

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE NAVALHAS
DE AÇO AISI S1 E SAE 4340 DURANTE O CORTE DE SUCATA

Adriano de Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE NAVALHAS
DE AÇO AISI S1 E SAE 4340 DURANTE O CORTE DE SUCATA

ADRIANO DE OLIVEIRA
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre
2008

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich, UNISINOS

Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski, PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico esta dissertação a minha esposa e família, pelo incentivo, paciência e cooperação e a meu filho por me mostrar outros aspectos da vida que promoveram o meu desenvolvimento como pessoa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe que sempre foi obstinada em garantir o acesso dos filhos ao conhecimento, mesmo com todas as dificuldades que enfrentou. Dela herdei a valorização ao conhecimento e a persistência na busca dos objetivos.

Ao meu pai agradeço pelo exemplo de paixão pelo trabalho que faz e por mostrar de forma sutil a cada ano que passava, que em geral os melhores caminhos são tão simples, que por vezes nem acreditamos.

A minha esposa pelo amor com que sempre me recebeu e pelo apoio incondicional, mesmo nos momentos de maior dificuldade e que não foram poucos.

A minha irmã e meu irmão pelo companheirismo e amizade que sempre tivemos e pela coragem em enfrentar as dificuldades.

A todos os professores que durante a escola e universidade transmitiram seu conhecimento com habilidade e afeto e desta forma despertaram a curiosidade e a vontade de buscarmos o conhecimento sem receio de enfrentar as dificuldades.

A todas as pessoas que ainda acreditam que podemos fazer deste mundo um local para se viver com mais justiça e esperança.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1.0 INTRODUÇÃO	1
1.1 Corte e limpeza de sucata na prensa tesoura.....	1
1.2 Interrupções no processamento de sucata na prensa tesoura.....	6
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Desgaste.....	8
2.1.1 Abrasão.....	9
2.1.1.1 Abrasão a baixas tensões.....	9
2.1.1.2 Abrasão a altas tensões.....	9
2.1.1.3 Gouivadura.....	10
2.1.1.4 Polimento.....	10
2.1.2 Erosão.....	10
2.1.2.1 Erosão por choque sólido.....	10
2.1.2.2 Erosão por choque líquido.....	11
2.1.2.3 Cavitação.....	11
2.1.2.4 Erosão por lodo.....	12
2.1.3 Adesão.....	12
2.1.3.1 Vibrações na interface.....	12

2.1.3.2	Desgaste adesivo.....	12
2.1.3.3	Emperramento.....	12
2.1.3.4	Escoriação.....	13
2.1.3.5	Desgaste oxidativo.....	13
2.1.4	Fadiga superficial.....	13
2.1.4.1	Desgaste por cratera.....	13
2.1.4.2	Lascamentos.....	14
2.1.4.3	Desgaste por impacto.....	14
2.1.4.4	Desgaste por pequenas impressões.....	14
2.2	Mecanização do processamento de sucata.....	14
2.3	Pátio de sucata	15
2.3.1	Descrição das etapas de processamento no pátio de sucata.....	16
2.4	Distribuição de forças em navalhas paralelas durante o corte	23
2.5	Aços empregados para a fabricação de navalhas e seus desempenhos.....	25
2.5.1.	Aços CrNiMoV e CrNiMoWV.....	25
2.5.2.	Aço AISI D2.....	35
2.5.3	Aços CW (CRU-WEAR).....	36
3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1	Tratamento térmico	39
3.2	Caracterização metalúrgica.....	41
3.3	Medição do desgaste.....	42
3.4	Amostragem e restrições no processamento da sucata.....	44
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.0	CONCLUSÕES	59

6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Prensa tesoura Harris BSH 1123 da Aços Especiais Charqueadas e as 7 etapas do processo.....	2
Figura 1.2	Abastecimento da bandeja da prensa.....	3
Figura 1.3	Compactação da sucata previamente ao seu corte.....	3
Figura 1.4	Corte da sucata pelas navalhas da prensa tesoura.....	4
Figura 1.5	Transporte da sucata já cortada até o tambor rotativo.....	4
Figura 1.6	Remoção das impurezas da sucata no tambor rotativo.....	5
Figura 1.7	Separação magnética dos finos de sucata remanescentes do tamboramento.....	5
Figura 1.8	Pareto das interrupções na prensa tesoura no período de 2004 a 2005.....	6
Figura 1.9	Pareto apresentando a caixa da prensa como a parte do equipamento com maior índice de interrupções operacionais no período de 2004 a 2005.....	7
Figura 1.10	Pareto apresentando as navalhas da prensa como o componente da caixa da prensa com maior índice de interrupções operacionais no período de 2004 a 2005.....	7
Figura 2.1	Categorias de desgaste e seus mecanismos.....	9
Figura 2.2	Etapas do processamento e logística de matérias-primas no pátio de sucata.....	16
Figura 2.3	Monitoramento de fontes radioativas na sucata.....	17
Figura 2.4	Operador realizando a classificação da sucata.....	18
Figura 2.5	Descarga de sucata com a utilização de implemento do tipo garra.....	19
Figura 2.6	Descarga de sucata com a utilização de implemento do tipo eletroímã.....	19

Figura 2.7	Percentual médio de impurezas recebidas na sucata nos últimos 7 anos....	20
Figura 2.8	Tesoura GXP 500 R em operação.....	22
Figura 2.9	Detalhe do corte de sucata com a tesoura móvel.....	22
Figura 2.10	Oxicorte de sucata.....	22
Figura 2.11	Diagrama de forças durante o corte de sucata em uma tesoura com navalhas paralelas.....	23
Figura 2.12	Diagrama apresentando os principais aços ferramenta e suas propriedades.....	25
Figura 2.13	Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 59. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	28
Figura 2.14	Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 59. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	29
Figura 2.15	Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 75. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	29
Figura 2.16	Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 75. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	30
Figura 2.17	Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 78. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	30
Figura 2.18	Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 78. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	31
Figura 2.19	Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 84. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	31
Figura 2.20	Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 84. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	32
Figura 2.21	Variação da tenacidade à fratura, K_{IC} para os aços 59,75, 78 e 84. Adaptado de (KOUTSKY 1978).....	32
Figura 2.22	Aspecto das arestas de corte da navalha do aço 78 após o corte de 8.000 t de sucata (KOUTSKY 1978).....	33

Figura 2.23	Variação da temperatura de revenimento do aço S1 em função do percentual em peso de Silício (KRAUSS et al. 1997).....	34
Figura 2.24	Sistema de navalhas para o corte de pneus (SHIH e MC CALL 2004).....	36
Figura 2.25	Variação do desgaste ao longo da aresta de uma navalha de aço D2. (SHIH e MC CALL 2004).....	37
Figura 2.26	Variação do desgaste ao longo da aresta de uma navalha de aço CRU-WEAR . (SHIH e MC CALL 2004).....	38
Figura 3.1	Diagrama TTT do aço AISI S1 (KRAUSS et al. 1997).....	40
Figura 3.2	Curvas de revenido para o aço AISI S1 (FOREMAN 1997).....	41
Figura 3.3	Equipamento utilizado para medição do desgaste das navalhas.....	43
Figura 3.4	Posicionamento do relógio comparador na aresta de corte.....	43
Figura 3.5	Extensão da medição ao longo da aresta de corte.....	43
Figura 3.6	Vista frontal da prensa identificando as navalhas superiores e inferiores e suas posições Norte e Sul.....	44
Figura 3.7	Corte transversal da navalha mostrando suas dimensões e em detalhe a área de medição do desgaste e as 4 arestas de corte.....	45
Figura 4.1	Par de navalhas C do aço AISI S1 após 4 h de operação.....	47
Figura 4.2	Par de navalhas G do aço AISI S1 após 6 h de operação.....	47
Figura 4.3	Microestrutura representativa do aço SAE 4340, pares A e B composta por martensita revenida com dureza de 46 HRC. Ataque, Nital, 200 X.....	48
Figura 4.4	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par C composta por martensita revenida com dureza de 56 HRC. Ocorreu quebra em operação. Ataque, Nital, 200	48
Figura 4.5	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par D composta por martensita revenida com dureza de 51 HRC. Ataque, Nital, 200 X.....	49
Figura 4.6	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par E composta por martensita revenida e carbonetos com dureza de 50 HRC. Ataque, Nital, 200 X.....	49

Figura 4.7	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par F composta por martensita revenida e carbonetos com dureza de 50 HRC. Ataque, Nital, 200 X.....	50
Figura 4.8	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par G composta por martensita revenida com 56 HRC. Ocorreu quebra em operação. Ataque, Nital, 200 X.....	50
Figura 4.9	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par H composta por martensita revenida com dureza de 53 HRC. Ataque, Nital, 200 X.....	51
Figura 4.10	Microestrutura representativa do aço AISI S1, par I composta por martensita revenida com dureza de 52 HRC. Ataque, Nital, 200 X.....	51
Figura 4.11	Desgaste comparativo entre 2 navalhas de ambos os aços. S=Sul e N=Norte.....	52
Figura 4.12	Navalha de aço S1 com pequenas quebras na aresta de corte.....	53
Figura 4.13	Navalha de aço SAE 4340 com grandes depressões na aresta de corte (vista superior).....	53
Figura 4.14	Navalha de aço SAE 4340 com grandes depressões na aresta de corte (vista frontal).....	54
Figura 4.15	Comparação entre o desgaste médio das arestas de corte das navalhas dos aços SAE 4340 e AISI S1.....	54
Figura 4.16	Relação entre desgaste e dureza para o aço AISI S1.....	55
Figura 4.17	Redução das interrupções por sucata alta devido à substituição do SAE 4340 por AISI S1 como material base para as navalhas da prensa tesoura.....	56
Figura 4.18	Redução dos tempos de troca de navalhas devida ao uso do aço ferramenta AISI S1.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações para 3 diferentes tipos de sucata de acordo com a Instrução Técnica de Sucata – ITS n° 006 – Grupo Gerdau S/A.....	18
Tabela 2.2	Aços recomendados para aplicação em ferramentas de alta solicitação.....	26
Tabela 2.3	Comparação entre resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente para diferentes tipos de aço ferramenta (KRAUSS et al. 1997).....	27
Tabela 2.4	Vida útil das navalhas utilizadas no primeiro teste (KOUTSKY 1978).....	27
Tabela 2.5	Vida útil das navalhas utilizadas no segundo teste (KOUTSKY 1978).....	28
Tabela 2.6	Composição química do aço AISI D2 utilizado no experimento de (VERMA et al. 1994).....	35
Tabela 2.7	Comparação entre os desempenhos de navalhas de WC, AISI D2 temperadas em vácuo e aço AISI D2 temperadas em vácuo + PVD (VERMA et al. 1994).....	35
Tabela 2.8	Composição química do aço Cru-Wear utilizado no experimento (SHIH e MC CALL 2004).....	36
Tabela 3.1	Ciclo de tratamento térmico utilizado para o aço AISI S1.....	40
Tabela 3.2	Ciclo de tratamento térmico utilizado para o aço SAE 4340.....	41
Tabela 4.1	Composição química e dureza para os pares de navalhas de aço AISI S1 e SAE 4340 utilizados no experimento.....	46
Tabela 4.2	Desgaste médio x dureza em navalhas do aço AISI S1, após o processamento de sucatas com densidades entre 0,2 e 0,3 t/m ³	55
Tabela 4.3	Desgaste médio x dureza em navalhas do aço AISI S1, após o processamento de sucatas com densidades entre 0,4 e 0,6 t/m ³	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Austenita
AISI	Instituto Americano do Ferro e Aço
B	Bainita
CW	Cru wear steel
D2	Aço ferramenta D2
DIN	Instituto alemão de normatização
γ	Ângulo entre a navalha e o material
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GN	Gás natural
HR	Hot rolling
HRC	Dureza rockwell C
HV	Dureza vickers
ITS	Instrução técnica de sucata
K_{IC}	Coefficiente de tenacidade à fratura
M_i	Temperatura inicial de transformação martensítica
M_f	Temperatura final de transformação martensítica
NA	Não se aplica;
P	Perlita;
PVD	Deposição física de vapor;
SAE	Sociedade de engenheiros automotivos;
SESP	Sucata especial;
SMST	Sucata mista;
SPES	Sucata pesada;
TiN	Nitreto de Titânio.

RESUMO

Este trabalho buscou analisar dois materiais para fabricação de navalhas para corte de sucata, de forma a identificar aquele que melhor atenda às solicitações de desgaste dentro de um custo competitivo.

Foram realizados testes comparativos de desempenho entre navalhas de aço AISI S1 e SAE 4340, sendo este último o material base utilizado atualmente para a fabricação de navalhas para corte de sucata na Gerdau Aços Especiais Charqueadas. O estudo foi realizado durante o processamento de sucata em uma Prensa Tesoura Harris BSH 1123, sendo que as medições de desgaste foram realizadas nas arestas de corte com a utilização de um relógio comparador.

Os resultados mostram que o aço ferramenta, apesar de seu elevado custo e necessidade de maior controle durante o tratamento térmico, é superior em todos os aspectos, apresentando a metade do desgaste do aço ligado quando utilizado nas mesmas condições e trazendo benefícios operacionais como a redução do tempo de troca das navalhas, sendo o material mais indicado para este fim.

Palavras chave: navalhas, sucata, desgaste, custo, prensa tesoura, arestas de corte e tratamento térmico.

ABSTRACT

Performance trials were carried out to identify the most suitable material for the manufacturing of blades for scrap cutting considering resistance for wear specifications as well as competitive cost. The materials tested were AISI S1 and SAE 4340, being the latter the material currently used for this application at Gerdau Aços Especiais Charqueadas. The study was conducted during scrap processing in a Harris BSH 1123 shearing press. In order to measure the cutting edge wear, a dial gauge was employed.

The results show that the tool steel, despite its higher cost and more complex heat treatment process, is superior for all analyzed aspects, presenting less than half of the wear shown by the low alloyed steel when processing scrap under the same conditions. Other additional operational benefits also were obtained as a decrease in the set up time, being the material of choice for this task.

Key words: blades, scrap, wear, cost, shearing press, cutting edge, heat treatment.

