Y	35
Figura 24 - Representação esquemática do comportamento uniaxial tensão-deformação de muitos materiais durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger	36
Figura 25 - Guilhotina PECK, STOW & WILCOX CO	37
Figura 26 - Forno MAGNU's	38

Figura 27 - Amostra embutida.....	39
Figura 28 - Microdurômetro Vickers - Shimadzu HMV	40
Figura 29 - Dispositivo (garra) do ensaio de cisalhamento	41
Figura 30 - Montagem do experimento	43
Figura 31 – Solução de SiC 0,75g/cm ³ no agitador magnético	44
Figura 32 – Microscópio óptico para captura de imagens.....	45
Figura 33 - Relação entre X e Y no cálculo da espessura da camada de óxido	46
Figura 34 - Curva tensão-deformação efetiva - Caracterização do Aço GO como recebido ...	48
Figura 35 - Curva tensão-deformação efetiva - Caracterização do Aço GO tratado termicamente	48
Figura 36 – Aspecto superficial dos corpos de prova após o cisalhamento direto, a) tratado termicamente e b) como recebido	49
Figura 37 - Aço GO como recebido - Atacado com Nital 5% por 6 minutos	50
Figura 38 - Aço GO Tratado Termicamente - Atacado com Nital 5% por 5 minutos	50
Figura 39 – Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO como recebido	51
Figura 40 – Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO tratado termicamente	52
Figura 41 – Aspecto superficial dos corpos de prova a) como recebido e b) tratado termicamente após o ensaio de cisalhamento direto	53
Figura 42 - Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO como recebido	54
Figura 43 - Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO tratado termicamente.....	54
Figura 44 – Aspecto superficial dos corpos de prova a) como recebido e b) tratado termicamente após o ensaio de cisalhamento direto e reverso.....	55
Figura 45 – Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO tratado termicamente	56
Figura 46 – Aspecto superficial do corpo de prova após o ensaio de tração.....	57
Figura 47 – Impressão a) elíptica e impressão esférica b).....	57
Figura 48 – Região próxima à indentação das garras	58
Figura 49 – Gráfico volume desgastado-distância percorrida – Amostras não tratadas termicamente	59
Figura 50 - Gráfico volume desgastado-distância percorrida – Amostras tratadas termicamente	61
Figura 51 - Gráfico volume desgastado-distância percorrida - Tração	62
Figura 52 - A relação entre diâmetros das circunferências fornece a espessura da camada que recobre o material.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos mecanismos de desgaste	16
Tabela 2 - Diferentes variáveis referentes as características do material e físicas no processo de desgaste	17
Tabela 3 - Composição química do material	37
Tabela 4 - Resultado do ensaio de microdureza Vickers.....	47
Tabela 5 - Resumo das amostras	58
Tabela 6 – Taxa de desgaste - Amostras não tratadas termicamente	59
Tabela 7 - Taxa de desgaste – Amostras tratadas termicamente	61
Tabela 8 - Taxa de desgaste - Tração	62
Tabela 9 - Taxa de desgaste – Todas as amostras	64
Tabela 10 - Espessura média da camada superficial – Todas as amostras	65

1 INTRODUÇÃO

Os aços denominados siliciosos ou elétricos são ligas metálicas compostas por ferro-silício que apresentam propriedades magnéticas diferenciadas em relação às ligas ferro-carbono tradicionais. Seu desempenho é fortemente influenciado pelo tamanho de grão, pela textura cristalográfica do material, orientação dos grãos e a concentração de silício (CHIAVERINI, 1990; BOTELHO, 2012.).

De acordo com Chiaverini (1990), a adição de silício ao aço acima de 3,5% de concentração acarreta na diminuição das propriedades mecânicas do aço e, conseqüentemente, na fragilização do material, dificultando o seu processamento.

Landgraf (2002) afirma que os aços siliciosos que apresentam uma textura cristalográfica muito intensa, a textura (110)[001], batizada de orientação Goss, são denominados aços de grão orientado (GO). Além disso, os aços siliciosos apresentam uma elevada dimensão de tamanho de grão.

Devido à textura e ao elevado tamanho de grão do material o aço GO está sujeito ao surgimento do defeito superficial da casca de laranja. Este defeito é diretamente relacionado a produtos laminados com tamanho de grão muito grande e é caracterizado pela intensa rugosidade. O defeito ocorre devido ao fato de que os grãos tendem a deformar individualmente de tal modo que eles ficam em relevo na superfície do laminado. Pode também ter origem na temperatura incorreta do processo de laminação ou no excesso de tempo no recozimento (SOARES, 2009).

Portanto, este trabalho investigou a influência do tratamento térmico, do processamento mecânico e da ocorrência do defeito da casca de laranja na característica tribológica referente à taxa de desgaste do material por meio do ensaio microabrasivo da superfície das amostras.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi investigar a formação da imperfeição superficial “casca de laranja” para o aço de grão orientado (GO) após tratamento térmico e subsequente deformação plástica em tração e em cisalhamento.

2.2 Objetivo específico

A formação da imperfeição superficial “casca de laranja” no aço GO foi investigada em função:

- a) do modo de deformação plástica: tração e cisalhamento, sendo esse último conduzido de modo monotônico ou combinado (cisalhamento direto com cisalhamento reverso);
- b) da quantidade de deformação plástica: deformação cisalhante de 2,50%, 5,00% e deformação verdadeira de 12,34%;
- c) da adoção de um tratamento térmico conduzido a 650°C durante tempo de encharque de 15 minutos com posterior resfriamento em água.
- d) da taxa de desgaste do material com uso do ensaio microabrasivo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços siliciosos ou elétricos

Os aços denominados siliciosos ou elétricos são ligas metálicas compostas por ferro-silício que apresentam propriedades magnéticas diferenciadas em relação às ligas ferro-carbono tradicionais. A adição de silício ao ferro promove não só o aumento da resistência elétrica específica do material e a sua permeabilidade magnética, mas também diminui a perda de energia por histerese (CHIAVERINI, 1990; SAAD,2012).

O desempenho dos aços elétricos é fortemente influenciado pelo tamanho de grão, pela textura cristalográfica do material, orientação dos grãos e a concentração de silício (BOTELHO,2012; CHIAVERINI, 1990).

De acordo com Chiaverini (1990), a adição de silício ao aço acima de 3,5% de concentração acarreta na diminuição das propriedades mecânicas do aço e, conseqüentemente, na fragilização do material, dificultando o seu processamento. Portanto, para facilitar o seu trabalho a frio e, na tentativa de conciliar resistência mecânica e propriedades elétricas é feita a adição de manganês e alumínio no material (BOTELHO, 2012).

Segundo Chiaverini (1990), as ligas de aços siliciosos podem ser classificadas de acordo com a orientação de seus grãos:

- Ligas de grão orientado (GO): apresentam textura definida, baixa perda elétrica e elevada permeabilidade magnética (BOTELHO,2012; CHIAVERINI, 1990). Segundo Landgraf (2002), as excelentes propriedades magnéticas do aço GO limitam-se em apenas uma direção, ou seja, o material comporta-se anisotropicamente.
- Ligas de grão não-orientado (GNO): são “[...] produzidas por laminação a frio e recozidas, apresentam excelente permeabilidade em altas induções, baixo valor de perdas magnéticas e nelas pode ser aplicado um revestimento isolante.” (CHIAVERINI, 1990, p. 432). Como não apresenta orientação de grãos, o aço GNO torna-se interessante para aplicações que exigem a isotropia do material como em motores elétricos e transformadores. O aço GNO é o tipo mais utilizado de aço silicioso, correspondendo a, aproximadamente, 80% da produção dos aços elétricos (MOSES, 2012).

Segundo Aperam (2012) os aços elétricos são utilizados desde as etapas de geração, transmissão e distribuição até a etapa de consumo. Para aços de grão orientado as aplicações mais usuais incluem a fabricação de núcleos de transformadores, reatores de potência, hidrogeradores e turbogeradores e, para aços de grão não-orientado, a sua utilização ocorre principalmente em geradores de usinas hidroelétricas, motores elétricos, reatores de lâmpadas fluorescentes e compressores herméticos para geladeiras, freezers e ar-condicionado.

“Com a eficiência energética cada vez mais importante no mundo atual, os aços elétricos [...] contribuem de forma significativa na redução global do consumo de energia e de gases de efeito estufa.” (APERAM, 2012, p. 4).

Moses (2012) afirma que os avanços nas propriedades magnéticas e mecânicas dos aços ao silício devem-se ao melhor controle de impurezas, capacidade de produção de chapas mais finas, melhores revestimentos e melhoria na textura e otimização do tamanho de grão. Entretanto, apesar dos constantes avanços tecnológicos que aperfeiçoam continuamente o processo produtivo e o processamento, as perdas magnéticas associada aos aços utilizados ainda contabilizam entre 5% a 10% de toda a produção energética gerada nos países desenvolvidos (MOSES, 2012).

Como a utilização dos aços elétricos contribui para uma melhor eficiência energética e reduz a emissão de gases do efeito estufa, é imprescindível que a sua pesquisa e desenvolvimento ocorra de forma contínua com o intuito de aprimorar suas propriedades magnéticas e mecânicas e, portanto, torna-los mais eficientes de forma a reduzir a perda nas cadeias de produção, transmissão e utilização da energia (APERAM, 2012).

3.2 Desgaste dos materiais

3.2.1 Introdução

Stoeterau e Leal (2004) descrevem a tribologia como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas”. Portanto, a tribologia analisa as relações entre o atrito, desgaste, lubrificação e os seus efeitos nas superfícies dos materiais.

Segundo Stoeterau e Leal (2004) uma situação tribológica em que ocorre o contato entre duas ou mais superfícies resulta em duas manifestações exteriores:

- Dissipação energética: ocorre a dissipação de energia referente ao movimento, representada pelo coeficiente de atrito das superfícies. Esse contato entre superfícies resulta em uma liberação de calor e, ocasionalmente, ruído.
- Modificação das características básicas superficiais: durante o processo de escorregamento relativo em um maior ou menor grau as superfícies são deformadas. Essa deformação pode alterar a rugosidade superficial e outras propriedades físicas como, por exemplo, a dureza. Essa mudança superficial pode ocasionar processos de desgaste, ou seja, a perda progressiva do material em função deste movimento.

Um dos principais objetos de estudo da tribologia é o desgaste.

De forma geral o desgaste pode ser definido como uma mudança cumulativa e indesejável em dimensões motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato com movimento relativo, devido, predominantemente, a ações mecânicas. (STOETERAU & LEAL, 2004, p. 65).

As superfícies em um processo de desgaste geralmente estão submetidas também a um processo de corrosão pois ocorre a modificação química através da reação dos materiais base com o meio ambiente (STOETERAU & LEAL, 2004).

De modo a evitar ou diminuir a quantidade de material desgastada é comum a utilização de lubrificantes entre as superfícies envolvidas. Sem a presença de lubrificantes as taxas de desgaste seriam muito maiores e a vida útil do material seria drasticamente reduzida. O lubrificante mais comum é uma camada de óxido que separa os metais de base. Se durante um processo de desgaste ocorre a rápida remoção dessa camada de óxido ou a presença de algum mecanismo que previna a sua formação acarretará no aumento significativo das taxas de desgaste das superfícies (ARCHARD, 1980).

A classificação e quantidade dos mecanismos de desgaste apresenta variação dependendo da bibliografia utilizada e do ponto de vista dos autores sobre as variáveis envolvidas. Archard (1980) apresenta em seu trabalho uma classificação dos diferentes mecanismos de desgaste em conjunto com uma breve explicação para os processos, Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos mecanismos de desgaste

1. Adesão e Transferência	Os materiais coalescidos nos picos das regiões sob deslizamento são transferidos para o elemento de maior dureza, sendo essa transferência maior com o acréscimo do contato entre os materiais, sendo eventualmente removidos por fratura, fadiga ou corrosão.
2. Desgaste do Filme de Corrosão	Um filme formado pela reação com o meio ou com o lubrificante é removido por deslizamento.
3. Corte	Uma partícula afiada ou áspera corta uma lasca do material.
4. Deformação Plástica	A superfície sofre solicitação plástica. Trincas se formam, crescem e coalescem formando partículas de desgaste.
5. Fratura Superficial	Se a tensão nominal exceder a tensão de ruptura de um material frágil, partículas poderão ser formadas pela fratura.
6. Reações Superficiais	Um material dissolve ou difunde no outro.
7. Rompimento	Materiais elásticos podem ser rompidos por um indentador afiado.
8. Fusão	Temperaturas elevadas podem causar desgaste por fusão
9. Eletroquímica	A diferença de potencial na superfície devido ao fluxo de um fluido pode causar o material a ser carregado pela solução.
10. Fadiga	A superfície sofre solicitação elástica. Trincas se formam, crescem e coalescem formando partículas de desgaste.

Fonte: ARCHARD, 1980, p. 55. (Tradução nossa).

“O desgaste não é de fato, um processo simples, mas sim, um complexo de diferentes processos que podem ocorrer independentemente ou em combinações” (Stoeterau & Leal, 2004, p. 72).

A elevada complexidade do processo de desgaste pode ser evidenciada pela quantidade de variáveis envolvidas no estudo do fenômeno, Tabela 2.

Tabela 2 - Diferentes variáveis referentes as características do material e físicas no processo de desgaste

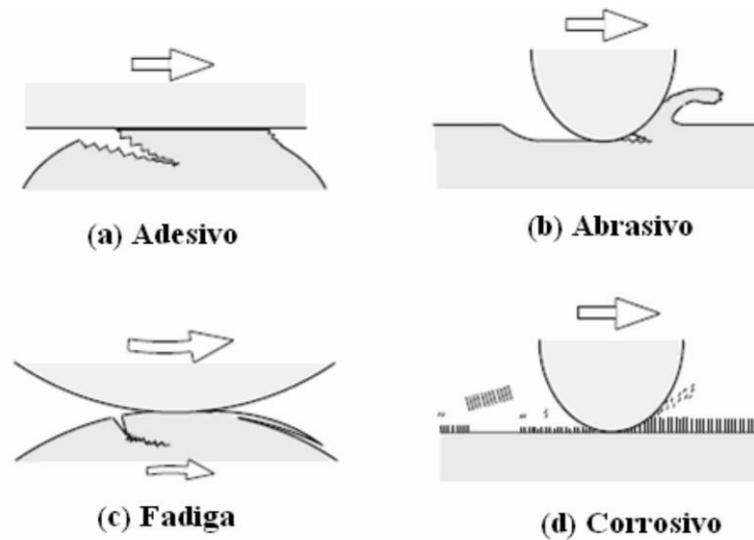
Variáveis de Material	Variáveis Físicas
Dureza	Geometria
Tenacidade	Pressão de contato
Ductilidade	Temperatura
Módulo de elasticidade	Estado de tensões
Tensão de escoamento	Distribuição de tensões
Estrutura	Acabamento superficial
Composição química	Velocidade relativa
	Distância percorrida

Fonte: STOETERAU e LEAL, 2004, p. 73. (Adaptado)

Segundo Archard (1980) e Stoeterau e Leal (2004), tradicionalmente são aceitas quatro formas básicas de mecanismos de desgaste, Figura 1. Esses mecanismos são os mais estudados e suas teorias são bem fundamentadas e aceitas:

- Desgaste adesivo;
- Desgaste abrasivo;
- Desgaste por fadiga.
- Desgaste oxidativo ou corrosivo;

Figura 1 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste



Fonte: RADI et al., 2007, p. 3.