1.0 INTRODUÇÃO

Nas aciarias elétricas, dentre todos os insumos utilizados na fabricação do aço, a sucata é a que apresenta o maior impacto sobre os custos, representando 30% deste valor. Este fato torna o papel do processamento nos pátios de sucata de grande importância para a obtenção de um produto de qualidade com custo otimizado.

Sendo a sucata o insumo empregado em maior quantidade e com grande valor agregado, é de interesse que ela chegue ao forno com um baixo nível de impurezas e uma densidade suficiente para evitar a ocorrência de interrupções no processo de fusão causadas por sucatas com comprimento acima do especificado. Estas interrupções são denominadas “Sucata Alta” e ocorrem após o carregamento do forno com sucata. Caso o volume carregado ultrapasse a sua borda, o fechamento da abóbada, tampa superior do forno, fica prejudicado, e o tempo gasto para a retirada da sucata excedente é contabilizado como interrupção.

Uma análise destas interrupções ocorridas de janeiro de 2004 a dezembro de 2005 mostrou que neste período foram gastos 0,31 minutos/corrída nesta operação, o que representou um custo de mais de US\$ 300,000.00. Como elas estão diretamente relacionadas com a qualidade do beneficiamento da sucata na prensa tesoura, é de vital importância um eficaz controle das variáveis densidade e comprimento de corte, sendo que a repetibilidade deste comprimento é garantida pela integridade da aresta de corte das navalhas.

A partir disso, definiu-se como objetivo encontrar um aço substituto ao SAE 4340, com maior resistência ao desgaste durante o corte de sucata, o que garantiria a repetibilidade do comprimento de corte e traria como benefício a redução de custo do aço produzido, o aumento de produtividade da prensa e melhoria da segurança operacional.

1.1 Corte e limpeza de sucata na prensa tesoura

Para ser utilizada na fabricação do aço, em geral, a sucata não pode ser empregada na forma em que é recebida. Isto se dá basicamente em virtude da baixa densidade aparente dos diversos tipos de sucata e da presença de impurezas misturadas a mesma.

Para minimizar estes problemas, grande parte das sucatas deve passar por um processo de remoção de impurezas e aumento de densidade. Para este fim, um dos equipamentos vastamente utilizados na indústria siderúrgica e de processamento de sucata é a prensa tesoura, a qual promove a compactação e o corte da sucata com a posterior separação de suas impurezas.

A Figura 1.1 apresenta a prensa tesoura Harris BSH 1123 utilizada na Aços Especiais Charqueadas.

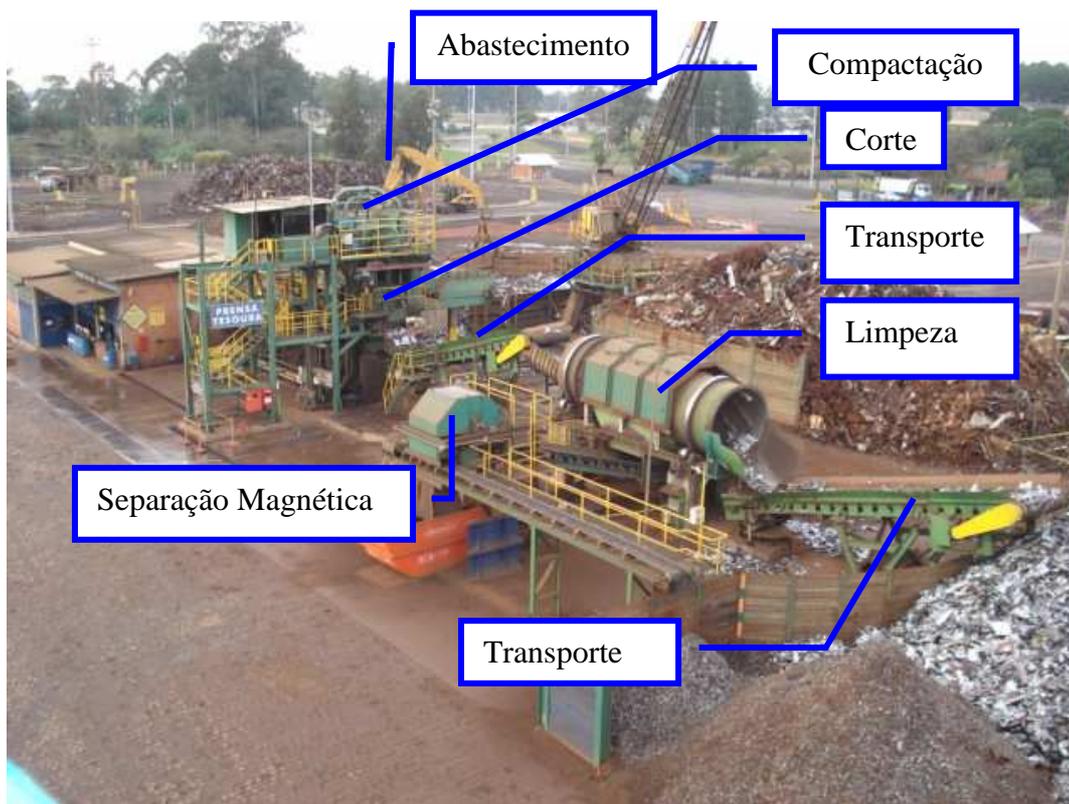


Figura 1.1: Prensa tesoura Harris BSH 1123 da Aços Especiais Charqueadas e as 7 etapas do processo.

Descrição das etapas do processo:

Etapa 1 - Abastecimento da prensa tesoura

A prensa é alimentada através do uso de um guindaste ou escavadeira conforme a Figura 1.2. A sucata é depositada em uma bandeja que após acionada, inclina-se e envia o material para a área de compactação.



Figura 1.2: Abastecimento da bandeja da prensa.

Etapa 2 - Compactação

A sucata é comprimida nas direções horizontal e vertical havendo a formação de um pacote, sendo que o mesmo é empurrado por um grande cilindro até a área de corte – Figura 1.3.



Figura 1.3: Compactação da sucata previamente ao seu corte.

Etapa 3 - Corte

O pacote de sucata passa por um conjunto de 4 navalhas, 2 superiores e 2 inferiores, que realizam seu cisalhamento em dimensões pré-definidas. Estas navalhas são o objeto de estudo deste trabalho – Figura 1.4.

É de fundamental importância garantir que todos os cisalhamentos ocorram em sua plenitude, pois isto garantirá a repetibilidade do comprimento dos pacotes cortados e conseqüentemente a homogeneidade da densidade da sucata. Nesta operação, as resistências ao desgaste e à compressão presentes no material base das navalhas de corte mostram-se como os fatores chave para garantir uma vida útil adequada para estas ferramentas.

Uma atividade crítica nesta etapa é a troca de navalhas, isto porque a inadequada resistência ao desgaste do SAE 4340 promove deformações nas ferramentas de corte, o que resulta em interferências entre elas e a estrutura da prensa. Isto associado ao seu peso elevado, traz a necessidade de utilização de ferramentas como alavancas e marretas, as quais aumentam em muito o risco de acidentes na atividade.

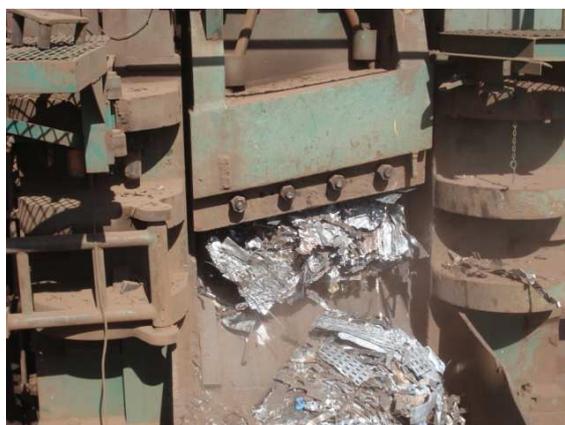


Figura 1.4: Corte da sucata pelas navalhas da prensa tesoura.

Etapa 4 - Transporte

A sucata já cortada é deslocada para o interior de um tambor rotativo através de esteiras – Figura 1.5.



Figura 1.5: Transporte da sucata já cortada até o tambor rotativo.

Etapa 5 - Limpeza

O tambor rotativo – Figura 1.6, em movimentos giratórios permanentes, provoca a queda das impurezas e das sucatas de menor dimensão através de sua estrutura perfurada. Dentre as impurezas mais comuns estão a terra, areia e pedras.



Figura 1.6: Remoção das impurezas da sucata no tambor rotativo.

Etapa 6 - Transporte

Agora, a sucata livre de boa parte das impurezas e com sua densidade elevada, é depositada em uma pilha, onde aguarda transporte para ser consumida na aciaria.

Etapa 7 - Separação magnética

De forma a se obter a máxima recuperação possível de material ferroso no processo, aqueles finos de sucata misturados com impurezas provenientes da limpeza mecânica no tambor rotativo (Etapa 5) são direcionados para um sistema de separação magnética – Figura 1.7. Seu objetivo é separar o que ainda resta de material ferroso junto às impurezas.



Figura 1.7: Separação magnética dos finos de sucata remanescentes do tamboramento.

1.2 Interrupções no processamento de sucata na prensa tesoura

No pátio de sucata da Aços Especiais Charqueadas as interrupções nos equipamentos são classificadas inicialmente em 2 tipos: interrupções de manutenção e operacionais. No primeiro caso estão englobadas todas aquelas falhas que ocorrem no equipamento devido à falta de execução ou execução inadequada de algum procedimento de manutenção. O restante das falhas é classificado como interrupções operacionais conforme a figura 1.8.

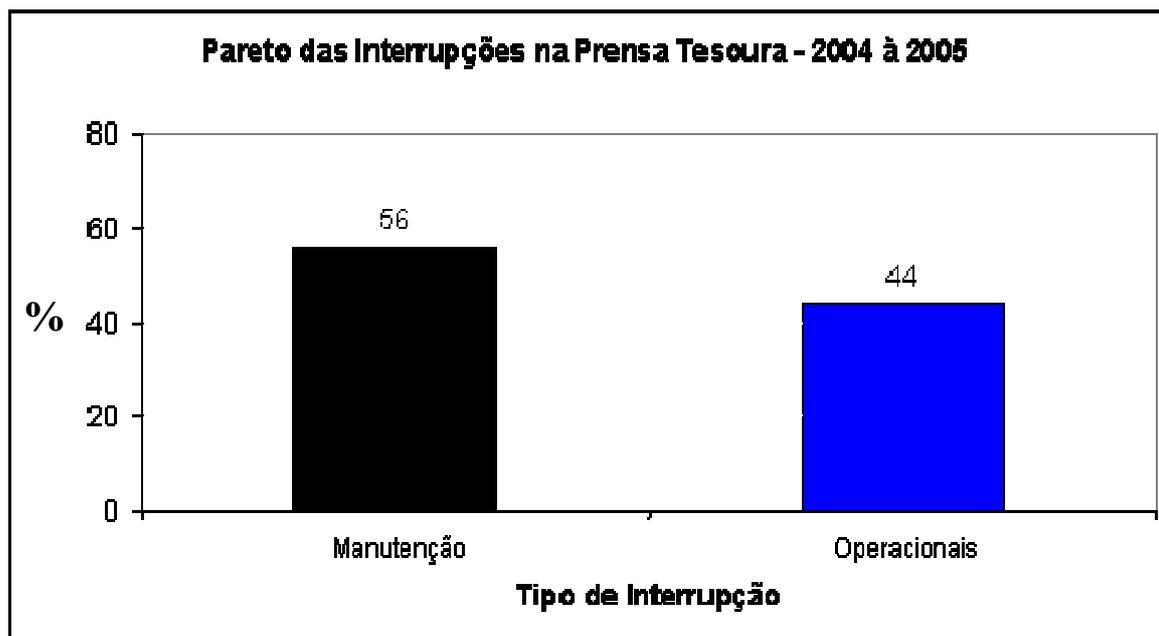


Figura 1.8: Pareto das interrupções na prensa tesoura no período de 2004 a 2005.

Como se pode observar no período de 2004 a 2005, as interrupções operacionais somaram 44% do total de paradas da prensa tesoura, o que se traduz em 354 h de equipamento ocioso nestes 2 anos.

Ao se analisar em detalhe - Figuras 1.9 e 1.10 se verifica que a caixa da prensa é a parte do equipamento com maior ocorrência de interrupções e que as navalhas são o componente maior causador destas falhas.

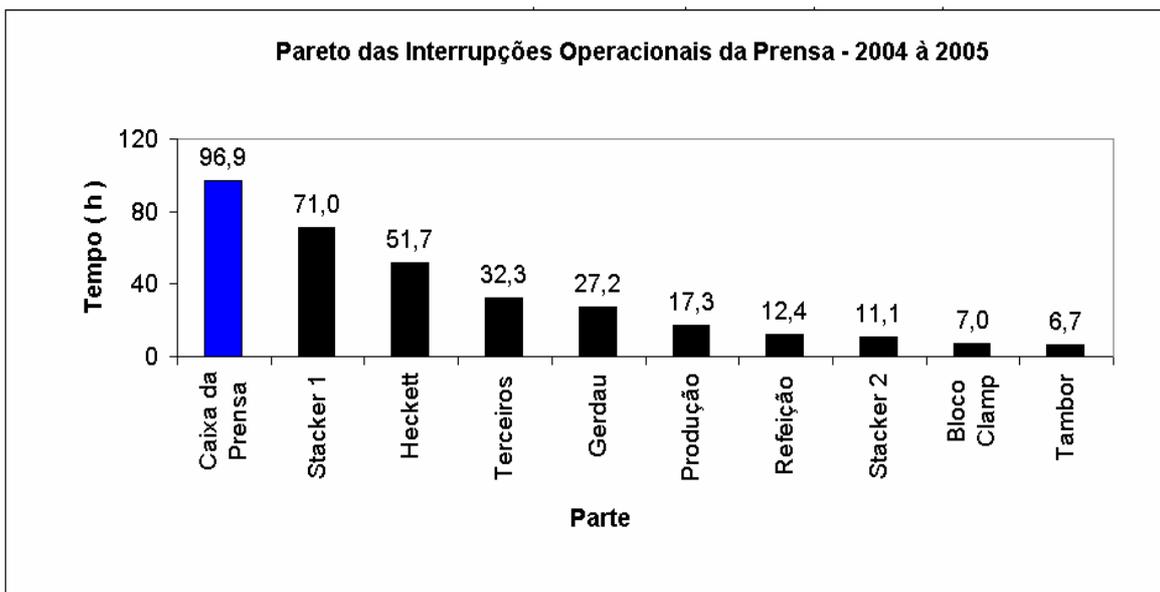


Figura 1.9: Pareto apresentando a caixa da prensa como a parte do equipamento com maior índice de interrupções operacionais no período de 2004 a 2005.