3.2.2 Desgaste adesivo

Stoeterau e Leal (2004) afirmam que este é o tipo de desgaste mais comum de ser encontrado e apresenta um longo histórico de pesquisa. Radi et al. (2007) o define da seguinte maneira:

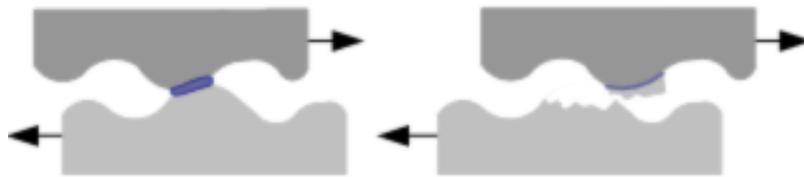
O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material. (RADI *et al.*, 2007, p. 3).

Primeiramente, o desgaste adesivo pode ser melhor compreendido considerando que toda superfície apresenta ondulações sobre a qual é distribuída um conjunto de picos e vales (rugosidades ou asperezas), independentemente da forma ou do grau de cuidado com que a superfície foi preparada. Quando duas superfícies entram em contato, apenas um pequeno número de asperezas verdadeiramente entra em contato (sendo essa definida como área real de contato) de forma que essa representa apenas uma pequena parcela da área de contato aparente (STOETERAU & LEAL, 2004).

Assim, mesmo se a carga aplicada for relativamente baixa, a pressão localizada nos pontos de contato é elevada devido ao fato da área ser pequena, o que acarreta em tensões altas o suficiente

para ultrapassar o valor da tensão de escoamento do material e, deste modo ocorre uma deformação plástica localizada. Caso haja um contato muito íntimo devido a esses pontos que sofreram deformação plástica pode ocorrer o surgimento de forças adesivas suficientemente fortes entre os átomos das superfícies, gerando pontos de solda localizados. Se essas superfícies sofrerem um movimento de escorregamento esses pontos de solda serão rompidos na interface ou em um ponto de reentrância, ocorrendo nesta última a transferência de uma partícula de uma superfície à outra, caracterizando assim o processo de desgaste por adesão, Figura 2 (STOETERAU & LEAL, 2004).

Figura 2 - Contato e transferência de partículas no desgaste adesivo



Fonte: KOPELIOVICH, 2015.

Portanto, no desgaste adesivo, o desgaste é diretamente proporcional a carga aplicada e independe da velocidade e da área de contato aparente e sim da área de contato verdadeira (ARCHARD, 1980).

Para Archard (1980) outros fatores que apresentam grande influência nesse tipo de desgaste são:

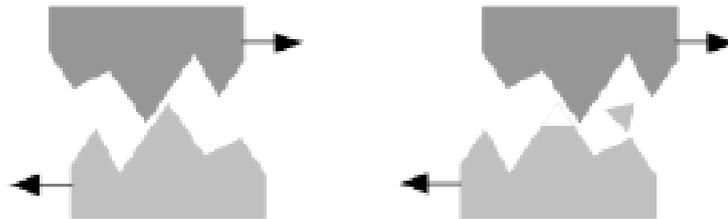
- a) **Dureza do material:** um alto valor de dureza é geralmente útil para reduzir o desgaste. Todavia, a razão entre dureza e elasticidade, que representa o limite de escoamento de um material, é mais representativa do que apenas o valor da dureza em si. Entretanto, para metais e suas ligas, os valores de dureza variam de forma mais acentuada do que os de elasticidade.
- b) **Dureza superficial:** no desgaste adesivo as características de bulk do material são pouco relevantes. O que interessa é a dureza da camada que está diretamente em contato com os esforços mecânicos. Como consequência, uma grande variedade de técnicas de endurecimento de superfícies tem sido desenvolvida como por exemplo, cementação e nitretação.

- c) **Evitar a coalescência:** deve-se evitar a utilização do mesmo material quando duas superfícies estão sujeitas a deslizamento uma sobre a outra pois caso sejam metalurgicamente similares esses materiais estão sujeitos a soldagem a frio.
- d) **Compatibilidade:** deve-se evitar materiais com elevada compatibilidade entre si. Materiais com elevada compatibilidade estão sujeitos a difusão de seus elementos e o favorecimento da solda na interface.

3.2.3 Desgaste abrasivo

Ocorre quando uma partícula de dureza mais elevada provoca uma indentação em uma superfície, de menor dureza, ocasionando ranhuras e a retirada de material conforme ocorre o deslocamento relativo entre as superfícies, ilustrado na Figura 3. Este mecanismo denomina-se desgaste abrasivo de dois corpos (ARCHARD, 1980).

Figura 3 - Desgaste abrasivo de dois corpos (Adaptado)



Fonte: KOPELIOVICH, 2015.

O desgaste abrasivo também pode ocorrer de forma que um grão abrasivo está alojado em uma das superfícies ou disperso entre elas e realiza uma indentação em uma outra com a subsequente retirada de material das ranhuras conforme o deslocamento relativo ocorre, ilustrado na Figura 4. Similarmente ao mecanismo anterior, este denomina-se de desgaste abrasivo de três corpos (STOETERAU & LEAL, 2004).

Figura 4 - Desgaste abrasivo de três corpos (Adaptado)



Fonte: KOPELIOVICH, 2015.

Archard (1980) afirma que o desgaste abrasivo é influenciado pela rugosidade da superfície de maior dureza. Todavia, o aspecto geométrico das asperezas na superfície abrasiva contribui de forma significativa para o processo de desgaste, pois essa geometria influencia diretamente na quantidade de material desgastado. Por exemplo, asperezas com picos mais pontiagudos são menos capazes de causar a abrasão de uma superfície se comparados com picos arredondados ou particulados ovais.

De acordo com Stoeterau e Leal (2004), não há desgaste abrasivo de dois corpos quando a superfície de maior dureza é lisa. A mesma situação ocorre no desgaste abrasivo de três corpos quando a dureza das partículas no sistema é inferior em relação a das superfícies ou quando estas possuem pequena dimensão. Desta forma é possível que, inicialmente, não ocorra a remoção de material devido ao mecanismo de desgaste abrasivo em um sistema.

Stoeterau e Leal (2004) ressaltam que caso o sistema inicie um deslizamento relativo, o desgaste abrasivo pode, eventualmente, ocorrer. É possível que partículas despreendidas das superfícies por outros processos de desgaste, ao entrar em contato com o meio e sofrerem oxidação, endureçam e comecem a atuar como partículas abrasivas no sistema.

Para Stoeterau e Leal (2004) o desgaste provocado pela abrasão nem sempre é indesejável. Em processos controlados ele é amplamente utilizado em operações de acabamento. “O tipo dois corpos é utilizado em limas, papel abrasivo, tecidos abrasivos e rebolos (rodas abrasivas), enquanto o tipo três corpos é utilizado para polimento e lapidação.” (STOETERAU & LEAL, 2004, p. 82).

3.2.4 *Desgaste por fadiga*

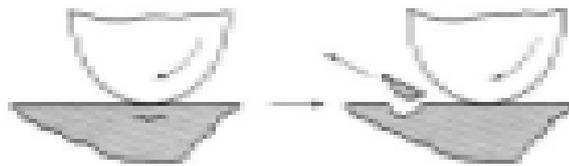
De acordo com Kopeliovich (2015), o desgaste por fadiga tem origem no alto número de solicitações mecânicas, durante um carregamento cíclico, em que a superfície do material está submetida. A fadiga ocorre quando a carga aplicada excede o limite à fadiga de um material.

As principais formas de desgaste por fadiga são denominadas por: *pitting*, *spalling* e *fretting*.

Conforme Stoeterau e Leal (2004) o *pitting*, também denominado de desgaste por cratera, ocorre quando duas superfícies, na presença de um lubrificante, entram em contato entre si em

movimento de rolamento de tal maneira que produzem tensões de cisalhamento cujo valor máximo ocorre logo abaixo da superfície do material. Como consequência pode-se formar uma trinca e essa propagar-se devido ao carregamento cíclico. Conforme a trinca se propaga em direção a superfície ela pode ocasionar a remoção de material e formar uma cavidade, conforme ilustrado pela Figura 5. Esta forma de desgaste é relativamente comum em elementos de máquinas como mancais de rolamento e dentes de engrenagens.

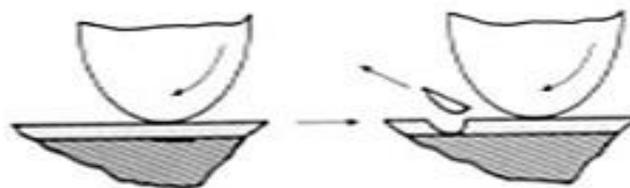
Figura 5 - Desgaste por fadiga - *Pitting*



Fonte: RIJEZA METALURGIA, [201-?]

O mecanismo de *spalling*, ou lascamento, possui o mesmo princípio que o mecanismo de *pitting*. Entretanto, este ocorre em peças em que a superfície possui uma camada de revestimento, Figura 6 (BUDINSKI, 1988 apud RIJEZA METALURGIA, [201-?], p.13).

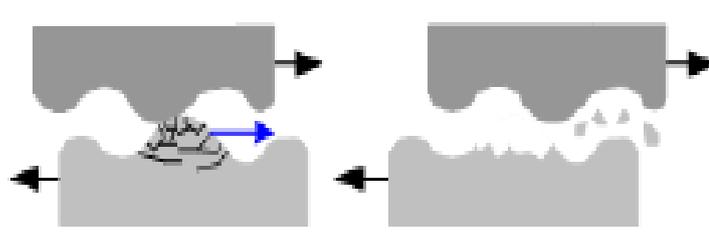
Figura 6 - Desgaste por fadiga - *Spalling*



Fonte: RIJEZA METALURGIA, [201-?]

Segundo Kopeliovich (2015), um outro tipo de desgaste por fadiga é denominado de *fretting*. Esse tipo de desgaste ocorre quando duas superfícies deslizam (oscilam) uma em relação a outra com uma baixa amplitude. A fricção produz forças de compressão e tração que, eventualmente, resultarão na fadiga superficial, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Desgaste por fadiga - *Fretting*



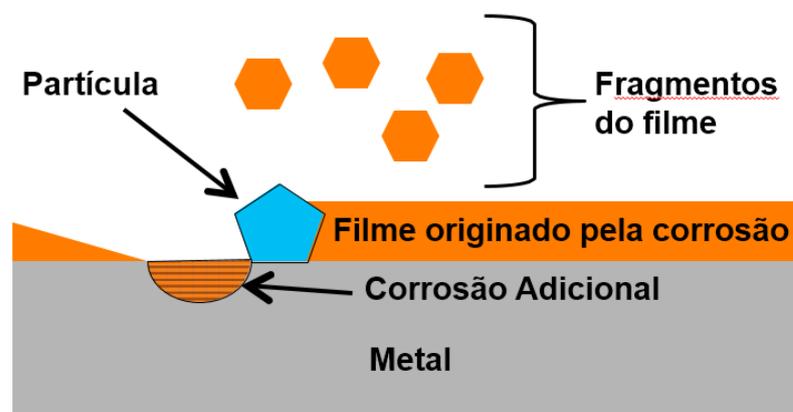
Fonte: KOPELIOVICH, 2015.

3.2.5 Desgaste oxidativo ou corrosivo

“Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.” (RADI *et al.*, 2007, p. 4).

Stoeterau e Leal (2004) descrevem dois estágios para o processo de desgaste corrosivo. O primeiro estágio compreende a reação química que ocorre na superfície. Sendo este um processo idêntico ao que ocorre em um material exposto a um ambiente corrosivo convencional. A superfície nua, ou seja, sem camada de passivação, é submetida a um meio ao qual pode haver uma reação química que, inicialmente apresenta alta reatividade mas decresce com o passar do tempo devido a formação de uma camada coesa que separa os dois elementos de elevada reatividade. Em seguida, o segundo estágio consiste na retirada, pelo deslizamento das superfícies, dessa camada coesa. Quando isso ocorre a superfície apresentar-se-á exposta, ou seja, sem uma camada que separe as duas superfícies reativas, e a reação química de corrosão ocorrerá novamente, Figura 8.

Figura 8 - Desgaste corrosivo



Fonte: GRUBB, 2011, p. 4. (Tradução nossa)

“No processo de corrosão pode ocorrer simultaneamente as condições de desgaste por adesão ou por abrasão. Se o produto da corrosão é duro e abrasivo, partículas provenientes do processo corrosivo que possam existir entre as superfícies em contato, acelerarão o desgaste abrasivo.” (STOETERAU & LEAL, 2004, p. 96).

De acordo com Archard (1980), um dos principais fatores que influencia no desgaste corrosivo é a temperatura do meio. Como a corrosão está diretamente relacionada a temperatura dos processos, um aumento da temperatura ocasiona um incremento exponencial da reatividade para processos termicamente ativados. Portanto, potencializando o desgaste corrosivo para essas situações.

3.3 Defeitos superficiais em chapas

A laminação pode ser definida como um processo de conformação de materiais onde estes passam através de uma série de cilindros giratórios que aplicam um esforço compressivo-cisalhante de forma a deformar plasticamente o material. Essa deformação controlada permite diminuir a área da seção transversal do material enquanto aumenta o seu comprimento. O processo apresenta elevada produtividade e precisão dimensional (SERANTONI, [2009?]).

Segundo Serantoni ([2009?]), dependendo da temperatura de trabalho em que a laminação ocorre o processo pode ser dividido em duas categorias: laminação a quente e laminação a frio:

- a) Laminação a quente: comumente aplicada em operações de desbaste, onde são necessárias grandes reduções de seção, com grau de deformação podendo chegar a ordem de centenas de vezes. Ocorre em temperaturas superiores a temperatura de recristalização do material, ou seja, para aços a temperatura pode variar entre 700 a 900°C. A laminação a quente altera completamente a estrutura bruta de fundição e refina o grão do material. Isso acarreta na otimização de suas propriedades mecânicas, no sentido da laminação. (SERANTONI, [2009?]; PALMEIRA, 2005).

- b) Laminação a frio: normalmente utilizada em operações de acabamento, quando é necessária uma boa qualidade superficial. Ocorre em temperaturas inferiores a temperatura de recristalização do material e o processo é capaz de fornecer produtos laminados com acabamento superficial (até mesmo polido, se desejado pois o produto apresentará menor rugosidade e estará livre de oxidações aparentes) e tolerâncias

dimensionais superiores ao da laminação a quente. Na laminação a frio consegue-se um aumento da resistência mecânica do produto devido ao encruamento do material. (SERANTONI, [2009?]; PALMEIRA, 2005).

Dependendo de parâmetros do processo de laminação como, por exemplo: os tipos de laminadores, a carga de laminação, a velocidade de deformação, o atrito e lubrificação, o módulo e tipo de esforços envolvidos e o grau de deformação pretendido o processo pode ser afetado de tal forma a gerar defeitos superficiais nos produtos laminados (SERANTONI, [2009?]).

Bueno (2012) define defeitos superficiais como “[...] descontinuidades na superfície do material, caracterizados pela forma, profundidade, dimensão e distribuição ao longo da barra laminada. [...]” (BUENO, 2012, p. 17).

Alguns defeitos superficiais de produtos laminados são:

- a) **Rugosidade:** constituída de partículas de carepa que estão aderidas na superfície e se desprendem após a decapagem, deixando um aspecto áspero na superfície do material (SERANTONI, [2009?]);
- b) **Vazios:** ocorrência de buracos no produto e pode ser originado dos rechupes ou gases retidos no metal provenientes da fundição, Figura 9 (SERANTONI, [2009?]);

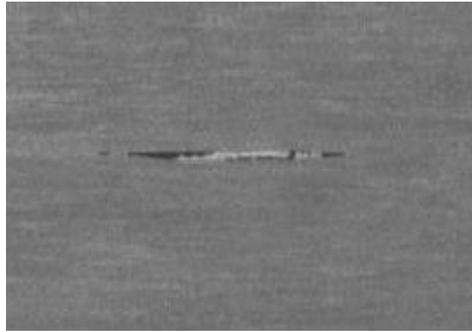
Figura 9 - Vazios



Fonte: SOARES, 2009, p. 24.

- c) **Trincas:** são rachaduras que aparecem no material e são provenientes, geralmente, da inadequada temperatura de laminação, tensões exageradas ou a má regulagem do processo, Figura 10 (SERANTONI, [2009?]; PALMEIRA, 2005);

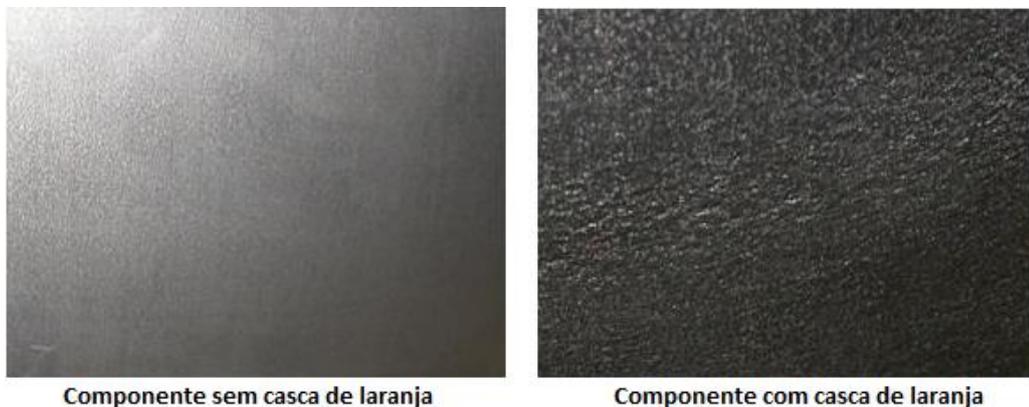
Figura 10 - Trincas em uma chapa



Fonte: FERREIRA, 2008, p. 12.

- d) **Dobramentos:** são causados por reduções de seção de forma exacerbada (SERANTONI, [2009?]);
- e) **Casca de laranja:** defeito relacionado a produtos laminados com o tamanho de grão muito grande e é caracterizado por uma superfície de intensa rugosidade. Ocorre devido ao fato de que os grãos tendem a deformar individualmente de tal modo que eles ficam em relevo na superfície do laminado. Pode também ter origem na temperatura incorreta do processo de laminação ou no excesso de tempo no recozimento. Verifica-se após a deformação da chapa, Figura 11 (SOARES, 2009);

Figura 11 - Casca de Laranja



Fonte: INDUSTRIAL METALLURGISTS, LLC, 2014. (Tradução nossa)

f) **Carepa incrustada:** pedaços de carepa que se aderem à superfície da peça e não são removidos, Figura 12 (PALMEIRA, 2005);

g)

Figura 12 - Carepa incrustada



Fonte: FERREIRA, 2008, p. 12.

h) **Ondulado:** os esforços aplicados no centro e nas laterais do material apresentam discrepância, Figura 13 (PALMEIRA, 2005);

Figura 13 - Laminado ondulado



Fonte: FERREIRA, 2008, p. 10.

i) **Linhas de distensão:** ocorrem quando a redução da seção é feita de forma exagerada e é caracterizada pela presença de riscos paralelos entre si posicionados a 45° com a direção de laminação (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011);

Alguns defeitos superficiais dos produtos laminados têm origem, principalmente, nos cilindros de laminação. Conforme a superfície dos cilindros de laminação é alterada, o material laminado em contato com o cilindro e, com o auxílio do esforço aplicado, é marcado.

- i. ***Banding***: caracterizado pelo aparecimento de áreas escuras na superfície do cilindro e com elevada rugosidade. Origina-se a partir da deficiência de refrigeração, excesso de uso ou seleção incorreta do material de fabricação do cilindro. Essas asperezas podem ser passadas para os produtos laminados, Figura 14 (RIZZO, 2007);

Figura 14 - Representação do *Banding* e fotos do cilindro



Fonte: RIZZO, 2007, p. 135.

- ii. ***Peeling***: ocorre a remoção parcial de óxido na superfície dos cilindros. Apresenta um aspecto superficial de finas estrias na superfície do cilindro, Figura 15 (RIZZO, 2007);

Figura 15 - Representação do *Peeling* e fotos do cilindro



Fonte: RIZZO, 2007, p. 135.

- iii. **Marcas de vibração ou *chater marks***: caracterizada por pequenas linhas transversais no cilindro de laminação e que ao longo do processo são transmitidas para a chapa. O defeito possui diversas origens, tais como o rebolo desbalanceado ou muito duro, baixa rotação do cilindro e vibrações externas, Figura 16 (PALMEIRA, 2005; RIZZO, 2007);

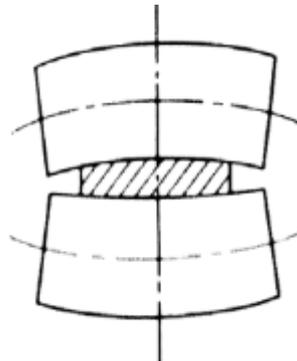
Figura 16 - Representação das marcas de vibração e seus efeitos no produto laminado



Fonte: RIZZO, 2007 e SOARES, 2009. (Adaptado)

- iv. **Desalinhamento dos cilindros:** as chapas apresentarão bordas curvadas longitudinalmente. Portanto, os cilindros desnivelados promovem o empenamento da chapa, Figura 17 (PALMEIRA, 2005).

Figura 17 - Representação do desalinhamento dos cilindros



Fonte: FERREIRA, 2008, p. 10.

3.4 Processamento mecânico *versus* propriedades dos aços elétricos

3.4.1 *Efeito do processamento mecânico nas propriedades dos aços elétricos*

De acordo com Landgraf (2002), a qualidade de um aço elétrico está intimamente ligada às perdas histeréticas do material e esta propriedade não depende da espessura da lâmina ou sofre grande influência de sua composição química. Ainda não há um modelo universal que relacione as variáveis microestruturais com as perdas histeréticas do material. Sabe-se que dependendo das condições de processamento do material há uma mudança nas propriedades eletromagnéticas dos aços elétricos.

Segundo Botelho (2012) as perdas magnéticas do material podem ser divididas em três categorias: histeréticas, parasíticas e anômalas (ou em excesso).

“As perdas histeréticas são geradas durante o movimento das paredes dos domínios magnéticos.” (BOTELHO, 2012, p. 33)

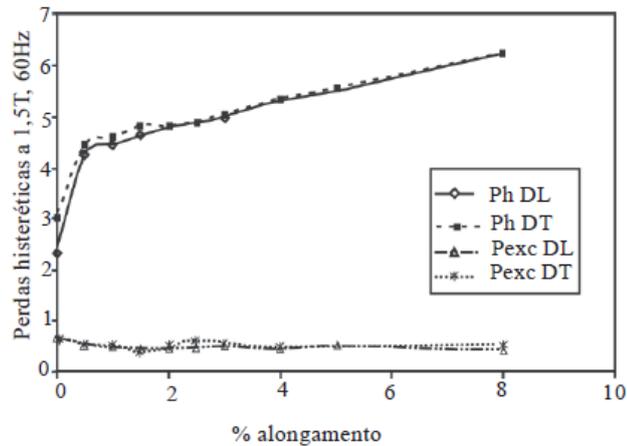
“As perdas parasíticas, ou por corrente parasitas, são causadas pela dissipação de energia favorecida pelas correntes parasitas. As perdas são menores em menores espessuras e maiores resistividades do material.” (BOTELHO, 2012, p. 34)

Também segundo Botelho (2012), as perdas anômalas são causadas pelo atrito da movimentação das paredes dos domínios magnéticos durante a magnetização e como não há nenhuma maneira de medi-las diretamente.

Algumas variáveis de processamento como deformação plástica, direção de laminação, textura do material, tamanho de grão e ângulo de corte são capazes de alterar as perdas magnéticas dos aços (LANDGRAF, 2002).

Conforme analisado por Landgraf (2012), a deformação plástica sofrida pelo material no processamento influencia direta e significativamente as perdas associadas aos aços elétricos, Figura 18.

Figura 18 - Efeito da deformação plástica nas perdas histeréticas de aços 2% Si

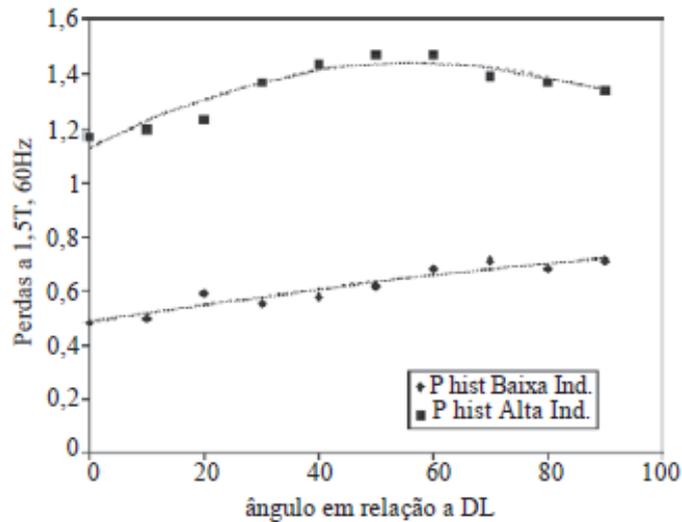


Fonte: LANDGRAF, 2002, p. 123.

“[...] O processo de laminação pode introduzir uma anisotropia na distância entre inclusões (a distância na direção de laminação deve ser maior que a distância na direção transversal), isso induz a maiores perdas na direção transversal.” (LANDGRAF, 2002, p. 120)

Landgraf (2002) afirma que os aços siliciosos que apresentam uma textura cristalográfica muito intensa, a textura (110)[001], denominada de orientação Goss, são denominados aços de grão orientado (GO). Após a laminação, a textura do material está presente em apenas uma direção, que é paralela à de laminação. As propriedades magnéticas do material na direção paralela de laminação são interessantes. Todavia, caso o material seja utilizado com as texturas em uma direção diferente da laminação original, incluindo a direção transversal, as propriedades magnéticas já não são tão pronunciadas, Figura 19.

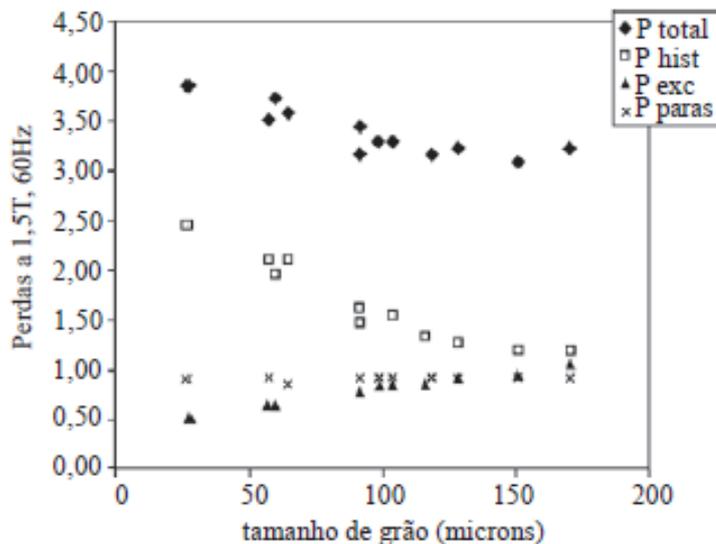
Figura 19 - Perdas histeréticas de Alta e Baixa Indução em relação a direção de laminação (DL)



Fonte: LANDGRAF, 2002, p. 124.

Landgraf (2002) relaciona a influência do tamanho de grão com as perdas magnéticas do material. As perdas histeréticas do material são inversamente proporcionais ao tamanho de grão que este apresenta. Para um intervalo analisado de tamanho de grão entre 0 a $150\mu\text{m}$ quanto maior o tamanho de grão menor será a perda histórica associada, Figura 20. Landgraf (2002) afirma que há uma condição de tamanho de grão ótimo entre $100\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$.

Figura 20 - Efeito do tamanho de grão nas perdas magnéticas totais (P total), perdas histeréticas (P hist), perdas clássicas (P paras) e perdas de excesso (P exc) de um aço com 2% Si



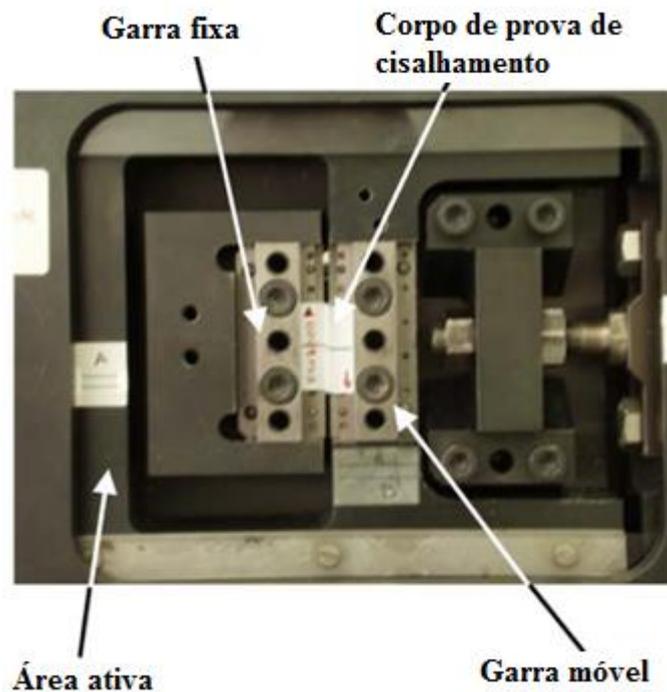
Fonte: LANDGRAF, 2002, p. 121.

3.4.2 Ensaio de cisalhamento

Uma maneira de quantificar e, conseqüentemente, analisar a influência do processamento mecânico nas propriedades dos aços elétricos neste trabalho foi feita a partir do uso do ensaio de cisalhamento.