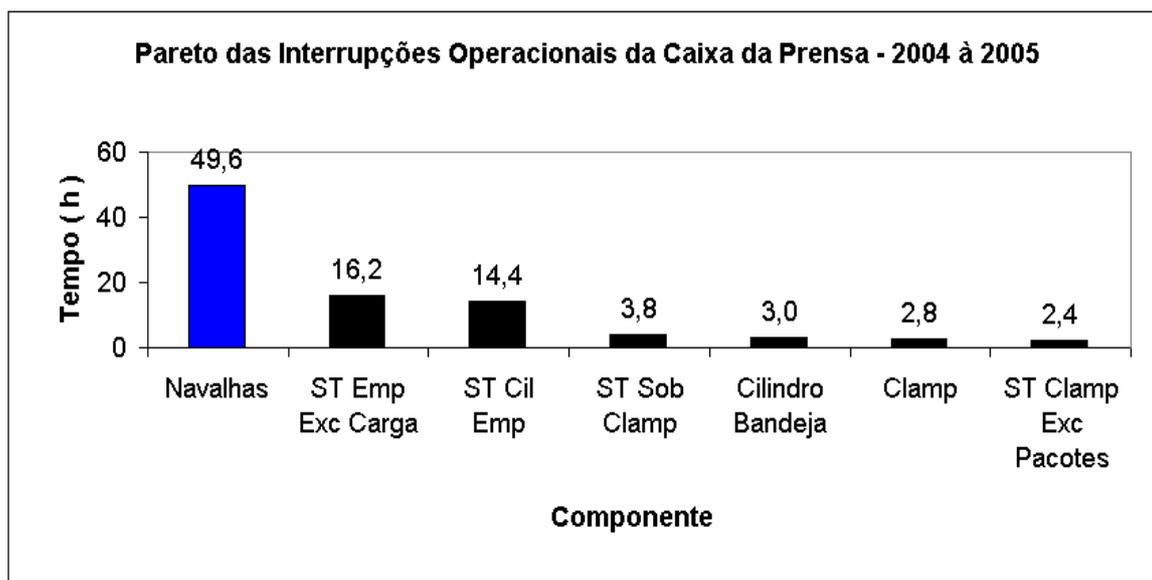


Figura 1.10: Pareto apresentando as navalhas da prensa como o componente da caixa da prensa com maior índice de interrupções operacionais no período de 2004 a 2005.

Considerando uma produtividade média de 16 t/h, e uma média anual de 24,8 h perdidas por problemas nas navalhas, a prensa tesoura deixa de cortar 397 t/ano de sucata.

A oportunidade de se buscar os ganhos com redução de sucata alta no (FEA), aumento de produção na prensa, associados ainda ao aumento da segurança operacional, motivou a realização deste trabalho.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, será abordado o fenômeno de desgaste dos materiais, onde serão apresentados os tipos mais importantes, suas manifestações e seus mecanismos de controle. Será também detalhada a sua aparência, mecanismos e a solução de cada um destes problemas.

Um breve histórico sobre a evolução do processamento de sucata é apresentado salientando a ligação entre a mecanização deste processo e o aumento da demanda por este material após a metade do século passado.

A seguir, são apresentadas as etapas do processamento e logística de materiais no pátio de sucata da Gerdau Aços Especiais Charqueadas evidenciando a importância deste processo na redução dos custos do aço produzido em aciaria elétrica e a íntima relação deste resultado com o bom desempenho de corte das navalhas da prensa tesoura.

A distribuição de forças nas arestas de corte das navalhas é analisada, e com base nestas solicitações e em resultados práticos de sua utilização em diversas plantas de processamento de sucata, são apresentados alguns materiais indicados para a fabricação destas ferramentas de corte.

2.1 Desgaste

Desgaste é o dano em uma superfície sólida, usualmente envolvendo perda progressiva de material, devido ao movimento relativo entre aquela superfície e alguma substância contatante.

A Figura 2.1 apresenta os principais processos de desgaste divididos por categorias baseadas em mecanismos comuns.

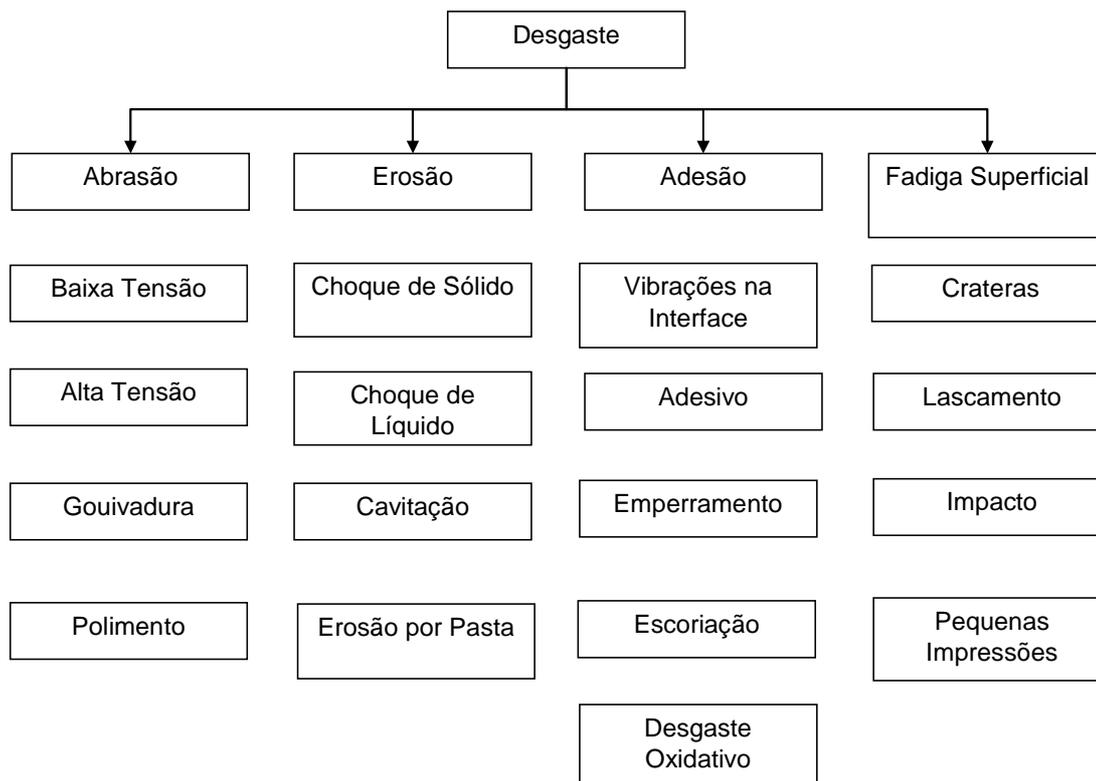


Figura 2.1: categorias de desgaste e seus mecanismos.

2.1.1 Abrasão

Desgaste produzido por partículas duras ou protuberâncias forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida.

2.1.1.1 Abrasão a baixas tensões.

A superfície apresenta-se ranhurada, sendo que as forças devem ser baixas o suficiente para não causarem trituração do abrasivo.

Exemplos: partículas deslizando em um transportador tipo calha, peças que deslizam em sistemas de eixos ou guias, aragem de solo arenoso, corte de materiais que possuem substâncias abrasivas, etc.

2.1.1.2 Abrasão a altas tensões.

Neste caso, a resistência à compressão da superfície deve ser maior do que aquela do abrasivo. Neste caso ocorre deformação plástica e ranhuras profundas na direção do movimento.

Exemplos: fresamento de minerais, equipamentos de movimentação de terra, uso de implementos agrícolas em solos duros, etc.

2.1.1.3 Gouivadura.

Ação de carregamentos compressivos repetitivos de materiais duros contra superfícies mais moles. Neste caso a fadiga tem papel importante, pois o arrancamento não se dá por uma só ação. A superposição de goivas (marcas na superfície) pode levar à fratura da região.

Exemplos: componentes de moedores giratórios, moinhos de rolos, equipamentos agrícolas em solos rochosos, etc.

2.1.1.4 Polimento.

O material é removido por ação de esfregamento, sem a evidência visual de ranhuras, fratura ou deformação plástica. A superfície apresenta-se lisa e brilhante, mas pode perder sua função e ter mudanças dimensionais.

Os mecanismos envolveriam a remoção de micro-cavacos para abrasivos maiores que 3 micrometros.

Exemplos: equipamentos para retificação de lentes, exaustores de partículas finas, corrimões de escadas, etc.

2.1.2 Erosão.

2.1.2.1 Erosão por choque sólido.

Contínua sucessão de impactos de partículas sólidas sobre uma superfície. Estas partículas são muito menores do que a superfície submetida á erosão. O mecanismo pode envolver simplesmente deformação plástica com cada partícula formando uma cratera, mas também pode haver formação de cavaco.

Este processo apresenta algumas características bem definidas:

- A taxa de remoção de material (W) é proporcional ao tipo de partícula, tamanho, massa (m), velocidade (v), fluxo e fluência, e é inversamente proporcional à dureza (H) da superfície submetida à erosão.

$$W = \left(\frac{m \times v^2}{H} \right) \times k$$

Onde k é uma função do ângulo de incidência e da natureza das partículas.

- Partículas mais duras e agudas produzem as taxas mais altas.
- Materiais dúcteis como metais moles mostram uma taxa de erosão máxima com um ângulo de incidência entre 15 e 30 graus.
- Em cerâmicas e aços ferramenta a remoção é por fratura.
- O grau de erosão diminui com a redução do tamanho das partículas.
- Constituintes duros numa matriz metálica têm pouca eficiência em reduzir erosão.
- Cerâmicos resistem bem á erosão de partículas pequenas e menos duras, desde que não causem lascamento.
- Elastômeros tem boa resistência a este desgaste, exceto para ângulos normais.

Exemplos: ventiladores em ambientes sujos, jateamento abrasivo, aeronave operando em região arenosa, sistema de exaustão carregado de partículas.

2.1.2.2 Erosão por choque líquido.

Remoção progressiva de material pela ação de impacto de um fluido contra uma superfície. Quando o fluxo é de baixa velocidade, o mecanismo principal pode ser somente corrosão, porém para velocidades elevadas há efeito erosivo com remoção de possíveis camadas passivas protetoras.

Materiais resilientes (elastômeros, por exemplo) são adequados para operarem nestas condições. Para metais é necessária uma camada passiva tenaz e resistência à compressão elevada.

Exemplos: gotas de chuva contra aeronaves, ventiladores para exaustão de gotas líquidas, palhetas de turbinas, etc.

2.1.2.3 Cavitação.

Perda progressiva de material de um sólido devido à ação de bolhas em um líquido, colapsando próximo à superfície deste sólido. Existe a formação de jatos muito pequenos de líquidos para preencher o espaço vazio. Pode causar a remoção de camadas passivas

levando a um mecanismo combinado de corrosão. Há um período de incubação e após isto, entra em um regime estável.

Exemplos: qualquer sistema de bombeamento ou propulsor, tubulações, sistemas de mistura, agitadores ultra-sônicos, etc.

2.1.2.4 Erosão por lodo.

Erosão causada pela ação de uma mistura de partículas sólidas em um líquido em movimento relativo a uma superfície. A corrosão se presente gera partículas abrasivas e mais corrosão pela abrasão causada pela fratura de filmes protetores.

2.1.3 Adesão.

2.1.3.1 Vibrações na interface.

É o desgaste causado pelo movimento oscilatório de pequena amplitude entre 2 superfícies. Em geral ocorre entre peças onde não estava prevista a ocorrência de atrito. O desgaste inicia-se por adesão microscópica, uma vez que a superfície perde material o desgaste progride por formação de “piting”.

2.1.3.2 Desgaste adesivo.

É aquele devido à junção localizada entre superfícies sólidas em contato, levando à transferência de material entre as duas superfícies ou perda de uma delas.

O desgaste adesivo é a fase de iniciação de quase todos os sistemas de desgaste de escorregamento a seco, mas à medida que o desgaste progride, ele se torna de modo misto.

A taxa de desgaste pode ser reduzida em várias ordens de grandeza através da lubrificação ou utilização de materiais dissimilares.

Exemplos: engrenagens, cames, pistões, parafusos, etc.

2.1.3.3 Emperramento.

Tem como principal característica a parada abrupta do movimento relativo entre 2 superfícies. As causas mais freqüentes são a perda de folga para o deslizamento por erro de projeto (dilatações não previstas ou subestimadas) ou por crescimento de partículas de desgaste entre elas.

A melhor solução é o uso de folgas adequadas e lubrificação.

Exemplos: pistões em cilindros, válvulas, etc.

2.1.3.4 Escoriação.

Dano a um ou ambos os membros em um sistema sólido-sólido, causado por deformação plástica macroscópica da área aparente de contato, levando à formação de protuberâncias. Não há leis para prever a resistência a este tipo de desgaste. Somente a realização de testes práticos fornece dados confiáveis.

Exemplos: válvulas plug, válvulas gaveta, etc.

2.1.3.5 Desgaste oxidativo.

Neste caso as superfícies deslizantes reagem com seu ambiente para formar filmes de óxidos que separam as superfícies e mantêm a taxa de desgaste baixa. Este tipo de desgaste inicia com adesão, e a taxa de remoção é relativamente alta. A medida que os filmes de óxido se formam, as taxas de desgaste diminuem.