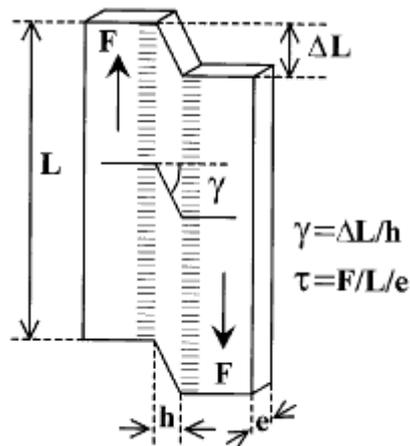
Segundo Rauch (1998), o ensaio de cisalhamento planar simples é uma técnica eficiente para se estimar as propriedades mecânicas de amostras planas. Bouvier *et al.* (2006) descrevem que o ensaio consiste, simplificado, em um mecanismo mecânico que impõe um deslocamento paralelo de duas garras laterais de fixação conectadas a um corpo de prova, Figura 21 e Figura 22.

Figura 21 - Instrumento de cisalhamento simples



Fonte: BOUVIER *et al.*, 2006, p. 97. (Tradução nossa)

Figura 22 - Geometria de uma amostra de cisalhamento. O volume deformado é delimitado pelas indentações resultados das laterais das garras



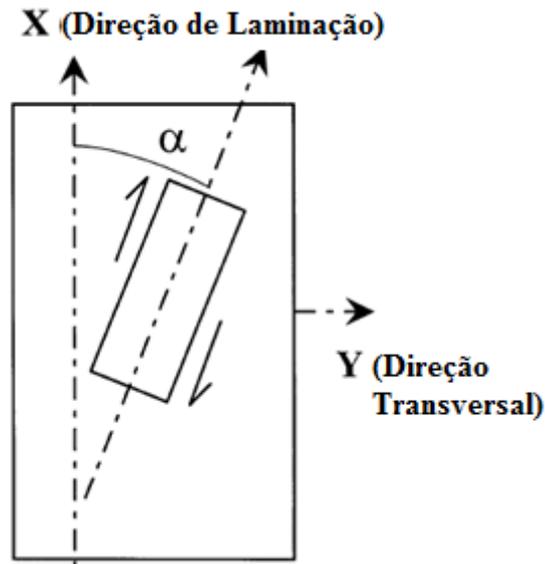
Fonte: RAUCH, 1998, p. 179.

A ausência do desenvolvimento de estricção aliada à capacidade de alcançar elevado nível de deformação homogênea, além da geometria extremamente simples do corpo de prova e a possibilidade de realizar o carregamento inverso ou reverso ao longo do experimento são as vantagens dessa técnica quando comparada com o ensaio de tração uniaxial (RAUCH, 1998).

Bouvier *et al.* (2006) destacam outras vantagens referentes a quantificação das forças cisalhantes e a sensibilidade do ensaio. A região central entre as garras de fixação do dispositivo está sujeita a forças cisalhantes que estão em equilíbrio uma com a outra e, portanto, as chapas são menos carregadas e a força de atrito diminui, permitindo assim uma melhor estimativa das forças de cisalhamento envolvidas. Além disso, o ensaio de cisalhamento simples não é sensível a pequenas imperfeições na amostra, com exceção das diferentes espessuras ocasionados pelo processo de laminação.

Um dos propósitos desse ensaio é avaliar a anisotropia plástica de uma chapa metálica. Basicamente, a anisotropia plástica de uma chapa é realizada através da aplicação de um esforço mecânico em diferentes direções em relação a alguns eixos, Figura 23. Para complementar os resultados utiliza-se o carregamento reverso através da inversão do deslocamento relativo das garras de fixação (RAUCH, 1998).

Figura 23 - Orientação de uma amostra para um experimento a α graus dos eixos de referência X e Y



Fonte: RAUCH, 1998, p. 180. (Tradução nossa)

Para caracterizar a resposta do material um experimento complementar deveria ser realizado na direção reversa para cada ângulo α escolhido. Entretanto, como o tensor tensão é simétrico, isso não é realmente necessário (RAUCH, 1998).

Portanto, a anisotropia plástica de produtos metálicos laminados é, facilmente, quantificada com o ensaio de cisalhamento planar. Particularmente, a possibilidade de reverter o deslocamento das garras de fixação o torna útil para quantificar a extensão da anisotropia. A anisotropia inicial e a induzida podem ser avaliadas através do experimento adequado. A origem da anisotropia plástica do material pode ser deduzida pelo resultado desse experimento (RAUCH, 1998).

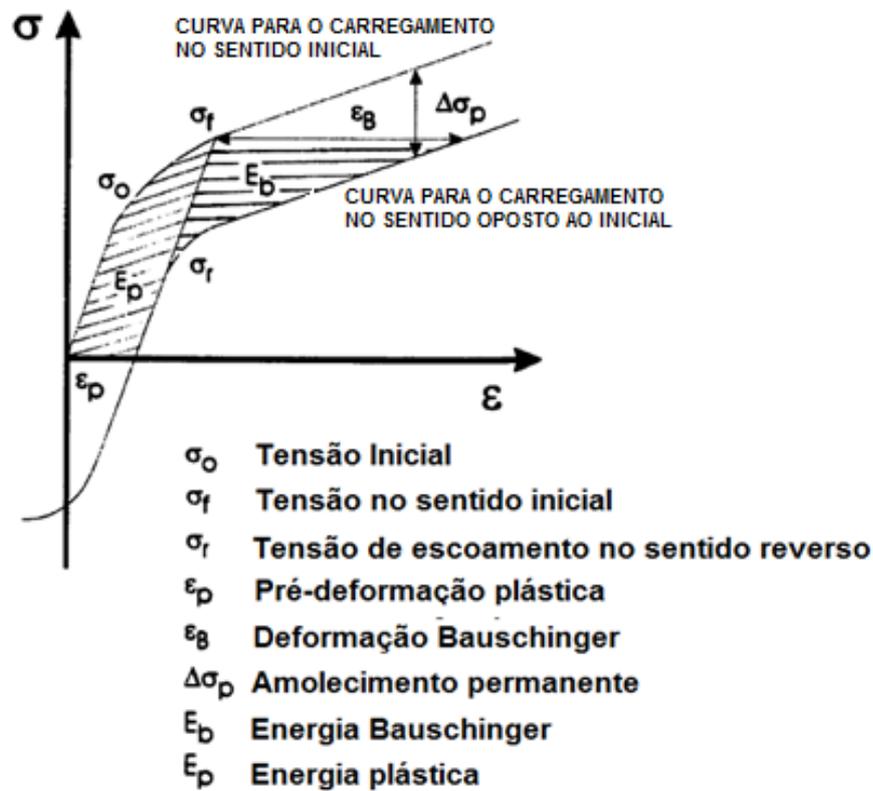
3.4.3 Efeito Bauschinger

Materiais quando submetidos aos esforços em uma direção axial (ensaio de tração ou cisalhamento direto, por exemplo) no regime plástico, descarregados e, em seguida, descarregados no sentido contrário (compressão ou cisalhamento reverso, por exemplo), o material pode apresentar um nível de tensão menor do que o carregamento utilizado no sentido original. (YAN 1998, apud HAUS, 2011, p. 41)

“Se um corpo é altamente deformado em uma direção e então imediatamente recarregado na direção oposta, ele começa a fluir nessa direção com uma redução da tensão. Este é o efeito Bauschinger.” (COTTRELL, 1953 apud HAUS, 2011, p. 41)

A Figura 24 representa a esquematicamente as características presentes no efeito Bauschinger.

Figura 24 - Representação esquemática do comportamento uniaxial tensão-deformação de muitos materiais durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger



Fonte: HAUS, 2011, p. 42.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os processos e procedimentos que foram utilizados para a caracterização microestrutural e mecânica, além das condições adotadas para a realização do tratamento térmico e do ensaio desgaste microabrasivo das amostras do aço de grão orientado (GO).

4.1 Preparação dos corpos de prova

As dimensões dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento foram de 50mm x 15mm x 0,30mm (comprimento x largura x espessura) de acordo com as recomendações previstas por Rauch (1992), sendo a largura efetiva submetida ao cisalhamento igual a 3,70mm.

Para a condução do ensaio de tração fez-se uso de uma amostra com dimensões de 83mm x 16mm x 0,30mm, sendo ambos os corpos de prova, cisalhamento e tração, cortados na guilhotina PECK, STOW & WILCOX CO, Figura 25.

Figura 25 - Guilhotina PECK, STOW & WILCOX CO



Fonte: O AUTOR

O material utilizado foi o aço GO, fornecido pela APERAM South America, de composição química segundo a Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do material

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
0,0029	0,5494	3,0334	0,0297	0,00014

Fonte: APERAM

Os corpos de provas foram divididos em dois grupos, referentes ao tratamento térmico aplicado: um dos grupos não foi submetido ao tratamento térmico, enquanto o outro grupo foi submetido ao tratamento. Ambos os grupos foram submetidos a caracterização mecânica, ensaio de cisalhamento e ensaio de desgaste microabrasivo.

4.2 Tratamento térmico

As amostras foram selecionadas aleatoriamente e submetidas ao tratamento térmico para investigar a influência dessa condição na formação da imperfeição superficial “casca de laranja”.

Deste modo, a partir de estudos anteriores conduzidos por Castro (2015) e Salinas-beltrán et al. (2016), verificou-se que as perdas magnéticas nos aços elétricos foram mais destacadas após tratamentos térmicos realizados entre 650°C e 900°C. Desta forma, a temperatura utilizada para o tratamento térmico foi de 650°C, como modo de investigar se a condução do tratamento térmico nessa temperatura poderia ocasionar danos ao comportamento mecânico devido a possível ocorrência de recristalização e a própria influência da formação da imperfeição superficial “casca de laranja”.

As amostras foram tratadas termicamente em temperatura de 650°C, utilizando um forno tipo mufla modelo MAGNU'S, Figura 26, com um tempo de encharque de 15 minutos e, em seguida, resfriadas bruscamente em água.

Figura 26 - Forno MAGNU'S



Fonte: O AUTOR

4.3 Caracterização microestrutural

As amostras do material como recebido e tratado termicamente foram submetidas ao ensaio de caracterização microestrutural. Neste caso, fez-se o embutimento à frio, lixamento e polimento mecânico, ataque com reativo químico e, por fim, análise por microscopia óptica.

As amostras foram embutidas à frio utilizando acrílico autopolimerizante, Figura 27. Em seguida, a superfície das amostras foi lixada utilizando as lixas de #120, #240, #320, #400 e #600, sendo água a substância lubrificante nesta etapa.

Figura 27 - Amostra embutida



Fonte: O AUTOR

Em seguida, as amostras foram submetidas ao polimento utilizando pasta de diamante com granulometria de 9 μm e 6 μm e álcool etílico como lubrificante durante o polimento.

O ataque químico das amostras foi realizado utilizando Nital 5% (solução de 95% de álcool etílico e 5% de ácido nítrico v/v). As amostras foram atacadas utilizando tempos de imersão de 3 min, 5 min e 6 min. Ao final de cada ataque, as amostras foram submetidas à microscopia óptica utilizando um microscópio da marca *Fortel* com câmera acoplada e software para a digitalização das imagens. A ampliação utilizada foi de 40x.

4.4 Caracterização mecânica

A preparação das amostras (para ambos os grupos, tratados termicamente e não tratados) para a realização do ensaio de microdureza Vickers envolveu o embutimento a frio, utilizando resina

acrílica autopolimerizável com posterior lixamento com uso de lixas de #240, #320, #400, #600 e #1000 mesh.

O ensaio de microdureza foi realizado em um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu modelo HMV, Figura 28. A medição da microdureza Vickers foi feita com uso de carga de 2,942 N / 0,3 Kgf, com tempo de indentação de 15 segundos. Foram realizadas 12 medições para cada amostra, sendo que a maior e a menor medida foram desconsideradas na análise, e o valor final foi obtido a partir da média aritmética simples do restante dos resultados.

Figura 28 - Microdurômetro Vickers - Shimadzu HMV



Fonte: O AUTOR

4.5 Processamento mecânico

As amostras de ambos os grupos foram submetidas a ensaio de cisalhamento, que utiliza um dispositivo especial montado em uma máquina de ensaios universal modelo Instron 5582, com sistema de aquisição de dados Blue Hill 2, extensômetro mecânico (tipo agulhas) com 25mm de abertura, conforme Figura 29.

Figura 29 - Dispositivo (garra) do ensaio de cisalhamento



Fonte: O AUTOR

As amostras foram submetidas a um carregamento monotônico e ao carregamento cíclico (deformação direta e reversa) sob uma taxa de deformação de 0,005/s. Em ambos os casos, a deformação foi interrompida quando se notou o aparecimento do fenômeno de casca de laranja na superfície do material, por observação visual.

O cisalhamento monotônico foi feito até um valor de deformação cisalhante igual a 2,5% e 5,0%, sendo o mesmo valor adotado para a realização do cisalhamento cíclico (cisalhamento direto acompanhado pelo cisalhamento reverso), ou seja, cisalhamento direto de 2,5% acompanhado por cisalhamento reverso de 2,5% de deformação cisalhante, e cisalhamento direto de 5,0% seguido por cisalhamento reverso de 5,0% de deformação cisalhante.

O ensaio de tração foi realizado nessa mesma máquina de ensaios universais, mas com um valor de taxa de deformação inicial igual a 0,001/s até um valor de deformação efetiva igual a 12,34%. A deformação de 12,34% consiste no ponto de deformação verdadeira até o início da instabilidade plástica em tração, observado durante o ensaio.

A seleção dos valores de taxa de deformação foi feita de modo a escolher dois valores considerados pequenos, os quais se situam de 0,001/s até a faixa de 0,005/s. A explicação para um ter usado o valor de 0,001/s e outro 0,005/s deve-se ao fato de ambos os ensaios, tração e cisalhamento, terem sido conduzidos em temperatura ambiente, aonde a mudança da taxa de

deformação da ordem de 5 vezes não é capaz de sensibilizar o valor da tensão cisalhante do material. Portanto, os ensaios podem ser considerados como realizados sob as mesmas condições experimentais.

Percebe-se que os gráficos obtidos a partir da metodologia descrita originam alguns pontos irregulares, principalmente no início da deformação do material. A presença desses pontos pode ser atribuída à diversos fatores:

- a) a formação da casca de laranja na superfície do corpo de prova, durante a condução do ensaio de cisalhamento, o que dificulta o aprisionamento das amostras à garra de cisalhamento;
- b) o escorregamento do extensômetro durante a deformação;
- c) e, um possível, mas pouco provável, o escorregamento do próprio corpo de prova durante o ensaio.

Em seguida, ambos os corpos de prova, de cisalhamento e de tração, foram submetidos ao ensaio de desgaste microabrasivo.

4.6 Ensaio de desgaste microabrasivo

4.6.1 Parâmetros do ensaio

Para o ensaio de desgaste microabrasivo foi utilizado o equipamento Anton Paar Calowear, Figura 30, sendo possível determinar o volume desgastado de uma superfície, bem como a taxa de desgaste do material e a espessura de filmes que recobrem a superfície do material, utilizando uma esfera de aço que gira em contato com a superfície da amostra e uma solução abrasiva.