Exemplos: sistemas deslizantes secos, partes deslizantes em fornos, componentes de difícil lubrificação, etc.

2.1.4 Fadiga superficial.

2.1.4.1 Desgaste por cratera.

É a remoção ou deslocamento de material por uma ação de fadiga para formar cavidades na superfície.

Estas crateras podem ser originadas por esforços repetitivos por deslizamento ou rolamento os quais geram trincas sub-superficiais que crescem em direção a superfície para produzir uma fratura. A existência de carbonetos massivos concentra tensões que facilitam a formação destas trincas.

Exemplos: rolamentos, engrenagens, cames, etc.

2.1.4.2 Lascamentos.

As partículas fraturam da superfície na forma de escamas. O mecanismo de surgimento é o mesmo do desgaste por cratera e é comum em peças revestidas.

Exemplos: cames e engrenagens revestidas, endurecimento superficial muito fino em cames e engrenagens, válvulas, etc.

2.1.4.3 Desgaste por impacto.

Impacto repetitivo entre 2 superfícies produzindo dano e remoção de material. O mecanismo é usualmente a deformação plástica, mas quando repetitivo pode ocorrer na forma de desgaste por cratera ou vibração na superfície.

Ex: martelo, furadeiras pneumáticas, batentes, etc.

2.1.4.4 Desgaste por pequenas impressões.

Deformação plástica localizada devida á aplicação de carga estática.

Ex: sobrecarga em superfícies concordantes em rodas sobre trilhos e rolamentos, fechamento inadvertido de moldes de injeção de plástico com plástico em excesso, etc.

Analisando o corte de sucata, verifica-se que vários mecanismos de desgaste atuam durante o processo, principalmente os do tipo abrasão e fadiga superficial, sendo que a determinação do material para fabricação das navalhas deve levar em conta esta análise.

2.2 Mecanização do processamento de sucata.

Até a metade do século passado, as ferramentas para corte de sucata se resumiam a tesouras e serras manuais e a pequenas guilhotinas com acionamento mecânico.

Após o final da Segunda Guerra Mundial, enormes quantidades de sucata foram geradas, principalmente as de origem bélica e armações de aço da construção civil. Este novo panorama, aliado ao aquecimento das economias no pós-guerra, gerou uma nova demanda: a criação de equipamentos mais robustos para o corte de sucata, os quais permitissem o processamento de materiais mais longos e espessos, mais resistentes e com maior produtividade (WIENTEZEK 2003).

Neste sentido, foram desenvolvidos equipamentos denominados Tesouras Hidráulicas nos quais a força para o cisalhamento é fornecida por um sistema hidráulico de alta pressão que possibilita o empacotamento e corte de uma ampla gama de tipos de sucata (GUNN 2005).

Em virtude dos novos níveis de produtividade, o abastecimento de sucata para corte também deixou de ser manual, dando lugar a guindastes e guias, o que conferiu maior segurança aos operadores envolvidos no processo.

Ao longo dos anos, os equipamentos foram aperfeiçoados, maiores forças de corte foram obtidas e as tesouras hidráulicas evoluíram para as atuais prensas tesoura que possibilitam realizar além do corte, também a prensagem da sucata em fardos com dimensões pré-definidas (WIENIEZEK 2003). Atualmente, as prensas mais conhecidas e utilizadas são das marcas Harris, Lindemann, Sierra e Vezzani.

Mesmo com projetos e parâmetros de operação bastantes diversificados, em geral estes equipamentos apresentam 3 etapas de processamento em comum: abastecimento de sucata, empacotamento e cisalhamento. Neste último processo, a definição de um material base e de um tratamento térmico adequados a serem utilizados no processo de fabricação das navalhas de corte são de fundamental importância para garantir repetibilidade do comprimento de corte e uma vida útil adequada para estas ferramentas.

De modo a aumentar a produtividade, alguns fabricantes eliminam a etapa de prensagem, cortando a sucata logo após seu abastecimento.

Para o caso específico de processamento de sucata automotiva, a qual é diferenciada em virtude de que 30% de seu peso é composto por materiais não-ferrosos, havendo com isto a necessidade de separá-los da sucata, foram desenvolvidos equipamentos denominados shredders.

2.3 Pátio de sucata

Como atribuições desta área estão o recebimento, classificação, processamento, movimentação e estocagem de sucata e ferro gusa, os quais servirão de matérias primas para a fabricação do aço na aciaria.

A Figura 2.2 apresenta o fluxo deste processo e a visão de cada uma de suas etapas.

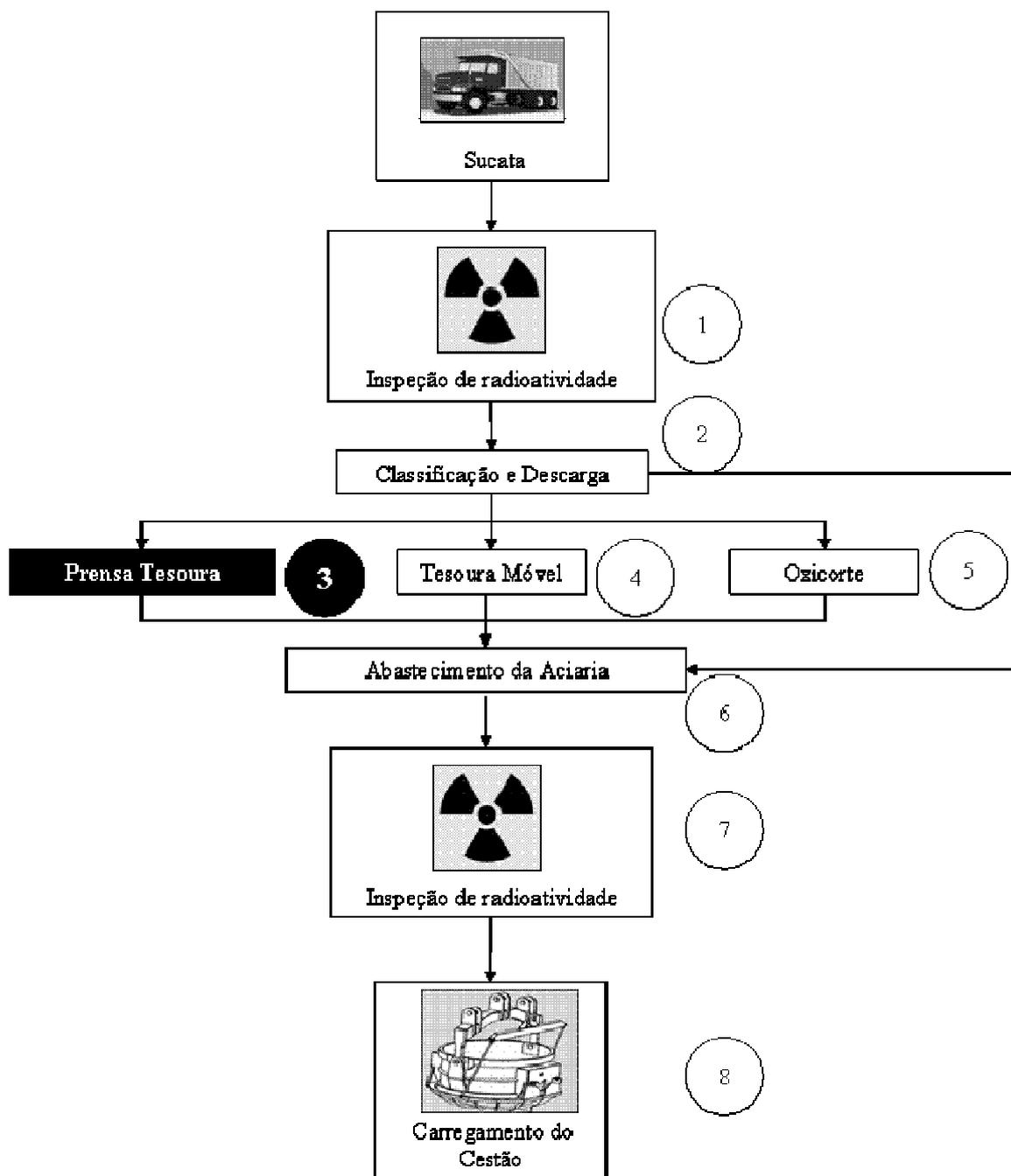


Figura 2.2: Etapas do processamento e logística de matérias-primas no pátio de sucata

2.3.1 Descrição das etapas de processamento no pátio de sucata

Etapa 1 – Identificação de materiais radioativos na sucata

Etapa inicial e obrigatória para todos os carregamentos de sucata recebidos pela usina. Objetiva-se nesta inspeção, identificar a presença de fontes radioativas na sucata e segregá-las ou encaminhá-las aos órgãos governamentais competentes para sua correta disposição, de forma a evitar a contaminação ambiental e do produto final.

O equipamento utilizado é um portal canadense da marca Exploranium dotado de circuito eletrônico capaz de detectar fontes radioativas através de uma varredura realizada na carroceria do caminhão.

A Figura 2.3 mostra o momento da inspeção em um caminhão de sucata. Ele passa entre as 2 placas do sistema de detecção para leitura do nível de radioatividade .



Figura 2.3: Monitoramento de fontes radioativas na sucata.

Etapa 2 – Classificação e descarga de sucata

Classificação

É a etapa onde se verifica se o material enviado pelo fornecedor está de acordo com as especificações estabelecidas. Esta avaliação é realizada por pessoal treinado com base em critérios pré-estabelecidos para cada tipo de sucata. Aqui, avalia-se visualmente a origem do material, seu nível de impurezas, sua provável composição química e características dimensionais como espessura e comprimento conforme a Figura 2.4.

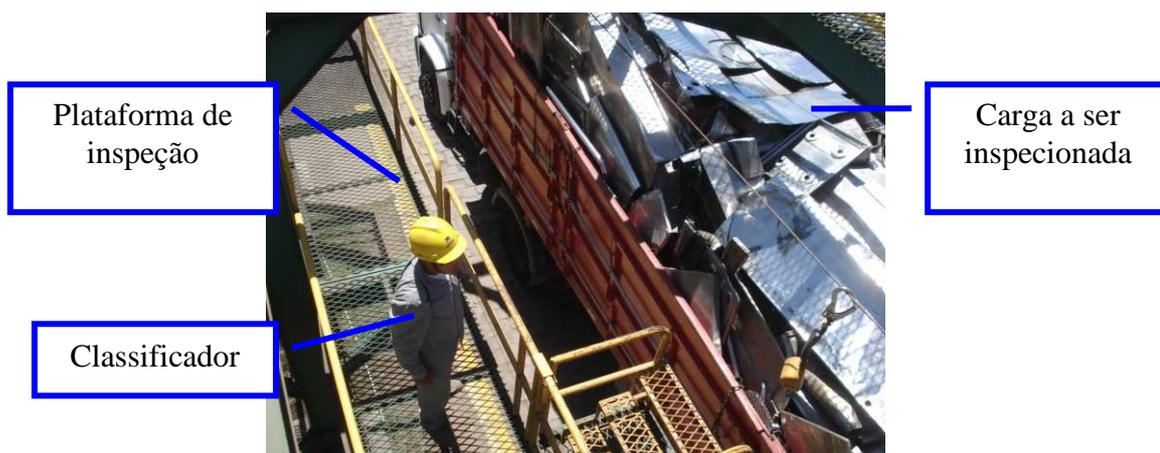


Figura 2.4: Operador realizando a classificação da sucata.

De forma a padronizar a classificação de sucata, foram definidas regras para esta atividade. Inicialmente, as sucatas são subdivididas em 2 grandes grupos de acordo com a sua origem: sucatas de obsolescência, compostas basicamente por bens de consumo residenciais sucitados e sucatas industriais, com origem na indústria metalúrgica e de transformação. Com base nesta avaliação é que se define o valor a ser pago pelo lote recebido.

Para melhor ilustrar as diferenças entre os diversos tipos de sucata, na Tabela 2.1 apresentam-se as características de 3 distintos grupos deste material.

Tabela 2.1: Especificações para 3 diferentes tipos de sucata de acordo com a Instrução Técnica de Sucata – ITS n° 006 – Grupo Gerdau S/A.

ITS - Instrução Técnica de Sucata						
Sucata	Dimensional	Processamento	Comp. Química	Densidade	Origem / Descrição	Foto
Sucata Mista (SMST)	NA*	Prensa	Variada	NA*	Composta por bens de consumo metálicos obsoletos (fogões, geladeiras, automóveis, etc.).	
Sucata Especial (SESP)	Máximo = 1.000 mm Espessura Máxima = 3"	Prensa	Cu Máx.: 0,12 % Cr Máx.: 0,08 % Ni Máx.: 0,09 % Sn Máx.: 0,025 %	Mín.= 0,4 t / m ³	Origem industrial, gerada na estampagem ou forjamento de aço ao carbono.	
Sucata Pesada (SPES)	Acima de 800 mm	Oxicorte	Variada	Variada	Sucata de Origem Industrial ou de Obsolescência.	

*NA = Não Se aplica.

Mesmo com toda a padronização existente nesta atividade, a infinidade de peças encontradas na sucata com as mais diversas variações em suas características físicas e

químicas torna muitas vezes o processo de classificação bastante difícil, como no caso de mistura de dois ou mais tipos de sucata, e exige um alto nível de treinamento operacional.

Descarga

Após a avaliação inicial da carga, o caminhão é encaminhado para descarregamento. Para esta operação, utilizam-se escavadeiras dotadas de implementos capazes de retirar a sucata do interior das carrocerias mecanicamente (garras) ou magneticamente (eletroímãs). As figuras 2.5 e 2.6 ilustram este processo.



Figura 2.5: Descarga de sucata com a utilização de implemento do tipo garra.



Figura 2.6: Descarga de sucata com a utilização de implemento do tipo eletroímã.

Esta etapa é acompanhada por um classificador, de forma a avaliar visualmente a quantidade de impurezas presentes na carga e garantir sua conformidade com as

características estabelecidas. Esta avaliação é de vital importância, pois evita que as impurezas presentes na carga sejam recebidas como sucata, o que poderia mascarar o real estoque destes materiais.

A Figura 2.7 apresenta o percentual médio de impurezas avaliadas na sucata num período de 7 anos, as quais se não fossem descontadas, representariam grandes diferenças de estoque que trariam fortes impactos financeiros.

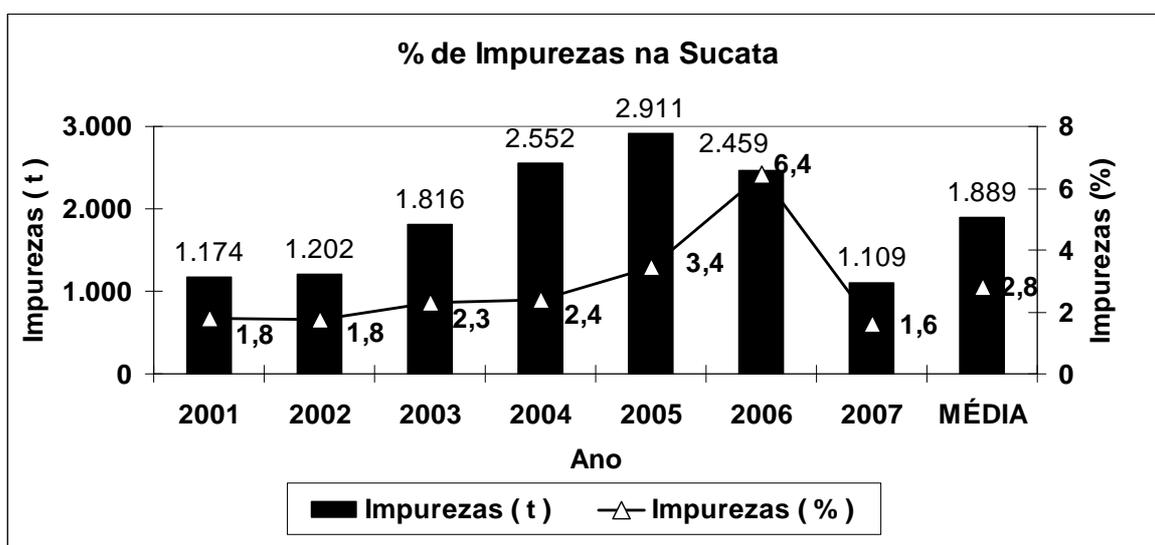


Figura 2.7: Percentual médio de impurezas recebidas na sucata nos últimos 7 anos.

Verifica-se que, nos últimos 7 anos, a média de impurezas na sucata é de quase 1.900 t/ano, representando 2,8 % da quantidade de sucata recebida pela usina. A partir destes números pode-se verificar a real importância do trabalho de classificação de sucata, já que o desconto de impureza é abatido diretamente do peso da carga, garantindo desta forma a acuracidade dos estoques.

Tratando-se de uma usina de aços especiais, é de extremo interesse que, quando da montagem do cestão na aciaria, sejam utilizadas as sucatas que otimizem o consumo de ligas no forno e forno-panela e atendam a requisitos de densidade e consumo de energia, demandando o uso de diversos tipos de sucata. Para atender a estas necessidades e ao mesmo tempo não gerar diferenças de estoque e até mesmo o sucateamento de corridas, toda a sucata recebida é separada e armazenada em pilhas bem definidas conforme sua classificação. Ainda assim, de nada adianta tê-la corretamente classificada e empilhada se a sua movimentação ou o transporte para a aciaria for dificultado ou até mesmo impedido de ser realizado em tempo hábil, tornando necessária uma freqüente revisão do posicionamento e dimensionamento das pilhas de sucata.

Etapa 3 – Corte e limpeza de sucata na prensa tesoura

Conforme visto na introdução, esta etapa consiste basicamente na limpeza e aumento da densidade da sucata recebida através do seu corte.

Como em muitas usinas o suprimento de sucata processada para consumo no forno depende exclusivamente das prensas, espera-se deste equipamento o máximo de eficiência e flexibilidade para processar variados tipos de sucata sem comprometer o ritmo de produção do forno. Com base nisso, são eleitas algumas características e procedimentos importantes para este equipamento de forma a garantir um elevado desempenho, são elas (GUNN 2005):

- 1- Reduzido número de cilindros de acionamento do sistema de compactação de forma a reduzir o número de manutenções e interrupções (GUNN 2005);
- 2- A massa do bloco da tesoura deve ser bem maior que a massa da navalha de modo a evitar concentração de tensões na estrutura e danos à mesma (GUNN 2005);
- 3- A correta lubrificação dos guias do bloco das navalhas de forma a garantir a manutenção do ângulo de corte (GUNN 2005). Este ângulo é de fundamental importância, pois se for muito pequeno causará desgaste excessivo da aresta de corte e se muito grande, aumentará as chances de quebra das navalhas durante a operação (JUNIOR 2007);
- 4- Um material base adequado para as navalhas que garanta o corte dos mais variados tipos de sucata (GUNN 2005).

Etapa 4 – Corte com tesoura móvel

Alguns tipos de sucata com características incomuns geram danos ou baixa produtividade se processados em prensas tesoura. Isto ocorre com sucatas com comprimento ou volume elevados (maiores que a bandeja da prensa), sucatas de fio máquina e fitas de aço (as quais se enrolam na estrutura da prensa durante o processo) e sucata de aço inoxidável.

Para o corte destes tipos de sucata, utiliza-se uma tesoura acoplada a uma escavadeira, o que propicia o corte de peças de qualquer comprimento, uma melhor seleção da área das peças a serem cortadas, melhores condições de manipulação da sucata (a tesoura funciona como uma pinça) e afastamento entre a sucata e as partes sensíveis do equipamento (SHUSHAN 1996).

As Figuras 2.8 e 2.9 apresentam uma tesoura modelo Genesis GXP 500 R em operação.



Figura 2.8: Tesoura GXP 500 R em operação.



Figura 2.9: Detalhe do corte de sucata com a tesoura móvel.

Etapa 5 – Oxicorte

Apesar do rápido desenvolvimento de equipamentos para corte de sucatas cada vez mais robustas, para materiais com espessuras muito elevadas não há outra alternativa senão o oxicorte. O corte de tarugos e barras sucataados durante a fabricação do aço são exemplos da utilização deste processo.

Através do uso de misturas de GN + O₂ ou GLP + O₂ corta-se a sucata nas dimensões desejadas pelo processo de oxidação conforme a Figura 2.10.

Apesar de sua baixa produtividade em comparação com os processos mecânicos de corte, ele é de fundamental importância, já que o produto do oxicorte é uma sucata com alta densidade e com um baixo percentual de impurezas.



Figura 2.10: Oxicorte de sucata.

Etapa 6 – Abastecimento da aciaria

Após processada, a sucata é enviada para a aciaria de uma forma programada, conforme o tipo de aço que está sendo produzido. Há também casos em que o fornecedor já entrega a sucata dentro dos padrões de qualidade exigidos na aciaria. Nestes casos a carga é descarregada diretamente para consumo.

Etapa 7 – Identificação de materiais radioativos na sucata – Após processada

Mesmo com a inspeção de radioatividade existente no início do processo, ainda há risco de que fontes radioativas blindadas não sejam detectadas. Desta forma, uma segunda inspeção se faz necessária durante o carregamento do cestão na aciaria, já que após o processamento no pátio, a blindagem pode ter sido rompida.

Após esta etapa, a sucata é depositada no cestão para posterior carregamento do forno elétrico.

2.4 Distribuição de forças em navalhas paralelas durante o corte

Nas tesouras com navalhas paralelas o corte é efetuado em 2 fases:

1ª fase: Deformação Plástica

2ª fase: Corte propriamente dito.

Durante a penetração das navalhas, surge um momento $P \cdot a$ que tende a girar a sucata no sentido horário como mostra a Figura 2.11.

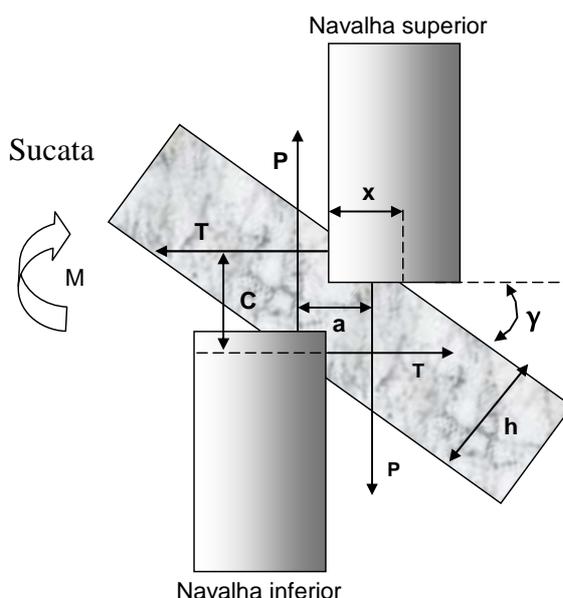


Figura 2.11: Diagrama de forças durante o corte de sucata em uma tesoura com navalhas paralelas. Modificado de (FILHO, M. S. II Seminário de Trefilação de Arames, Barras e Tubos ABM. 1995).

Esta tendência de giro é contrabalanceada pela componente lateral T que atua sobre as facas.

Deste conjunto de forças resulta um momento M de giro representado por:

$$M = P \times a = T \times C \quad (1)$$

Admitidas iguais as pressões específicas de deformação nas direções normais à x e z, tem-se:

$$\frac{P}{b \times x} = \frac{T}{b \times z}, \text{ sendo } \mathbf{b} \text{ a largura da chapa. } (2)$$

Substituindo em (1), tem-se:

$$T = \frac{P \times z}{x} = P \times \operatorname{tg} \gamma, \quad a = x = \frac{z}{\operatorname{tg} \gamma} \quad \text{e} \quad c = \frac{h}{\cos \gamma} - z$$

$$\frac{z}{h} = \operatorname{tg} \gamma \times \operatorname{sen} \gamma$$

Considerando que durante o período de penetração da navalha a pressão específica é constante, a força P aumentará parabolicamente, até alcançar um valor determinado para iniciar o corte do metal de acordo com a equação:

$$P = k \times b \times \left(\frac{h}{\cos \gamma} - 2 \times z \right)$$

Onde k = resistência ao corte de 1 mm² de secção transversal.

Observando-se a equação acima conclui-se que quanto mais duro e frágil o metal a ser cortado, mais rapidamente se alcança a força máxima de corte e mais curta é a duração do mesmo.

2.5. Aços empregados para a fabricação de navalhas e seus desempenhos

O diagrama da Figura 2.12 apresenta os 12 aços ferramenta mais empregados na indústria e auxilia na escolha do material mais indicado para uma determinada aplicação.

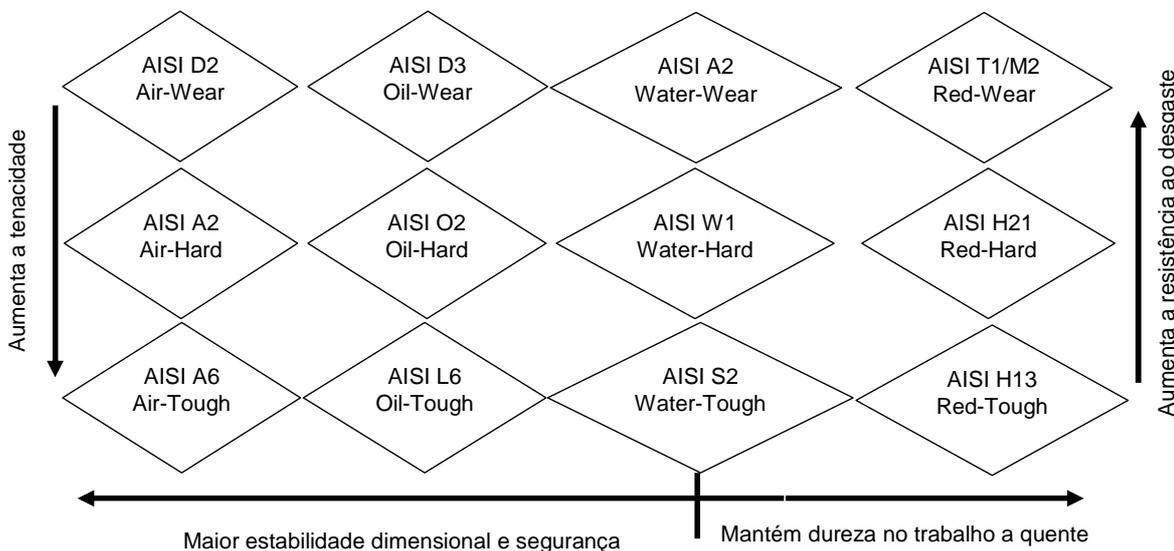


Figura 2.12: Diagrama apresentando os principais aços ferramenta e suas propriedades.

Como pode ser observada, a tenacidade, que é uma das propriedades mais importantes para a aplicação abordada neste trabalho, é maior para os materiais situados na base do diagrama, sendo que os do tipo resistente ao choque estão neste grupo e ainda mantém a dureza a quente. Verifica-se então, a possibilidade de emprego deste material com êxito na fabricação de navalhas.

2.5.1. Aços CrNiMoV e CrNiMoWV

Ao mesmo tempo em que as navalhas são altamente exigidas com relação à resistência à tração, compressão e ao atrito durante o corte, há também uma exigência de grande tenacidade. Tal combinação de propriedades inviabiliza a utilização de materiais com altos teores de carbono e de elementos formadores de carbonetos em virtude de não atenderem a esta última solicitação.

Por outro lado, materiais base com teores de carbono e elementos formadores de carbonetos muito baixos também não são adequados, pois não atendem às necessidades de resistência ao desgaste.

Segundo (BISHOP et al.), citados por (KOUTSKY 1978), para a fabricação de ferramentas de alta solicitação, os aços da Tabela 2.2 são os mais indicados devido aos mesmos atenderem às propriedades anteriormente citadas, em virtude de seus teores

intermediários de carbono e facilidade de obtenção de uma matriz martensítica com carbonetos dispersos.