A esfera e a solução abrasiva acarretam na indentação do material no formato de uma calota esférica, cujo diâmetro ao ser mensurado é capaz de fornecer o volume desgastado da amostra. (ANTON PAAR TRITEC SA, [201-?]).

Figura 30 - Montagem do experimento



Fonte: O AUTOR

Foi selecionada uma esfera nova de aço inoxidável ferrítico, sem imperfeições superficiais visíveis, de 20,0 mm de diâmetro. A velocidade de rotação do equipamento foi de 1000rpm e a carga aplicada na amostra pela esfera foi de, aproximadamente, 0,15N. O tamanho da esfera foi selecionado com base na ampliação do microscópio óptico disponível no laboratório. Caso uma esfera maior fosse selecionada seria necessário utilizar um outro equipamento de aquisição de imagens, porque a marca gerada pela esfera seria maior do que aquela que o microscópio é capaz de capturar.

A solução abrasiva utilizada foi uma suspensão aquosa de partículas de Carbetto de Silício (SiC) em água destilada, com uma concentração de 0,75g/cm³. Para manter a solução homogênea durante o ensaio, foi utilizado um agitador magnético à 600rpm, Figura 31.

Figura 31 – Solução de SiC 0,75g/cm³ no agitador magnético



Fonte: O AUTOR

O equipamento apresenta uma programação quanto ao tempo do ensaio. Os tempos selecionados foram de 120s, 180s e 240s para medição. Ao final da contagem, o equipamento automaticamente interrompe o ensaio. Os tempos foram selecionados com base em ensaios preliminares que visavam verificar a qualidade da impressão gerada pelo conjunto esfera/corpo de prova.

Para a captura de imagens da superfície dos corpos de prova foi utilizado um microscópio óptico conectado a um computador, Figura 32, e o software proprietário da máquina Calowear para a análise das superfícies.

Os corpos de prova não sofreram nenhum processo que os submetesse à abrasão superficial, ou ataque químico anteriormente ao ensaio.

Figura 32 – Microscópio óptico para captura de imagens



Fonte: O AUTOR

4.6.2 Determinação da taxa de desgaste

Stoeterau e Leal (2004) afirmam que a equação de Archard é o ponto inicial para se estudar o desgaste dos materiais pois assume que o material desgastado está associado à forma, o tamanho da área de contato, o carregamento e a dureza da superfície do material, Equação 1.

$$Q = \frac{k*W}{3*H} = K \frac{W}{H} = \frac{V}{S} \quad (1)$$

Onde: Q = Taxa de desgaste [m³/m];

k = Constante adimensional;

W= Carga [N];

H= Dureza superficial [N/m²];

K= Coeficiente de desgaste;

V= Volume desgastado [m³];

S= Distância percorrida [m].

Segundo Hutchings e Rutherford (1997, apud COZZA et al, 2009), o volume desgastado de uma cratera esférica pode ser determinado pela Equação 2:

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad (2)$$

Onde: V = Volume desgastado [m^3];
 b = Diâmetro da cratera [m];
 R = Raio da esfera [m].

Segundo Nunes et al (2007), a distância percorrida pode ser determinada pela Equação 3:

$$S = 2\pi Rn \quad (3)$$

Onde: S = Distância percorrida [m];
 R = Raio da esfera [m];
 n = Número de voltas.

Portanto, substituindo (2) e (3) em (1) tem-se que a taxa de desgaste Q pode ser expressa da seguinte forma, Equação 4:

$$Q = \frac{V}{S} = \frac{b^4}{128R^2n} \quad (4)$$

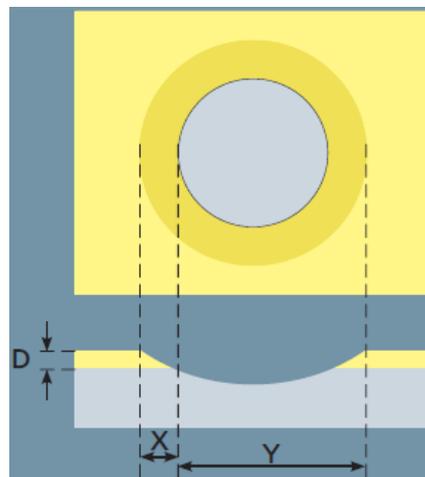
4.6.3 Determinação da espessura da camada superficial de óxido

Segundo CSM Instruments ([s.d.]) a espessura da camada de óxido que recobre a superfície do material pode ser obtida por meio da Equação 5:

$$D = \frac{X \times Y}{\text{Diâmetro da esfera}} \quad (5)$$

Onde: X e Y estão representados pela Figura 33

Figura 33 - Relação entre X e Y no cálculo da espessura da camada de óxido



Fonte: CSM Instruments, [s.d.]

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização

5.1.1 Caracterização mecânica: microdureza Vickers

A dureza Vickers do aço GO no estado como recebido e após o tratamento térmico realizado a 650°C por 15 minutos com posterior resfriamento em água é exibida na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de microdureza Vickers

Condição	Valor de microdureza (HV0,3)
Como recebido	199,7±4,8
Tratado termicamente	202,2±6,8

Fonte: O AUTOR

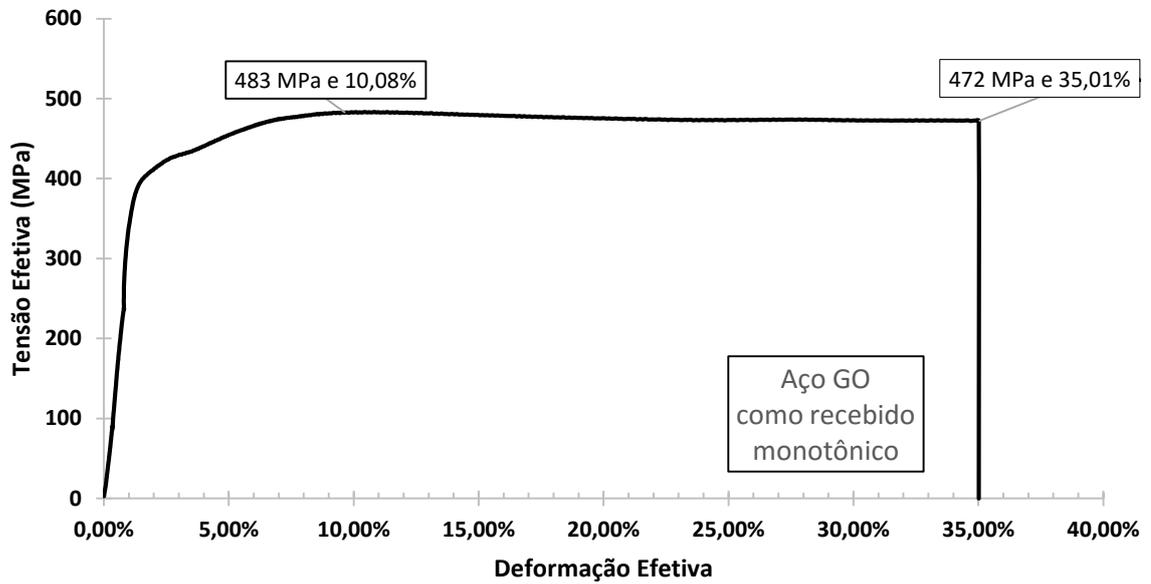
Observa-se que não houve alteração significativa da microdureza superficial advinda do tratamento térmico realizado.

5.1.2 Caracterização mecânica: cisalhamento monotônico

Amostras do material como recebido e tratado termicamente foram cisalhadas diretamente de forma a observar a progressão do fenômeno de casca de laranja e caracterizar mecanicamente as amostras.

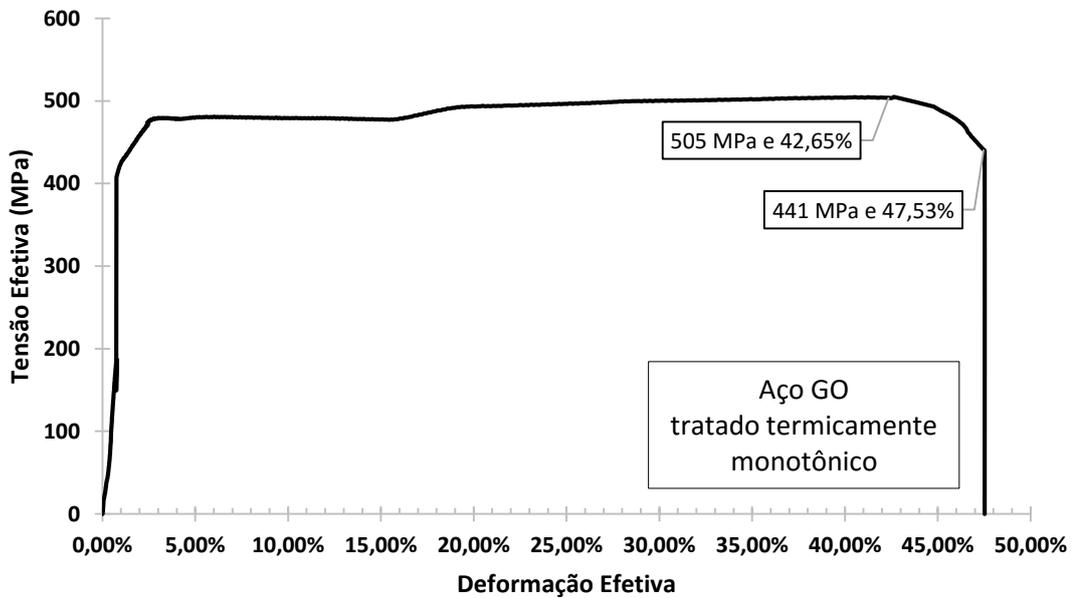
As Figura 34 e **Figura 35**, demonstram o resultado do ensaio de cisalhamento por meio da tensão e deformação das amostras.

Figura 34 - Curva tensão-deformação efetiva - Caracterização do Aço GO como recebido



Fonte: O AUTOR

Figura 35 - Curva tensão-deformação efetiva - Caracterização do Aço GO tratado termicamente



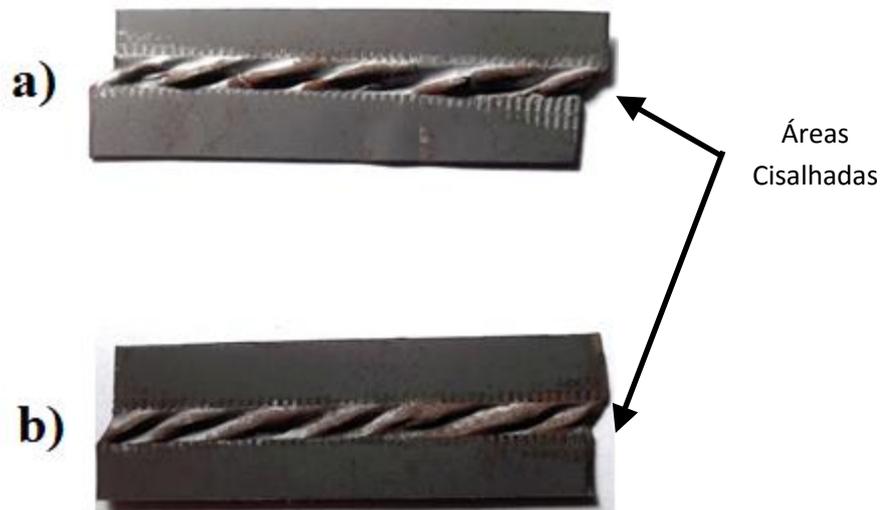
Fonte: O AUTOR

Por meio dos gráficos plotados, a partir dos dados do ensaio, pode-se determinar tensão efetiva máxima registrada e a tensão ao final do ensaio:

- Para a amostra como recebido, a tensão máxima registrada foi de 483 MPa, obtida à 10,08% de deformação efetiva. Ao final do ensaio, a tensão registrada foi de 472 MPa a 35,01% de deformação efetiva;
- E, para a amostra tratada termicamente, a tensão máxima registrada foi de 505 MPa, obtida à 42,65% de deformação efetiva. Ao final do ensaio, a tensão registrada foi de 441 MPa a 47,53% de deformação efetiva.

Observou-se uma intensa formação da casa de laranja decorrente da elevada deformação efetiva que o material foi submetido, Figura 36. Neste caso, a formação da casca de laranja foi mais intensa na amostra que apresentou uma maior deformação efetiva.

Figura 36 – Aspecto superficial dos corpos de prova após o cisalhamento direto, a) tratado termicamente e b) como recebido

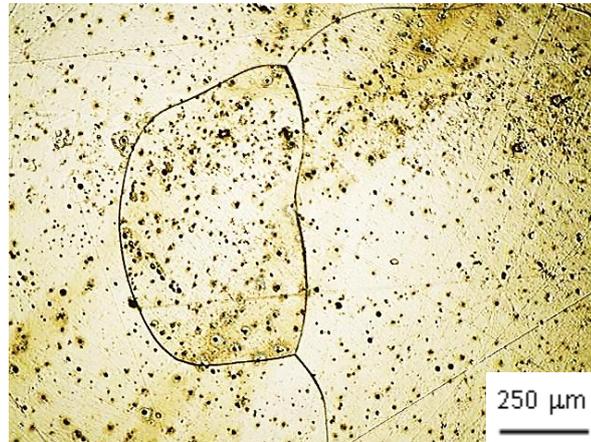


Fonte: O AUTOR

5.1.3 Micrografia

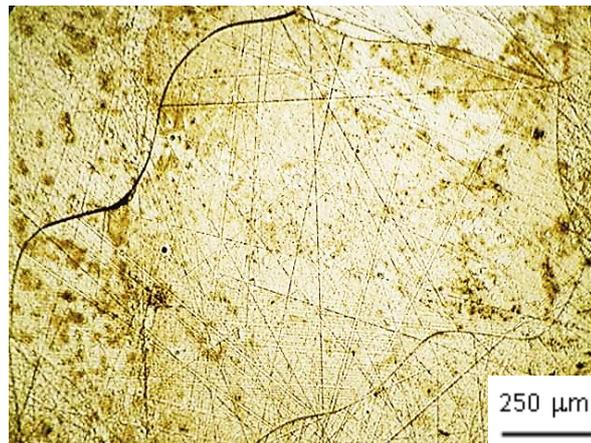
As imagens, Figura 37 e Figura 38, apresentam as fotomicrografias das amostras de aço GO nas condições como recebido e tratado termicamente.

Figura 37 - Aço GO como recebido - Atacado com Nital 5% por 6 minutos



Fonte: O AUTOR

Figura 38 - Aço GO Tratado Termicamente - Atacado com Nital 5% por 5 minutos



Fonte: O AUTOR

Percebe-se pelas imagens da micrografia o pronunciado tamanho de grão do material. Utilizando a menor ampliação disponível, 40X, não era possível de obter todo o contorno de grão devido à suas dimensões.