Tabela 2.2: Aços recomendados para aplicação em ferramentas de alta solicitação (KOUTSKY 1978).

AUTOR	AÇO	Composição Química						
		C	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
Rasche (1968)	DIN 45 WCrV7	0,45	1,00	1,10	*****	*****	1,90	*****
	62SiMnCr4	0,62	1,30	0,90	*****	*****	1,90	0,20
Iron and Steel (1968)	Hecla 135	0,60	*****	2,00	2,00	*****	1,50	*****
	CM C	0,40	*****	1,15	1,25	*****	0,27	*****
	CRD Nichroma	0,45	*****	0,65	3,00	*****	*****	*****
Bishop (1955)	DIN X45NiW5852	0,45	1,35	13,50	13,00	*****	1,25	1,20
	40NiCrMo15	0,40	*****	1,25	3,80	0,20	*****	*****
	35NiCrMoV6	0,35	*****	0,70	1,70	0,20	*****	*****
Bungardt (1966)	DIN 55NiCr10	0,55	*****	0,90	2,80	*****	*****	*****

Verifica-se aqui, que a proposta de utilização do AISI S1, aço CrMoVW, está alinhada com as sugestões dos autores.

Em (KRAUSS et al. 1997) também se encontra a indicação de utilização de aços ferramenta do tipo “Resistente ao Coque” para a fabricação de navalhas para o corte de sucata. A Tabela 2.3 apresenta esta informação e um comparativo entre resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente para vários tipos de aços ferramenta. As unidades são assimétricas de forma a facilitar a comparação de propriedades entre os materiais. Quanto maior o valor, melhor é o desempenho.

Tabela 2.3: Comparação entre resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente para diferentes tipos de aço ferramenta (KRAUSS et al. 1997).

Aço	Resistência ao Desgaste	Tenacidade	Dureza a quente	Aplicação
S2	2	8	2	Corte pesado a frio, tesouras para corte de sucata e tesouras para corte a quente com vida moderada
S5	2	8	3	
S1	4	8	5	
H11	3	9	6	Corte a quente de peças pesadas e corte a frio
A8	4	8	6	
O1	4	3	3	Tesouras para trabalho a frio no corte contínuo de peças de pequena e média espessuras
A2	6	5	5	
D2	8	2	6	
M3	8	2	8	Tesouras para aplicações que exijam alta resistência ao desgaste
M4	9	2	8	

Pode-se observar que com uma dureza intermediária, o S1 mantém uma tenacidade extremamente elevada, garantindo que as navalhas absorvam a energia proveniente do tensionamento durante o corte de sucata sem que haja quebra da ferramenta.

(KOUTSKY 1978) avaliou o desempenho de navalhas para corte de sucata, as quais possuíam composições químicas similares às indicadas por (BISHOP et al.). Seus desempenhos são expressos em toneladas de sucata cortada conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Vida útil das navalhas utilizadas no primeiro teste (KOUTSKY 1978).

Navalha	Composição Química							Dureza (Hrc)	Vida (t)	Resultado
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Zr			
SRN	0,45	0,48	0,95	0,95	1,4	0,5	0,08	50-54	1500	Quebras
X	0,55	0,6	1	1,75	0,6	0,08	*****	48-53	3100	Desgaste excessivo
ULTRA 2H	0,5	1	5	*****	1,4	1,4	*****	49-51	3500	Quebras por fragilidade

No caso das navalhas SRN, verificou-se que, apesar de uma composição química adequada, a microestrutura conferida ao material pelo tratamento térmico, formada por bainita heterogênea e ferrita, promovia suas quebras e conseqüentemente a menor vida útil em operação.

Para as navalhas X, observou-se que os menores teores de Mo e V poderiam estar relacionados com o excessivo desgaste.

Já para as navalhas ULTRA 2H, que obtiveram o melhor resultado, observou-se que maiores teores de Mn e de elementos formadores de carbonetos como Cr, Mo e V, garantem uma maior resistência ao desgaste.

Baseando-se nestes resultados, outros 4 materiais com composições químicas mais adequadas às solicitações foram elaborados conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Composição química das navalhas utilizadas no segundo teste (KOUTSKY 1978).

Navalha	Composição Química								
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S
59	0,54	0,21	1,35	4,00	*****	0,67	0,10	0,01	0,02
75	0,53	0,38	1,60	3,00	0,50	*****	0,09	0,02	0,02
78	0,37	0,28	1,31	4,50	0,52	*****	0,08	0,02	0,02
84	0,78	0,76	5,25	*****	0,62	*****	0,27	0,02	0,02

Ensaio laboratoriais foram conduzidos para a determinação das propriedades mecânicas de resistência à tração e tenacidade. Estes resultados são apresentados nas Figuras 2.13 à 2.21.

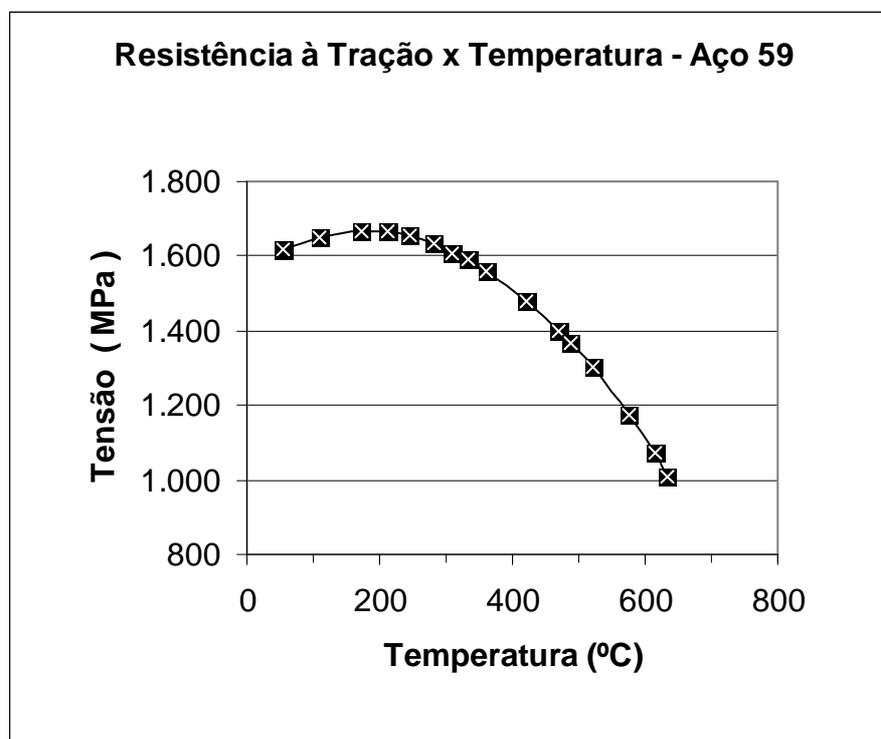


Figura 2.13: Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 59. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

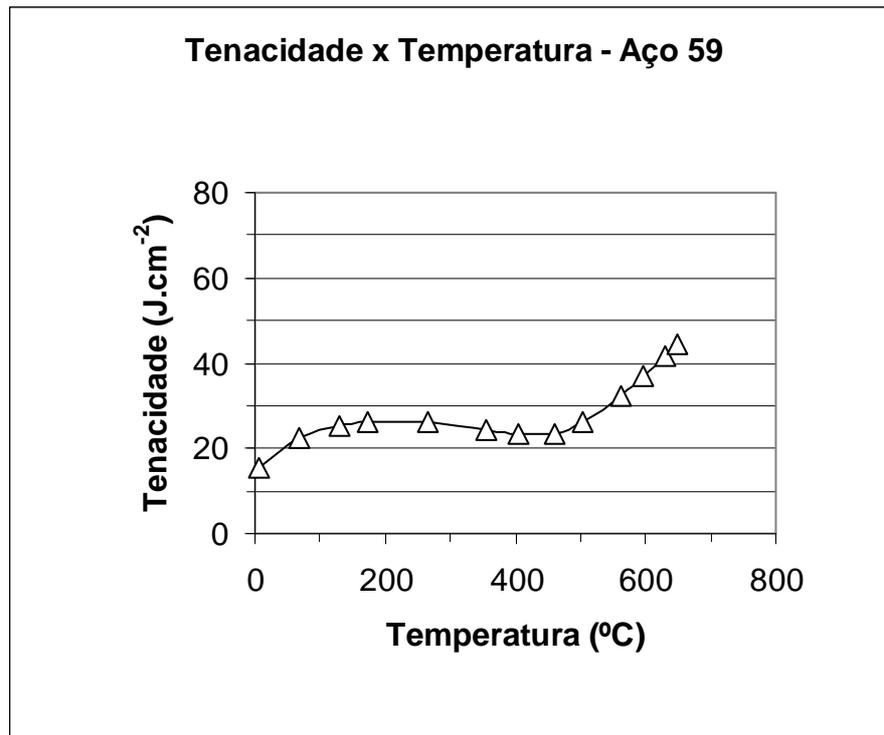


Figura 2.14: Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 59. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

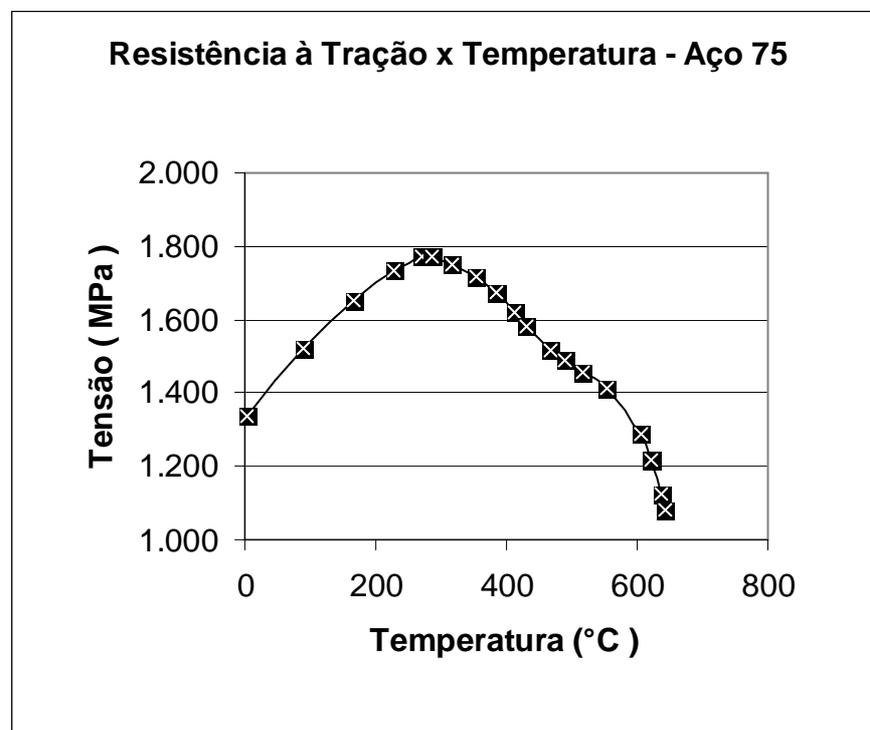


Figura 2.15: Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 75. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

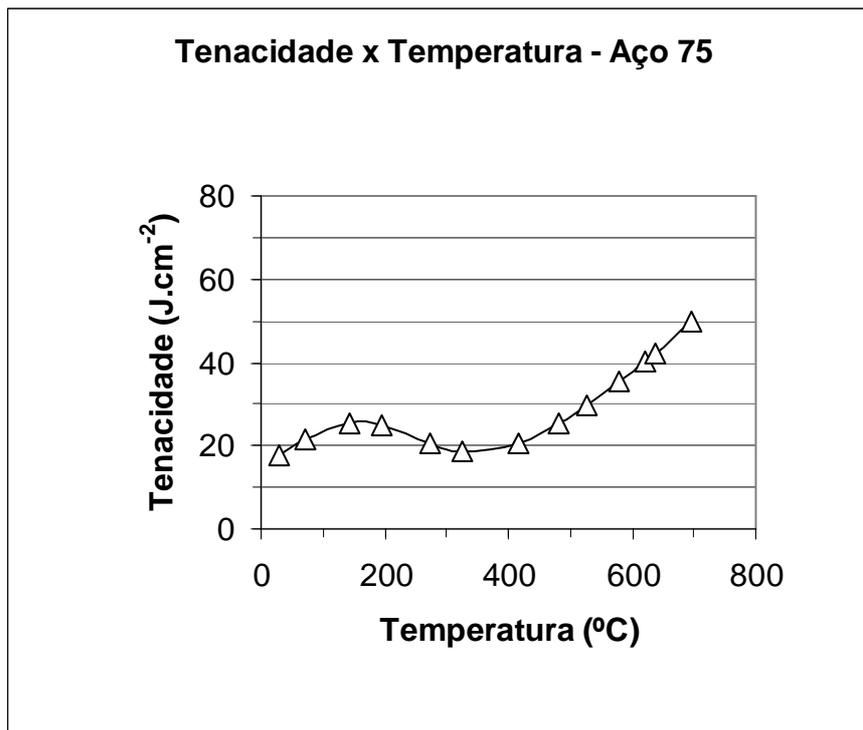


Figura 2.16: Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 75. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

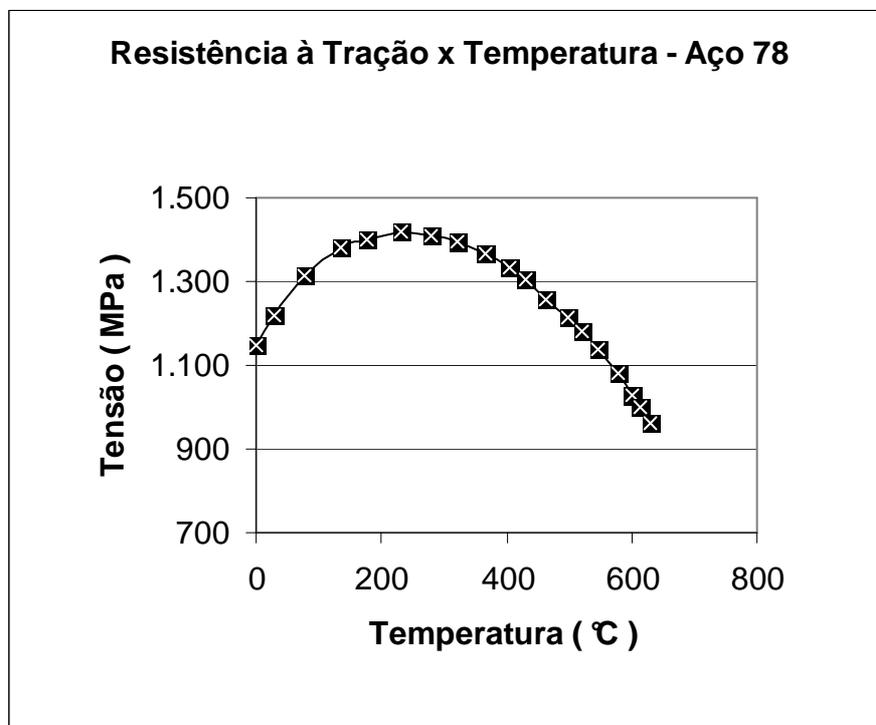


Figura 2.17: Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 78. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

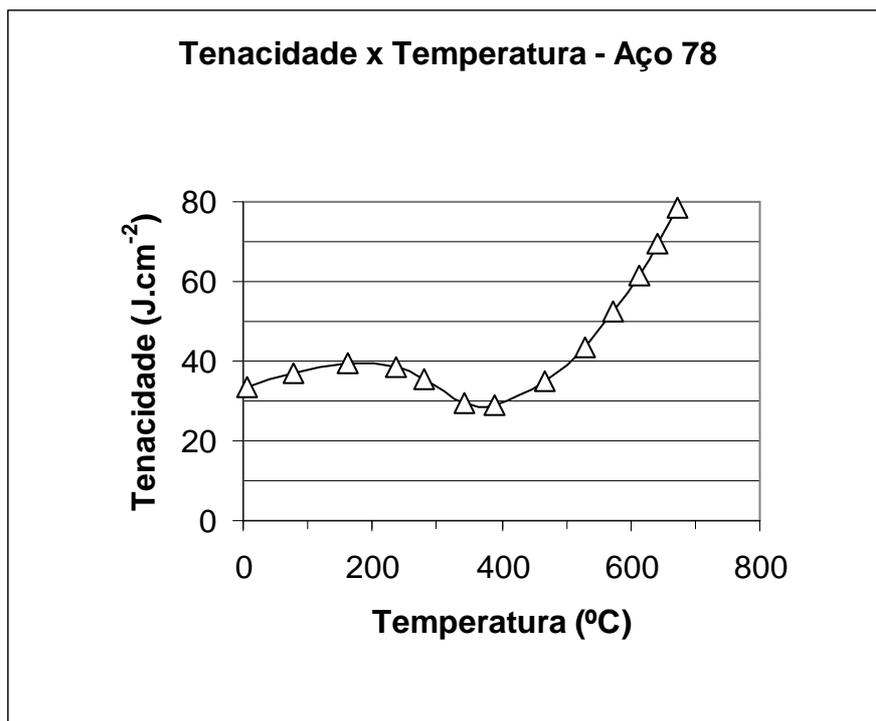


Figura 2.18: Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 78. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

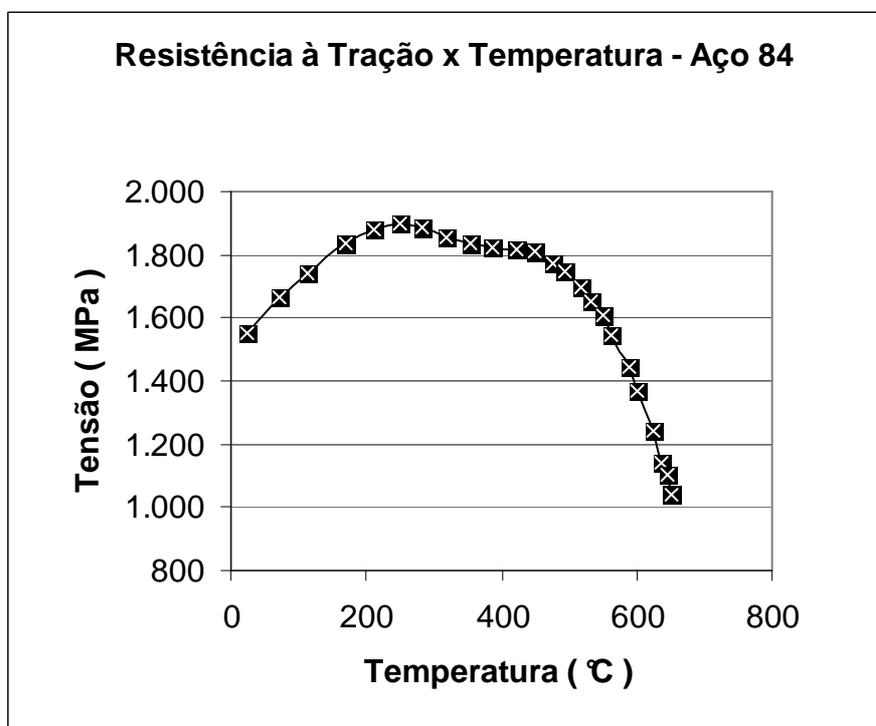


Figura 2.19: Variação da resistência à tração em função da temperatura de revenido para o aço 84. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

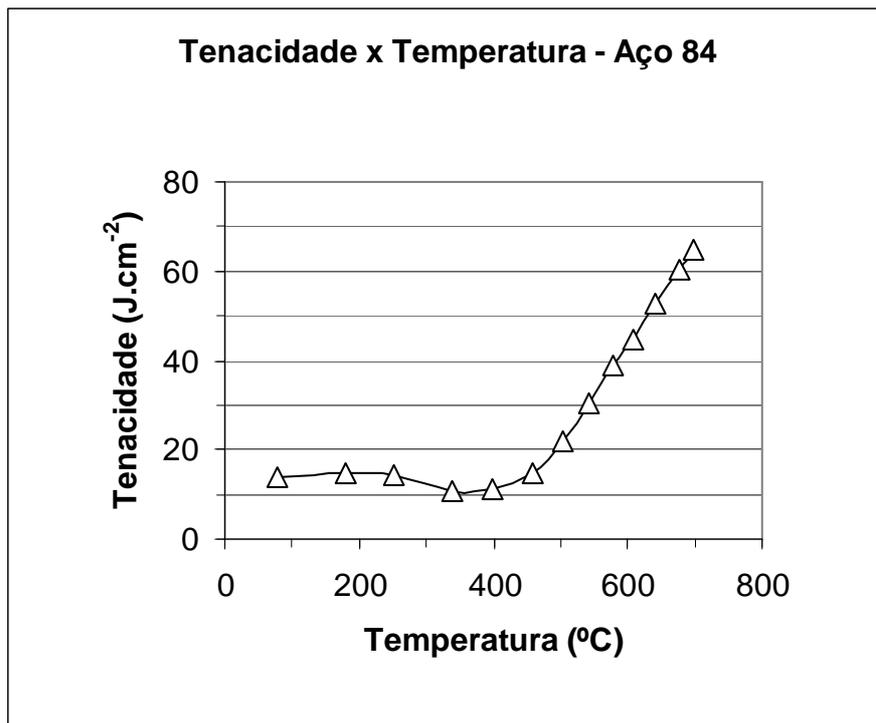


Figura 2.20: Variação da tenacidade em função da temperatura de revenido para o aço 84. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

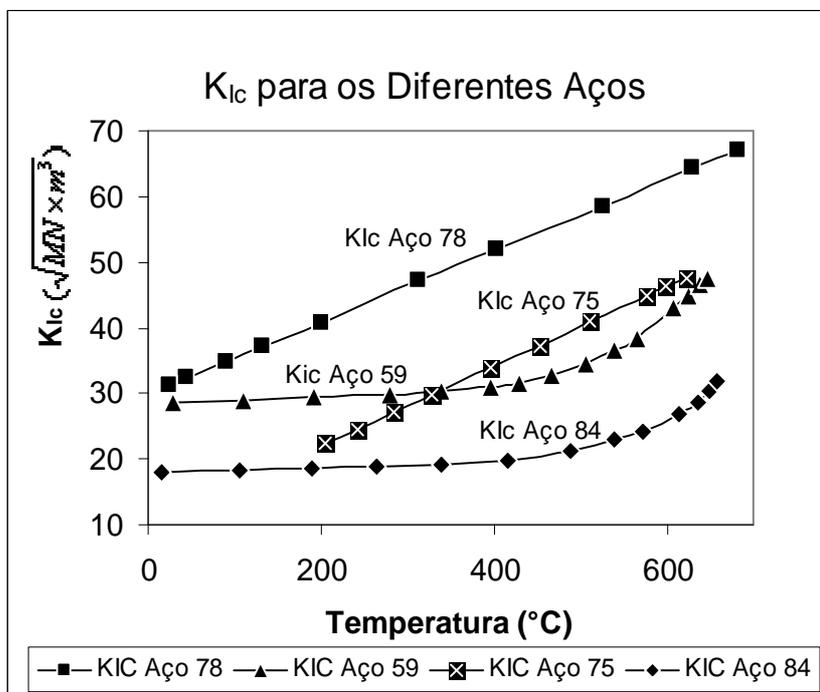


Figura 2.21: Variação da tenacidade à fratura, K_{IC} para os aços 59,75, 78 e 84. Adaptado de (KOUTSKY 1978).

Os resultados mostram que, apesar do aço 84 apresentar a maior resistência à tração antes do início da deformação plástica, ele não é o material com maior tenacidade. A superioridade do aço 78 se destaca neste fator quando observados os resultados do teste de impacto. Enquanto que revenido a 500°C este material apresenta uma resiliência em torno de 40 (J.cm⁻²), para os outros materiais este valor é de no máximo 20 (J.cm⁻²). Os valores de K_{IC} reforçam esta tendência, sendo superiores aos outros aços em toda a faixa de temperaturas.

Destes resultados, concluiu-se que este seria o material mais indicado para a fabricação de navalhas para o corte de sucata.

Os testes práticos mostraram que estas navalhas eram capazes de cortar 8.000 t de sucata, antes da perda completa de sua capacidade de corte. A Figura 2.22 apresenta a fotografia de uma destas navalhas ao final do seu período de uso, onde pode-se observar o excessivo abaulamento das arestas de corte.

Este resultado representa um aumento de mais de 100% na vida útil das navalhas em comparação com o melhor desempenho anterior que foi obtido com as navalhas ULTRA 2H.

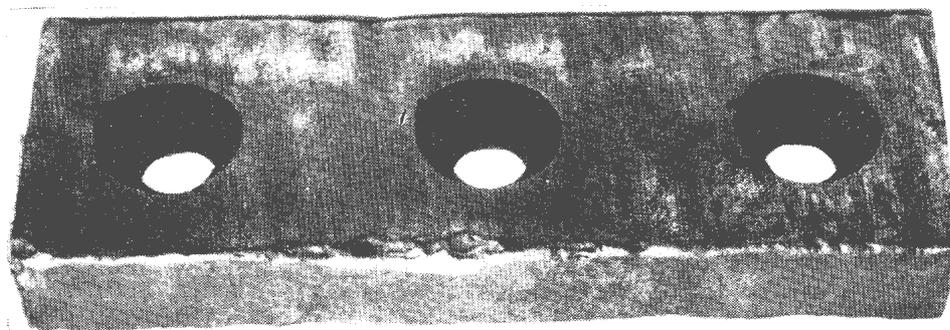


Figura 2.22: Aspecto das arestas de corte da navalha do aço 78 após o corte de 8.000 t de sucata (KOUTSKY 1978).

Comparando-se a composição química deste aço com o S1 que se propõe testar, verifica-se que este último está adequado para a aplicação, pois os teores dos elementos formadores de carbonetos Cr, Mo e V são inferiores aos do aço 78, mas ainda suficientes para formarem carbonetos dispersos em uma matriz martensítica.

O S1 também possui um percentual elevado de Tungstênio, e de acordo com (KRAUSS et al. 1997) este elemento auxiliará na manutenção de sua resistência e dureza

no trabalho à quente que ocorrerá em virtude do atrito sofrido pelas navalhas durante o corte de sucata.

Já a presença de Si no S1 auxilia para que o mesmo mantenha sua dureza elevada, pois de acordo com (PORTER e EASTERLING 1992), este elemento estabiliza a ferrita, elevando as temperaturas A1 e A3, dificultando o decréscimo da dureza na faixa de temperaturas de revenimento.

A Figura 2.23 apresenta a variação da temperatura de revenimento do aço S1 em função do percentual em peso de Si neste material.

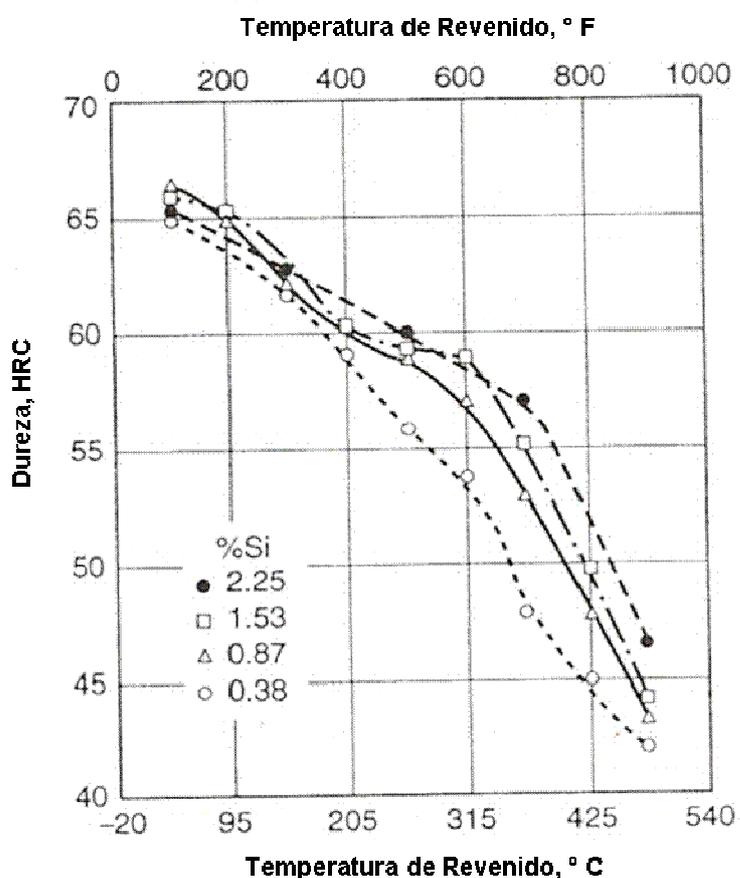


Figura 2.23: Variação da temperatura de revenimento do aço S1 em função do percentual em peso de Silício (KRAUSS et al. 1997).