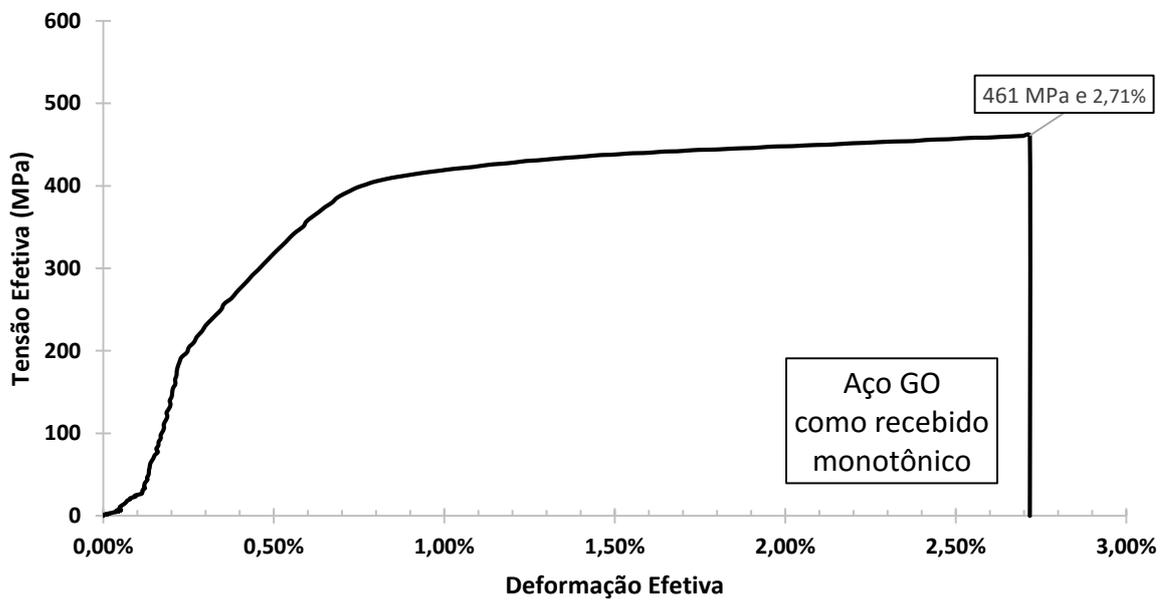
Os resultados da micrografia e do ensaio de microdureza indicam que o material tratado termicamente não sofreu mudanças perceptíveis em sua microestrutura, como a deposição ou mudança de fase ou alteração do tamanho e formato do grão.

5.2 Condição de carregamento: Cisalhamento direto

As amostras do aço GO como recebido e tratada termicamente foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

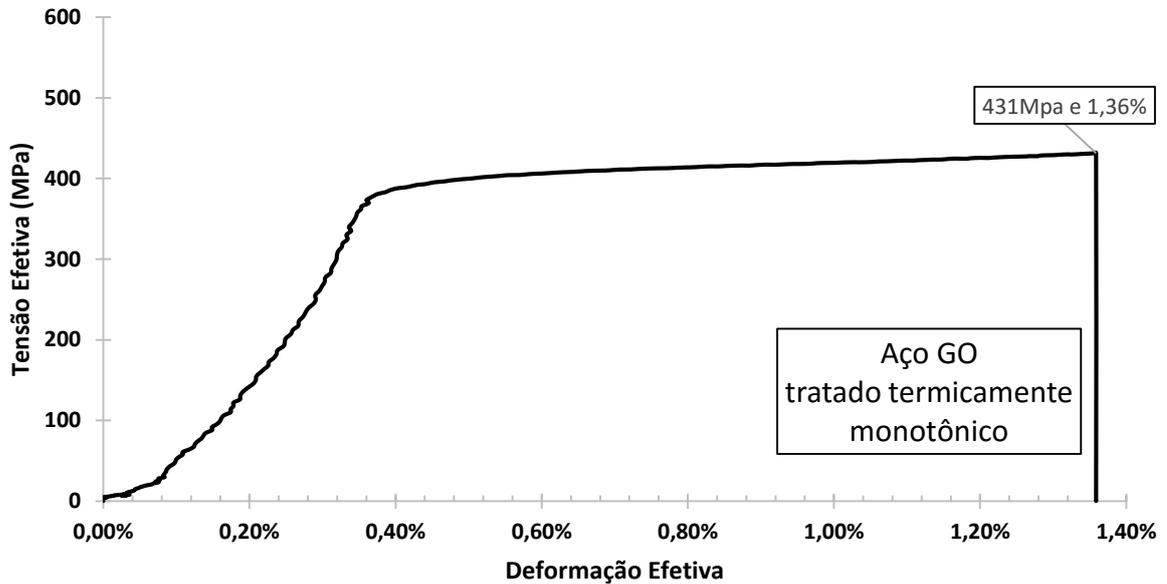
As Figura 39 e Figura 40, demonstram o resultado do ensaio de cisalhamento por meio da tensão e deformação das amostras.

Figura 39 – Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO como recebido



Fonte: O AUTOR

Figura 40 – Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO tratado termicamente



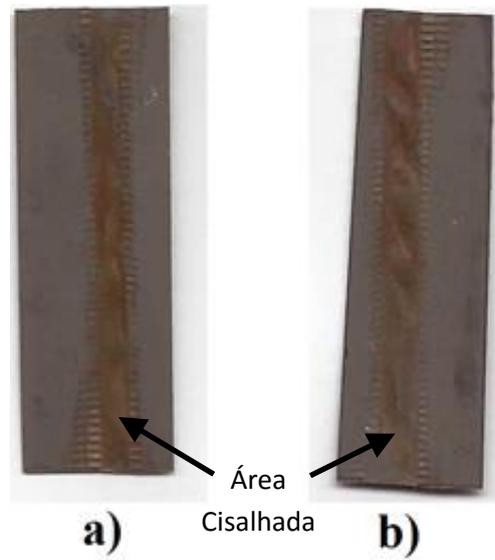
Fonte: O AUTOR

Por meio dos gráficos plotados, a partir dos dados do ensaio, pode-se determinar a deformação efetiva de cada uma das amostras:

- 2,72% ou 5,00% de deformação cisalhante para a amostra como recebido;
- 1,36% ou 2,50% de deformação cisalhante para a amostra tratada termicamente.

Como resultado do ensaio, evidenciou-se a formação da casca de laranja nos corpos de prova, caracterizada pela intensa rugosidade superficial na região delimitada pelas garras, Figura 41.

Figura 41 – Aspecto superficial dos corpos de prova a) como recebido e b) tratado termicamente após o ensaio de cisalhamento direto



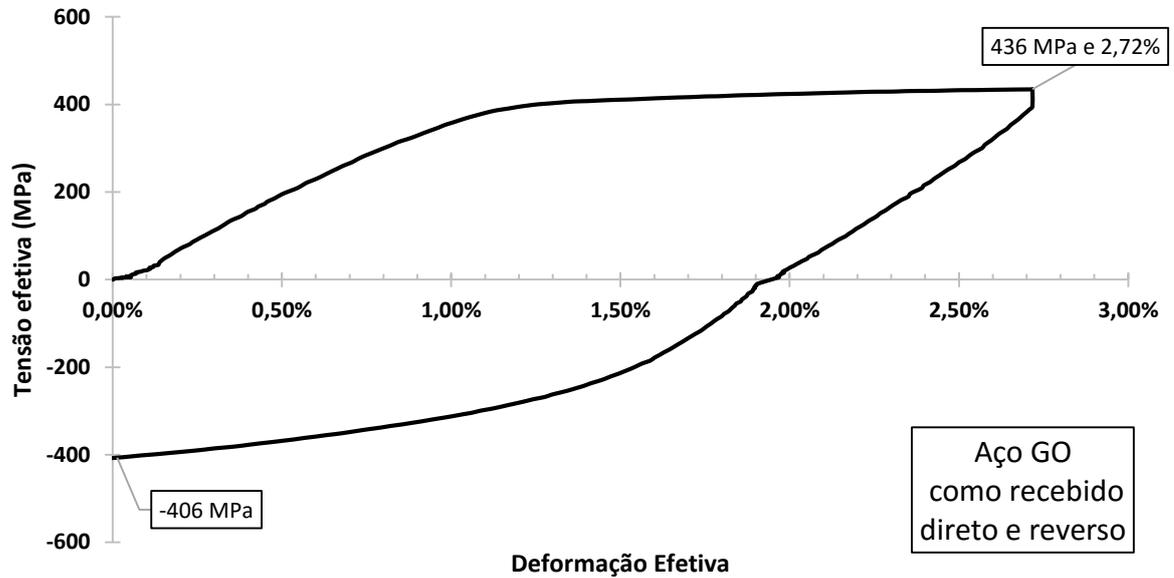
Fonte: O AUTOR

5.3 Condição de carregamento: cisalhamento direto e reverso

As amostras do aço GO como recebido e tratada termicamente foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto e reverso.

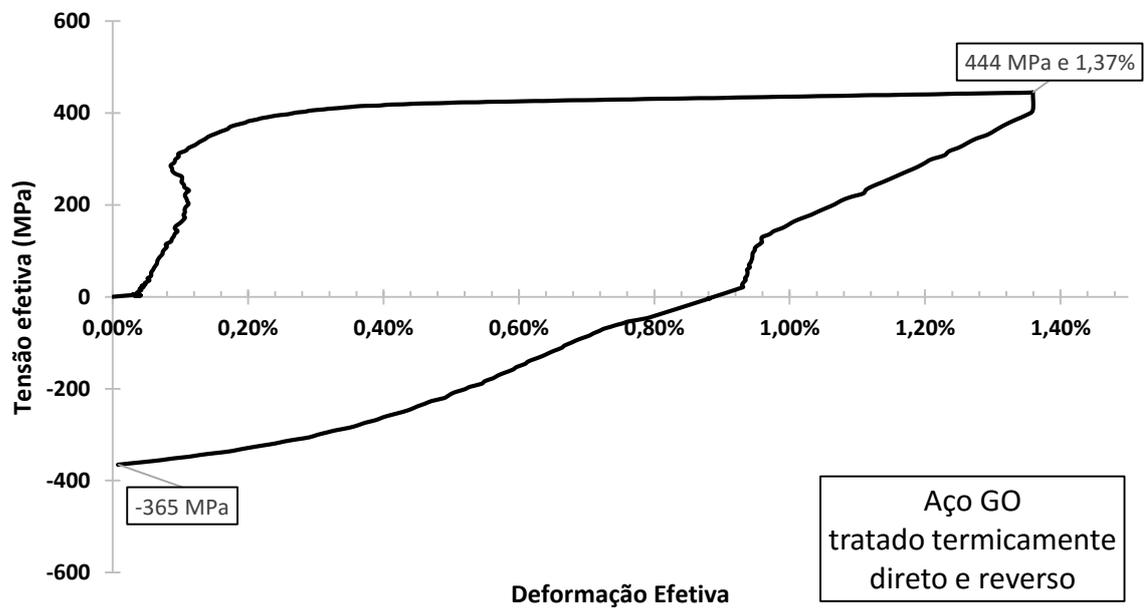
As Figura 42 e Figura 43, demonstram o resultado do ensaio de cisalhamento através da deformação efetiva e tensão efetiva das amostras.

Figura 42 - Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO como recebido



Fonte: O AUTOR

Figura 43 - Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO tratado termicamente



Fonte: O AUTOR

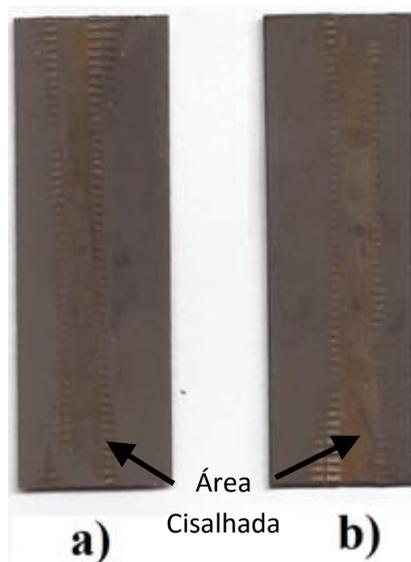
Por meio dos gráficos plotados, a partir dos dados do ensaio, pode-se determinar a deformação efetiva de cada uma das amostras:

- 2,72% ou 5,00% de deformação cisalhante para a amostra como recebido;
- 1,37% ou 2,50% de deformação cisalhante para a amostra tratada termicamente.

Como resultado do ensaio, evidenciou-se a formação da casca de laranja nos corpos de prova, caracterizada pela intensa rugosidade superficial na região delimitada pelas garras, Figura 44. Entretanto, devido ao carregamento reverso ter sido aplicado, ocorreu a suavização do efeito de casca de laranja, se comparado com as amostras que foram submetidas apenas ao cisalhamento direto.

Além disso, fica-se evidente a ocorrência do efeito Bauschinger no material. Caracterizado pela tensão efetiva no sentido reverso de deformação ser consideravelmente menor do que no sentido direto.

Figura 44 – Aspecto superficial dos corpos de prova a) como recebido e b) tratado termicamente após o ensaio de cisalhamento direto e reverso



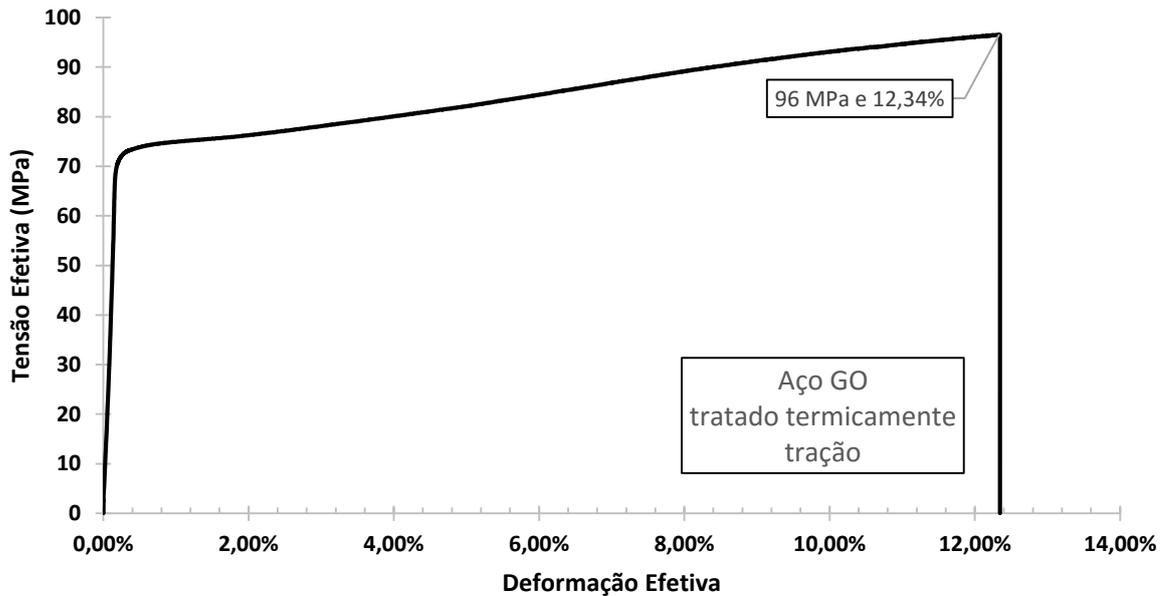
Fonte: O AUTOR

Observa-se que o aço de grão orientado apresenta uma deformação anisotrópica, caracterizada pela tensão efetiva ao final do cisalhamento reverso ser menor do que a deformação ao final do cisalhamento direto.

5.4 Condição de carregamento: Tração

A amostra tratada termicamente foi submetida ao ensaio de tração uniaxial. A Figura 45, demonstra o resultado do ensaio de tração através da deformação efetiva e tensão efetiva.

Figura 45 – Curva tensão-deformação efetiva - Aço GO tratado termicamente



Fonte: O AUTOR

Por meio do gráfico plotado, a partir dos dados do ensaio, pode-se determinar a deformação efetiva da amostra:

- 12,34 % para a amostra tratada termicamente.

Como resultado do ensaio, evidenciou-se a formação da casca de laranja no corpo de prova, caracterizada pela intensa rugosidade superficial na região delimitada pelas garras. Entretanto, como o corpo de prova foi submetido a deformações mais acentuadas do que os corpos de prova de cisalhamento, houve desprendimento das camadas de óxido do material, evidenciado pela diferença na cor e rugosidade da amostra, Figura 46.

Figura 46 – Aspecto superficial do corpo de prova após o ensaio de tração



Fonte: O AUTOR

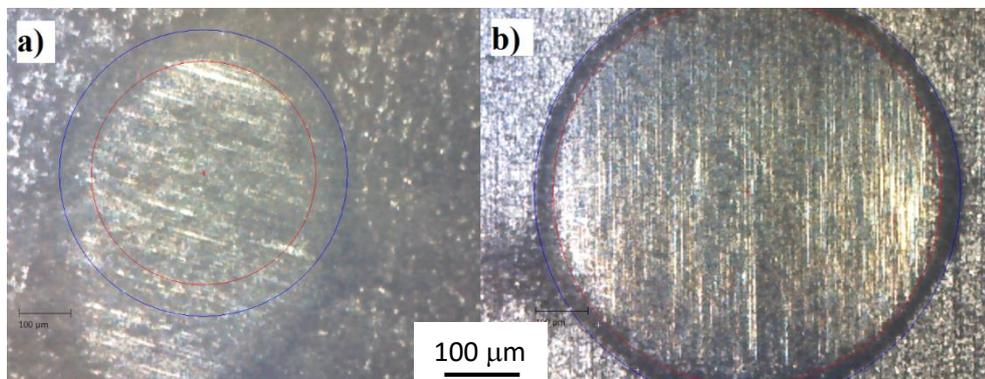
5.5 Ensaio de desgaste

O ensaio de desgaste microabrasivo, inicialmente, foi planejado com o intuito de mensurar o desgaste na região delimitada pelas garras do ensaio de cisalhamento, pois a solicitação mecânica, nesta região, devido ao ensaio de cisalhamento, foi mais intensa.

Entretanto, quando o ensaio de desgaste foi realizado na região entre as garras, devido ao elevado nível de distorções superficiais, caracterizada pelo fenômeno da casca de laranja, não foi possível mensurar o desgaste da região, pois não foi encontrado modelo matemático confiável para determinar o desgaste associado à impressão gerada.

A impressão gerada na região entre garras apresentou uma forma elíptica, enquanto as áreas que não apresentam tamanha distorção na rugosidade superficial apresentam uma impressão circular, causada pela calota esférica, Figura 47.

Figura 47 – Impressão a) elíptica e impressão esférica b)



Fonte: O AUTOR

Portanto, de forma a determinar indícios de alterações das propriedades mecânicas nas amostras e mensura-las através do ensaio microabrasivo, as medições foram realizadas nas regiões próximas às indentações das garras, Figura 48.

Figura 48 – Região próxima à indentação das garras



Fonte: O AUTOR

A amostra do aço como recebido, submetida ao cisalhamento direto e reverso, foi a única em que foi possível realizar as medições na região interna à indentação das garras, sem que se fosse observada uma impressão elíptica. De forma a comprar os resultados obtidos, o ensaio, para esta amostra em específico, foi realizado na região delimitada pelas indentações assim como na região externa próxima.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos corpos de prova de forma a elucidar os parâmetros utilizados para cada amostra testada.

Tabela 5 - Resumo das amostras

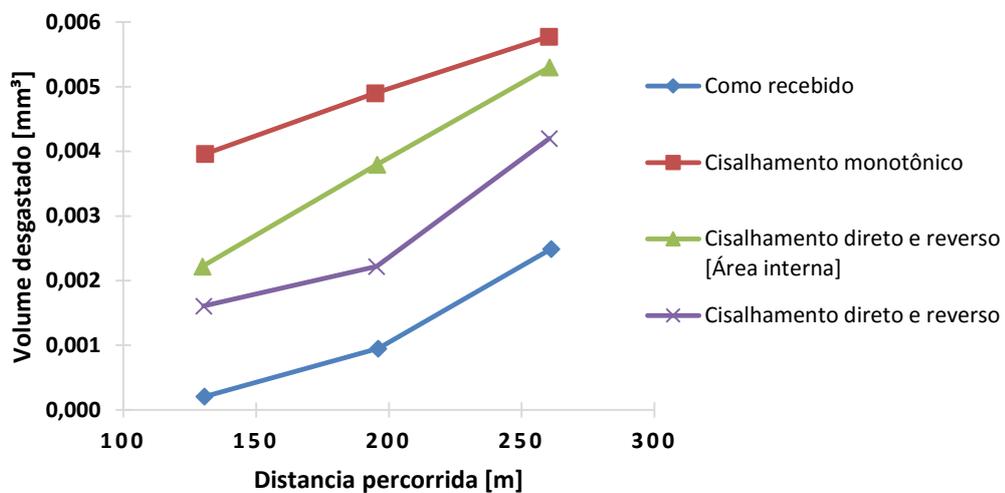
Condição	Processamento	Deformação efetiva
Como recebido	Como recebido	Como recebido
Como recebido	Cisalhamento direto	2,71%
Como recebido	Cisalhamento direto e reverso	2,72%
Tratado termicamente	Cisalhamento direto	1,36%
Tratado termicamente	Cisalhamento direto e reverso	1,37%
Tratado termicamente	Tração uniaxial	12,34%

Fonte: O AUTOR

5.5.1 Efeito do carregamento direto, e direto e reverso nas amostras não tratadas termicamente

A Figura 49 demonstra o resultado do ensaio de desgaste em termos do volume desgastado do material em relação à distância percorrida pela esfera, para as amostras não tratadas termicamente.

Figura 49 – Gráfico volume desgastado-distância percorrida – Amostras não tratadas termicamente



Fonte: O AUTOR

Após a linearização dos pontos obtidos, é possível determinar a taxa de desgaste de cada amostra pelo coeficiente angular da reta linearizada, Tabela 6.

Tabela 6 – Taxa de desgaste - Amostras não tratadas termicamente

Condição	Processamento	Deformação efetiva	Taxa de Desgaste [mm³/mm]
Como recebido	Como recebido	Como recebido	$1,74 \times 10^{-8}$
Como recebido	Cisalhamento direto	2,71%	$1,40 \times 10^{-8}$
Como recebido	Cisalhamento direto e reverso	2,72%	$2,36 \times 10^{-8}$ (Região interna)
			$1,99 \times 10^{-8}$

Fonte: O AUTOR

As amostras que sofreram processamento mecânico apresentaram um volume desgastado inicial maior do que o material como recebido.

A amostra cisalhada diretamente, em relação ao material como recebido, apresentou uma taxa de desgaste, aproximadamente, 20% menor. A amostra, ao ser submetida ao cisalhamento monotônico, foi deformada plasticamente, e isso ocasionou no encruamento do material e, conseqüentemente, no aumento da dureza.

A amostra submetida ao cisalhamento monotônico apresentou uma taxa de desgaste inferior à amostra cisalhada direta e reversamente, o que era esperado. O cisalhamento direto, em relação ao direto e reverso, provoca uma distorção maior da microestrutura devido ao fato de parte da deformação mecânica não ser recuperada no momento do cisalhamento reverso.

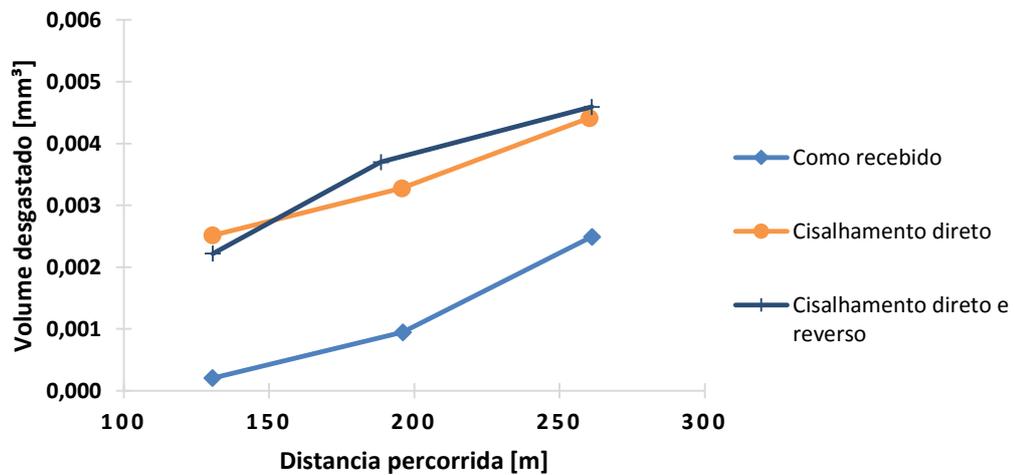
Além disso, a amostra cisalhada direta e reversamente, devido ao efeito Bauschinger, apresentou uma redução na sua dureza, que pode ser observada pelo aumento da taxa de desgaste do material, de 14% a 36% dependendo da região ensaiada.

Foi possível mensurar a taxa de desgaste de duas regiões da amostra submetida ao cisalhamento direto e reverso na região externa e na interna às garras de cisalhamento. Observou-se que na região interna às garras a taxa de desgaste foi maior do que na região externa, o que era esperado. A região interna concentrou a sollicitação mecânica e, conseqüentemente, maior intensidade do efeito Bauschinger.

5.5.2 Efeito do carregamento direto, e direto e reverso nas amostras tratadas termicamente

A Figura 50 demonstra o resultado do ensaio de desgaste em termos do volume desgastado do material em relação à distância percorrida pela esfera, para as amostras tratadas termicamente.

Figura 50 - Gráfico volume desgastado-distância percorrida – Amostras tratadas termicamente



Fonte: O AUTOR

Após a linearização dos pontos obtidos, é possível determinar a taxa de desgaste de cada amostra pelo coeficiente angular da reta linearizada, Tabela 7.

Tabela 7 - Taxa de desgaste – Amostras tratadas termicamente

Condição	Processamento	Deformação efetiva	Taxa de Desgaste [mm ³ /mm]
Como recebido	Como recebido	Como recebido	$1,74 \times 10^{-8}$
Tratado termicamente	Cisalhamento direto	1,36%	$1,46 \times 10^{-8}$
Tratado termicamente	Cisalhamento direto e reverso	1,37%	$1,79 \times 10^{-8}$

Fonte: O AUTOR

O gráfico indica que as amostras que sofreram processamento mecânico apresentaram um volume desgastado inicial maior do que o material como recebido.

A amostra cisalhada diretamente, conforme esperado, apresentou menor taxa de desgaste, aproximadamente 16%, em relação ao material recebido, devido ao encruamento do material resultante da deformação plástica da amostra.

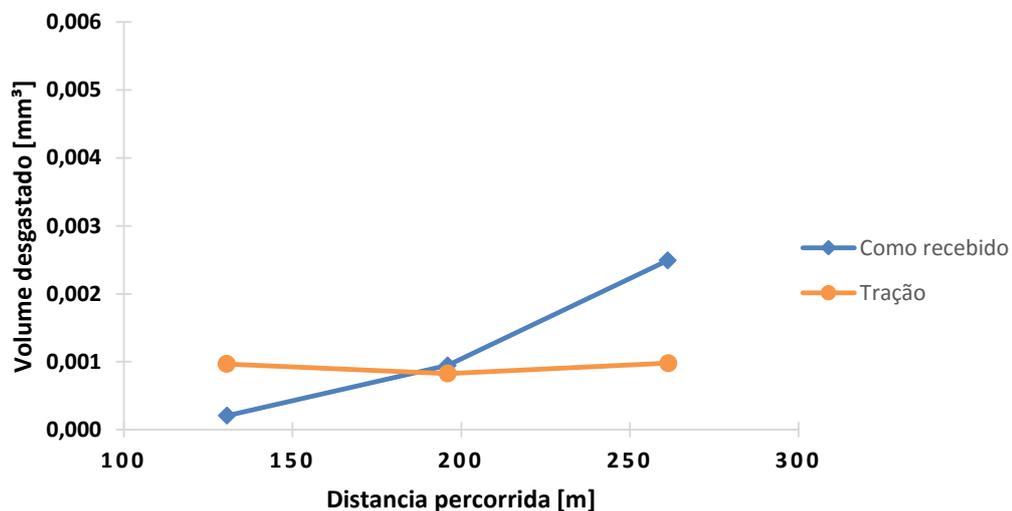
A amostra submetida ao cisalhamento monotônico apresentou, novamente, uma taxa de desgaste inferior à amostra cisalhada direta e reversamente de, aproximadamente, 19%.

O material cisalhado direto e reversamente apresentou uma taxa de desgaste ligeiramente maior, 3%, do que o material como recebido, devido ao amaciamento do material pelo efeito Bauschinger.

5.5.3 Efeito do ensaio de tração no material

A Figura 51, demonstra o resultado do ensaio de desgaste em termos do volume desgastado do material em relação à distância percorrida pela esfera, para a amostra submetida ao ensaio de tração uniaxial.

Figura 51 - Gráfico volume desgastado-distância percorrida - Tração



Fonte: O AUTOR

Após a linearização dos pontos obtidos, é possível determinar a taxa de desgaste da amostra pelo coeficiente angular da reta linearizada, Tabela 8.

Tabela 8 - Taxa de desgaste - Tração

Condição	Processamento	Deformação efetiva	Taxa de Desgaste [mm ³ /mm]
Como recebido	Como recebido	Como recebido	$1,74 \times 10^{-8}$
Tratado termicamente	Tração uniaxial	12,34%	$8,91 \times 10^{-11}$

Fonte: O AUTOR

Observa-se que a amostra submetida ao ensaio de tração apresentou uma taxa de desgaste significativamente menor do que o material como recebido.

Isso pode ser explicado pela elevada deformação efetiva que a amostra foi submetida e, conseqüentemente, ao encruamento resultante desta deformação, que acarretou no endurecimento do material. Sendo que a contribuição do tratamento térmico para que a amostra apresentasse uma baixa taxa de desgaste pode ser considerada desprezível, pois não há evidências da alteração da microestrutura ou dureza.

Por outro lado, analisando-se o coeficiente de correlação de Person de 0,0047, referente à linearização dos pontos, percebe-se que a amostra submetida ao ensaio de tração não se adequa ao modelo de Archard. O modelo proposto por Archard considera que o desgaste do material é diretamente proporcional ao tempo ou comprimento de deslizamento. Entretanto, nesta amostra, isso não foi observado.

Uma provável causa para a não adequação ao modelo é o fato do contato da esfera com a superfície da amostra tracionada ser menor, em relação a amostra como recebido, pois na amostra deformada em tração o material exibiu mais irregularidades na superfície devido à presença da casca de laranja. Entretanto, é necessário realizar mais ensaios e estudos para se explicar definitivamente o ocorrido.

5.5.4 Efeito do percentual de deformação efetiva e do tratamento térmico nas amostras

Tabela 9 consolida os resultados de todas as amostras ensaiadas em termos da taxa de desgaste.

Tabela 9 - Taxa de desgaste – Todas as amostras

Condição	Processamento	Deformação efetiva	Taxa de Desgaste [mm³/mm]
Como recebido	Como recebido	Como recebido	1,74x10⁻⁸
Como recebido	Cisalhamento direto	2,71%	1,40x10⁻⁸
Como recebido	Cisalhamento direto e reverso	2,72%	2,36x10⁻⁸ (Região interna)
			1,99x10⁻⁸
Tratado termicamente	Cisalhamento direto	1,36%	1,46x10⁻⁸
Tratado termicamente	Cisalhamento direto e reverso	1,37%	1,79x10⁻⁸
Tratado termicamente	Tração uniaxial	12,34%	8,91x10⁻¹¹

Fonte: O AUTOR

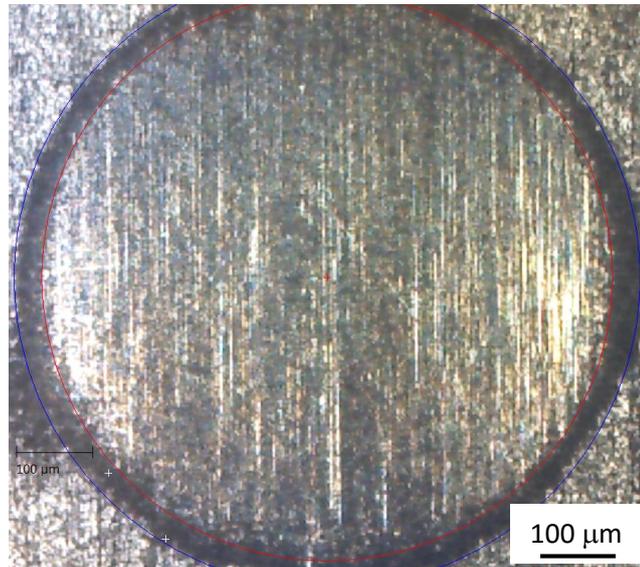
Observa-se que as amostras que apresentam uma menor taxa de desgaste foram aquelas submetidas ao ensaio de cisalhamento monotônico e ensaio de tração. A deformação efetiva está relacionada ao inverso da taxa de desgaste para essas amostras. Ou seja, quanto maior a deformação efetiva, menor a taxa de desgaste resultante.

As amostras submetidas ao cisalhamento direto e reverso, diferentemente das outras, apresentam uma relação contrária. Quanto maior a deformação efetiva, maior a taxa de desgaste. Isso ocorre porque uma maior deformação efetiva no cisalhamento direto e reverso provoca um amaciamento maior do material por causa do efeito Bauschinger.

5.5.5 A camada superficial de óxido

O ensaio é capaz de fornecer dados referentes à espessura de possíveis recobrimentos existentes no material. Utilizando as dimensões das impressões deixadas pela calota esférica após o ensaio, Figura 52, e com auxílio da Equação 5, obtêm-se as espessuras das camadas de óxido para as amostras analisadas.

Figura 52 - A relação entre diâmetros das circunferências fornece a espessura da camada que recobre o material



Fonte: O AUTOR

Como as amostras utilizadas não foram submetidas a nenhum procedimento visando a deposição de material na respectiva superfície, é plausível de se afirmar que a espessura da camada mais externa mensurada é relativa ao óxido do material.

A Tabela 10 exhibe o resultado da espessura média da camada superficial em relação ao bulk para cada amostra ensaiada.

Tabela 10 - Espessura média da camada superficial – Todas as amostras

Condição	Processamento	Deformação efetiva	Espessura da camada [μm]
Como recebido	Como recebido	Como recebido	$0,78 \pm 0,32$
Como recebido	Cisalhamento direto	2,71%	$1,72 \pm 0,16$
Como recebido	Cisalhamento direto e reverso	2,72%	$2,02 \pm 0,36$ (Região Interna)
			$1,57 \pm 0,42$
Tratado termicamente	Cisalhamento direto	1,36%	$1,65 \pm 0,18$
Tratado termicamente	Cisalhamento direto e reverso	1,37%	$1,63 \pm 0,21$
Tratado termicamente	Tração uniaxial	12,34%	$0,72 \pm 0,24$

Fonte: O AUTOR

Nota-se que, com exceção do material submetido ao ensaio de tração, todas as amostras apresentaram um incremento na espessura da camada superficial. Sendo que a amostra do material como recebido e submetido ao ensaio de cisalhamento direto e reverso o que obteve a maior espessura média registrada.

Entretanto, vale salientar que o aço GO é caracterizado pelo seu tamanho de grão tipicamente grande (>150 um) e, conseqüentemente, maior susceptibilidade ao defeito superficial da casca de laranja, sendo esta responsável por alterar a rugosidade da superfície do material.

Portanto, é comum associar que o incremento da espessura da camada superficial mensurada esteja mais relacionado à formação de ondulações decorrente da formação da casca de laranja do que devido à formação e à deposição de óxidos decorrentes do tratamento térmico, por exemplo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a formação da imperfeição superficial “casca de laranja” para o aço de grão orientado (GO) em função de diferentes condições de processamento, representado pelo ensaio de cisalhamento monotônico, cisalhamento direto e reverso e ensaio de tração, e em quantidades diferentes de deformação plástica.

As amostras ensaiadas também foram submetidas a um tratamento térmico à temperatura de 650°C por 15 minutos com posterior resfriamento em água, com o objetivo de verificar se haveria alguma mudança expressiva na dureza e na taxa de desgaste.

Após a execução dos ensaios e da análise dos resultados conclui-se que:

- a) não foi perceptível nenhuma alteração na microestrutura e na microdureza superficial do material após este ser submetido ao tratamento térmico.
- b) a formação da casca de laranja, para as mesmas condições de processamento, depende, fundamentalmente, da quantidade de deformação plástica do material.
- c) o fenômeno da casca de laranja apresentou-se visivelmente aparente na superfície do material após o cisalhamento de 1,36% (deformação efetiva) ou 2,50% de deformação cisalhante.
- d) o material ao ser submetido ao cisalhamento direto e reverso apresentou, visivelmente, uma superfície mais suave do que quando deformado monotonicamente em cisalhamento.
- e) a ocorrência do efeito Bauschinger foi observada após a condução do cisalhamento direto e reverso.
- f) a formação da casca de laranja dificultou a identificação da taxa de desgaste pelo fato de essa imperfeição superficial ter ocasionado irregularidades na superfície da chapa (ondulações).

- g) para os parâmetros descritos na metodologia, a taxa de desgaste para este aço GO, na condição como recebido (laminado), foi de $1,74 * 10^{-8} \text{mm}^3/\text{mm}$.
- h) as amostras submetidas ao cisalhamento monotônico apresentaram uma relação inversamente proporcional da deformação efetiva com a taxa de desgaste: quanto maior a quantidade de deformação plástica em cisalhamento, menor foi a taxa de desgaste encontrada, sendo isso associado ao encruamento do material à medida que o mesmo foi deformado plasticamente.
- i) em contrapartida, as amostras submetidas ao cisalhamento direto e reverso apresentaram uma relação diretamente proporcional da deformação efetiva com a taxa de desgaste do material. Quanto maior a quantidade de deformação efetiva, maior foi a respectiva taxa de desgaste, sendo isso explicado pelo efeito Bauschinger, que ocasionou o amaciamento do material.
- j) a taxa de desgaste do material tratado termicamente e em seguida tracionado foi menor que a observada para o material sem nenhum tipo de deformação plástica, apenas no estado como recebido.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTON PAAR TRITEC SA. **Calowear**. [201-?]. Disponível em: <<http://www.csm-instruments.com/en/Calowear>>. Acesso em: 21 fev. 2016.

APERAM SOUTH AMERICA. **Aços Elétricos de Grão Orientado de Grão Não-Orientado**. 2012. Disponível em: <www.aperam.com/brasil/port/arquivos/CatalogoAcosEletricosPORT.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2015.

ARCHARD, J. F. Wear Theory and Mechanisms. In: PETERSON, M. B.; WINER, W. O. **Wear Control Handbook**. Nova Iorque: ASME, 1980. Cap. 4, p. 35-80. Disponível em: <<http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/S2015/FWLM/OtherSuppMtls/Archard-WearControlHandbook.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

BOTELHO, R. A. **Laminações Assimétricas e Propriedades de Aços Elétricos GNO com 3,0% de Silício**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2012. Disponível em: <www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/Dissertacao_Ramon.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015.

BRESCIANI FILHO, Ettore et al. **Conformação Plástica dos Metais**. São Paulo: Epusp, 2011. 258 p. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2015.

BUENO, Eduardo Weigelt. **Desempenho superficial de barras laminadas redondas de aço SAE 1043 frente às variáveis de condicionamento de tarugos, temperatura de laminação e uso do descarepador**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/71099/000878521.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 maio 2015.

BOUVIER, S. et al. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. **Journal Of Materials Processing Technology**, Villetaneuse, France, n. 172, p.96-103, fev. 2006. Disponível em: <[222956954_Simple_shear_tests_Experimental_techniques_and_characterization_of_the_plastic_anisotropy_of_rolled_sheets_at_large_strains](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924646005000000)>. Acesso em: 07 jun. 2015.

BUDINSKI, G. KENNETH. **Surface engineering for wear resistance**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988. Apud RIJEZA METALURGIA. **Mecanismos de desgaste**. [S.l.]: [s.n.], [201-?]. Disponível em: <<http://www.rjeza.com.br/download/file/fid/419>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

CASTRO, Júlia Rocha de. **Estudo da propriedade magnética e do arranjo microestrutural assumidos pelo aço gno para diferentes condições de corte de chapa**. 2015. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1990.

COTTRELL, A. H. **Dislocations and plastic flow in crystals**. Oxford University Press, p. 111 e 132, 1953 apud In HAUS, Siedro. **Influência do Efeito Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência**. 2011. 92f. Tese (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26968/Dissertacao_127_Siedro%20Augusto%20Haus5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 mar. 2016

CSM Instruments. **Instrumented Indentation, Scratch and Tribology**. [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <<http://www.gruppofrattura.it/iphone/supporto2013/CSM/1.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

FERREIRA, Rafael Soares. **Detecção de defeitos em chapas de aço laminado via redes neurais**. 2008. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em: <http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2008/RAFAEL_SOARES_FERREIRA.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2015.

GRUBB, JOHN. **Materials selection considerations for corrosive wear situations**. [S.l.]: [s.n.], [2011]. Disponível em: <https://www.atimetals.com/news/corrosion-conference/Documents/CSC11-pdfs/presentation_5e_grubb.pdf>. Acesso em: 27 abr. 15.

HUTCHINGS, I.M.; RUTHERFORD, K.L. Theory and Application of a Micro-Scale Abrasive Wear Test. **Journal Of Testing And Evaluation**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.250-60, mar. 1997. ASTM International. Apud COZZA, R.c.; TANAKA, D.k.; SOUZA, R.m.. Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure — Preliminary results. **Wear**, [s.l.], v. 267, n. 1-4, p.61-70, jun. 2009. Elsevier BV. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164809002464>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

INDUSTRIAL METALLURGISTS, LLC., **Casca de Laranja**, 2014. Disponível em: <<http://www.imetllc.com/tag/orange-peel/>>. Acesso em: 18 jun. 2016

KOPELIOVICH, D. **Mechanisms of wear**. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear>. Acesso em: 21 abr. 2015.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. In: BOTT, I.; RIOS, P.; PARANHOS, R. **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos**. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2002. p. 109-128. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/academic/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20%20recope%20.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

MOSES, A. J. **Energy efficient electrical steels: Magnetic performance prediction and optimization**, v. 67, n. 6, p. 560-565, 24 Fevereiro 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646212001297>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

NUNES, Rogério A. X.; SADE, Wagner; BRANCO, José Roberto T. Atrito e desgaste de recobrimentos de PET, politeraftalato de etileno, pós-consumo processados por aspersão térmica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 17, n. 3, p. 244-249, set. 2007 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282007000300015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 mar. 2016.

PALMEIRA, Alexandre Alvarenga. **Processos de Laminação**. Resende: UFRJ, 2005. 54 p. Apostila da disciplina de Processos de Fabricação IV do curso de engenharia de produção. Disponível em: <<http://www.fat.uerj.br/intranet/disciplinas/Processos%20de%20Fabricacao%20IV/Cap%203%20-%20Lamina%E7%E3o.pdf>>. Acesso em: 04 maio 2015.

RADI, P. A. et al.. **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA ,13., 2007, São José dos Campos. Anais eletrônicos... São José dos Campos: [s.n.], 2007. p.13. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/66537526/tribologiaITA>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

RAUCH, E.f. Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. **Materials Science And Engineering**, Saint-martin-d'hères, v. 241, n. 1-2, p.179-183, jan. 1998. Elsevier BV. DOI: 10.1016/s0921-5093(97)00486-3. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509397004863>>. Acesso em: 07 jun. 2015.

RIJEZA METALURGIA. **Mecanismos de desgaste**. [S.l.]: [s.n.], [201-?]. Disponível em: <<http://www.rijeza.com.br/download/file/419>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processos de laminação dos aços: uma introdução**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 254 p.

SAAD, F. Usos de aço-silício. **Manutenção & Suprimentos**, 2012. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6401-usos-de-aco-silicio/>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

SALINAS-BELTRÁN, J. et al. Effects of processing conditions on the final microstructure and magnetic properties in non-oriented electrical steels. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**, [s.l.], v. 406, p.159-165, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.01.017>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885316300166>>. Acesso em: 17 maio 2016.

SERANTONI, Claudia Regina. **Cilindros de Laminação**. [s.l.]: [s.n.], [2009?]. 104 slides, color. Disponível em: <moodle.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=42612>. Acesso em: 04 mai. 2015.

SOARES, Cândido Moreira. **Análise de Bobines de Aço em Serviços Siderúrgicos**. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60111/1/000134661.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2015.

STOETERAU, R. L.; LEAL, L. D. C. **Tribologia**. [s.l.]: [s.n.], 2004. 179 p. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgC44AH/tribologia-lubrificacao-tribologia-final-v4>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

YAN, Jun. **Study of Bauschinger Effect in various spring steels**. Tese (Mestrado), Universidade de Toronto, 1998, apud In HAUS, Siedro. **Influência do Efeito Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência**. 2011. 92f. Tese (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26968/Dissertacao_127_Siedro%20Augusto%20Haus5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 mar. 2016