Nesta figura pode-se observar um aumento progressivo da temperatura de revenimento necessária para se atingir uma determinada dureza em função da elevação do percentual em peso de Si no aço.

2.5.2 Aço AISI D2

Testes realizados por (VERMA et al. 1994) comparam o desempenho de navalhas de carbeto de tungstênio (WC), fabricadas a partir de metalurgia do pó, com navalhas de aço AISI D2 durante o corte de sucata de aço ao silício.

A Tabela 2.6 apresenta a composição química do aço ferramenta.

Tabela 2.6: Composição química do aço AISI D2 utilizado no experimento de (VERMA et al. 1994).

Aço	Composição Química					
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
AISI D2	1,45	0,30	0,15	11,00	0,40	0,60
	1,65	0,60	0,30	12,50	0,70	1,00

Foram conduzidos testes com 3 condições:

- 1- Navalhas de WC;
- 2- Navalhas de aço AISI D2 temperadas em vácuo;
- 3- Navalhas de aço AISI D2 temperadas em vácuo e posteriormente cobertas por TiN (PVD).

A Tabela 2.7 apresenta os resultados dos testes, indicando o número de horas de operação de cada navalha e a tonelagem processada no período. Para cada condição foram testadas 8 navalhas numeradas de 0 à 7.

Tabela 2.7: Comparação entre os desempenhos de navalhas de WC, AISI D2 temperadas em vácuo e aço AISI D2 temperadas em vácuo + PVD (VERMA et al. 1994).

Navalha n°	Carbeto Sinterizado		Temperada à vácuo + TiN		Temperada à vácuo	
	(t)	(horas)	(t)	(horas)	(t)	(horas)
0	1584	198	3200	400	2550	319
1	2735	342	2281	285	2871	359
2	1613	202	5500	688	2630	329
3	1672	209	2650	356	2379	297
4	2735	342	3200	400	2550	319
5	2829	354	2850	356	2379	297
6	1686	211	5501	688	2630	329
7	2546	318	2281	285	2871	359
Total		2176		3458		2608
Vida Média por Navalha (h)		272		432		326
% de Melhoria				59%		20%

Os resultados mostraram a superioridade do aço AISI D2 nas condições de temperado a vácuo e temperado a vácuo + PVD em relação ao WC, justificando o emprego de aços ligados ao Cr, V e Mo em ferramentas de corte. Aliado ao fato da tenacidade do aço S1 ser 4 vezes superior a do D2 nas mesmas condições, conclui-se que há uma grande probabilidade do S1 apresentar um excelente desempenho.

Mesmo com um custo 15% superior, as navalhas de D2 temperadas a vácuo e cobertas com TiN apresentaram ganhos de produção de até 59% em relação às lâminas de Carbetto de Tungstênio.

2.5.3. Aços CW (CRU-WEAR)

(SHIH e MC CALL 2004) realizaram testes comparativos de desempenho dos aços AISI D2 e CW durante o corte de pneus em um shredder – Figura 2.24, os quais possuem uma malha de aço interna.



Figura 2.24: Sistema de navalhas para o corte de pneus. (SHIH e MC CALL 2004).

A Tabela 2.8 apresenta a composição química do aço CW.

Tabela 2.8: Composição química do aço Cru-Wear utilizado no experimento (SHIH e MC CALL 2004).

Aço	Composição Química						
	C	Co	V	Mo	W	Si	Mg
CW	1,10	7,50	2,40	1,60	1,15	1,10	0,35

Os resultados são apresentados nas Figuras 2.25 e 2.26 na forma de desgaste x local de medição. Os pontos de a à g são as regiões de medição de desgaste ao longo da aresta de corte da navalha.

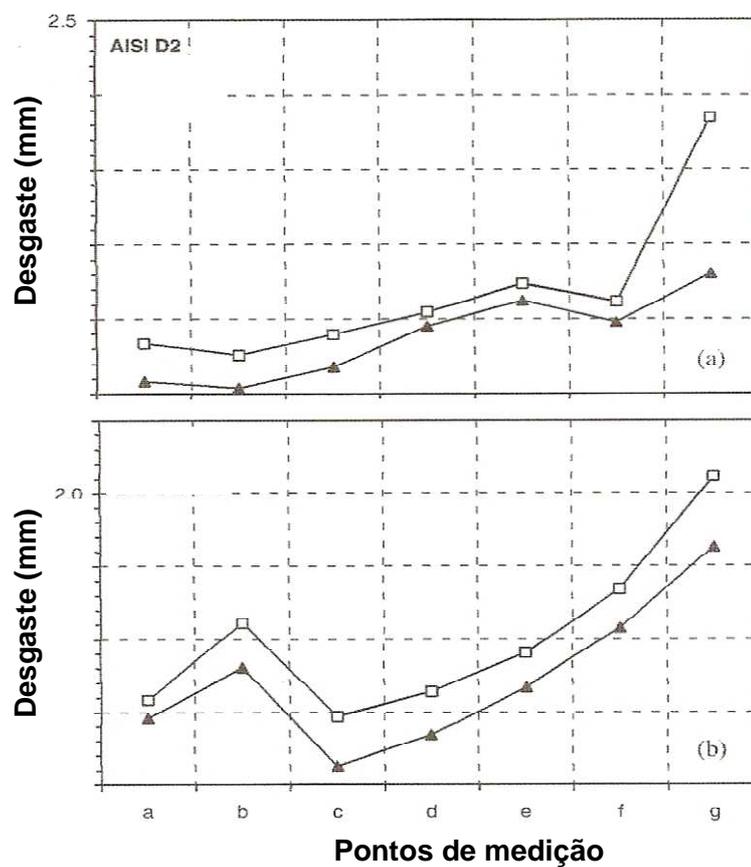


Figura 2.25: Variação do desgaste ao longo da aresta de uma navalha de aço D2. Cada curva representa uma linha de processamento. (SHIH e MC CALL 2004).

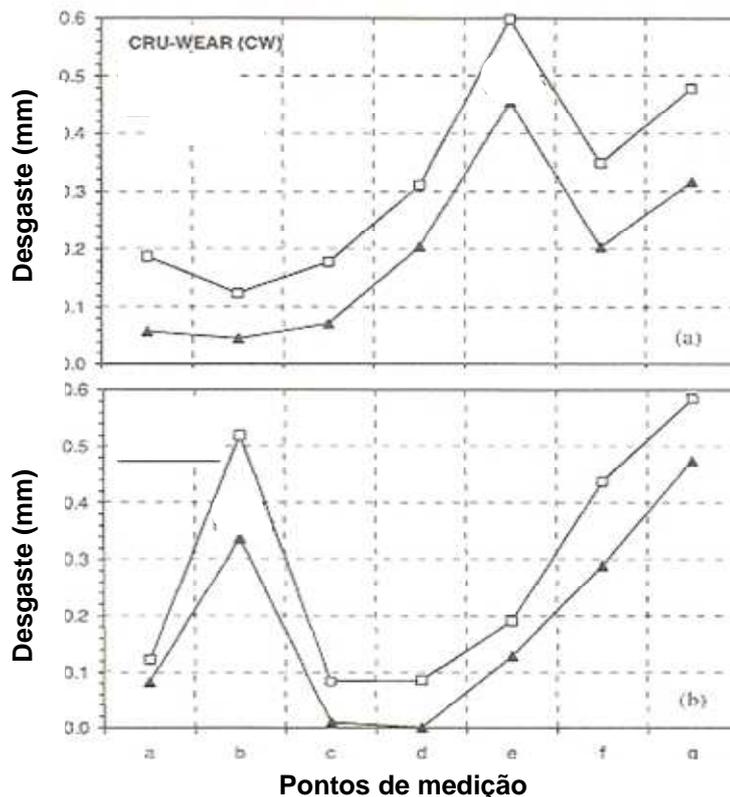


Figura 2.26: Variação do desgaste ao longo da aresta de uma navalha de aço CRU-WEAR . Cada curva representa uma linha de processamento. (SHIH e MC CALL 2004).

O resultado dos testes mostra a superioridade do aço CW em relação ao D2, atingindo-se o dobro da vida útil. A diferença de desempenho foi associada basicamente à substituição do carbeto de cromo do D2 pelo carbeto de vanádio do aço CW. Infelizmente, aços com teores de C superiores a 1% e ainda com a presença de Co em sua composição, possuem um custo muito elevado em virtude dos baixos volumes de produção.

Os autores também comentam a substituição do SAE 4340 pelo AISI D2. Os mesmos afirmam a viabilidade econômica de substituição do primeiro, historicamente empregado na fabricação de navalhas para corte de sucata em virtude de seu desempenho, custo e disponibilidade no mercado, pelo AISI D2.

Porém, como no processo de corte de sucata não se pode garantir a homogeneidade de dureza e espessura dos materiais a serem cortados, o emprego do D2 deve ser realizado com cautela, já que o mesmo apresenta uma dureza próxima à 60 HRC, mesmo quando revenido à temperatura de 500 °C, podendo haver rompimento das navalhas. Isto, aliado à maior tenacidade do S1 e ao fato da maior disponibilidade no mercado deste aço em relação ao D2, levaram à escolha do primeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar comparativamente o desempenho durante o corte de sucata das navalhas de aço SAE 4340 e AISI S1, foram realizadas medições do desgaste das arestas de corte com a utilização de um relógio comparador.

Devido à diferença entre os tipos de aço, diferentes tratamentos térmicos foram empregados, buscando o melhor resultado de resistência ao desgaste, sem comprometimento de suas tenacidades.

Foi realizada também a caracterização metalúrgica de amostras dos materiais para auxiliar na interpretação dos resultados.

3.1 Tratamento térmico

Analisando-se a espessura das navalhas (90 mm), verifica-se que uma têmpera em óleo não garantiria uma microestrutura totalmente martensítica até o núcleo destas ferramentas em virtude do lento resfriamento nesta região. Com isto, verifica-se que somente outros 2 tratamentos térmicos poderiam trazer propriedades mecânicas adequadas a estas ferramentas: a austêmpera e a martêmpera.

Sabe-se que o primeiro seria mais indicado, pois se obteria uma microestrutura bainítica ao longo de toda a ferramenta, a qual possui uma excelente tenacidade, porém não se sabe ao certo se sua resistência ao desgaste seria adequada. Aliando-se isto ao fato da austêmpera não fazer parte dos ciclos utilizados na linha de produção do fornecedor, optou-se pela realização da “martêmpera modificada”, ciclo que difere da martêmpera convencional somente pelo fato de que o resfriamento do material se dá até um patamar entre M_i e M_f e não em temperaturas superiores à M_i (230°C para o S1), como é na martêmpera convencional.

O sal utilizado para manutenção da temperatura de martêmpera foi o CS 90.

A Tabela 3.1 apresenta o ciclo de tratamento térmico utilizado para o aço AISI S1.

Tabela 3.1: Ciclo de tratamento térmico utilizado para o aço AISI S1.

ETAPA	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (h)
Pré-aquecimento	500	2,0
Aquecimento	930	1,5
Martêmpera	180	0,5
1° Revenido	De 300 à 450, para a faixa de durezas de 50 à 56 HRC	2,0
2° Revenido		2,0
3° Revenido		2,0

De acordo com o diagrama de transformação isotérmica, Figura 3.1, a martêmpera à 180°C está adequada para propiciar a formação de martensita ao longo da espessura da ferramenta sem o risco de fragilização e surgimento de trincas que poderiam ocorrer na têmpera convencional.

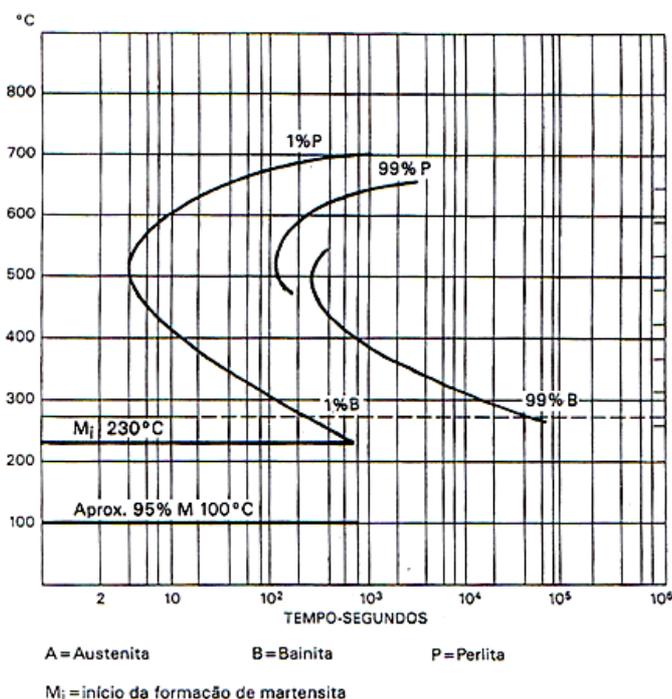


Figura 3.1: Diagrama TTT do aço AISI S1 (KRAUSS et al. 1997).

As curvas de revenido, (FOREMAN 1997) da Figura 3.2, auxiliaram na definição das temperaturas adequadas para a faixa de dureza objetivada de 50 à 56 HRC, de acordo com a composição química de cada jogo de navalhas.

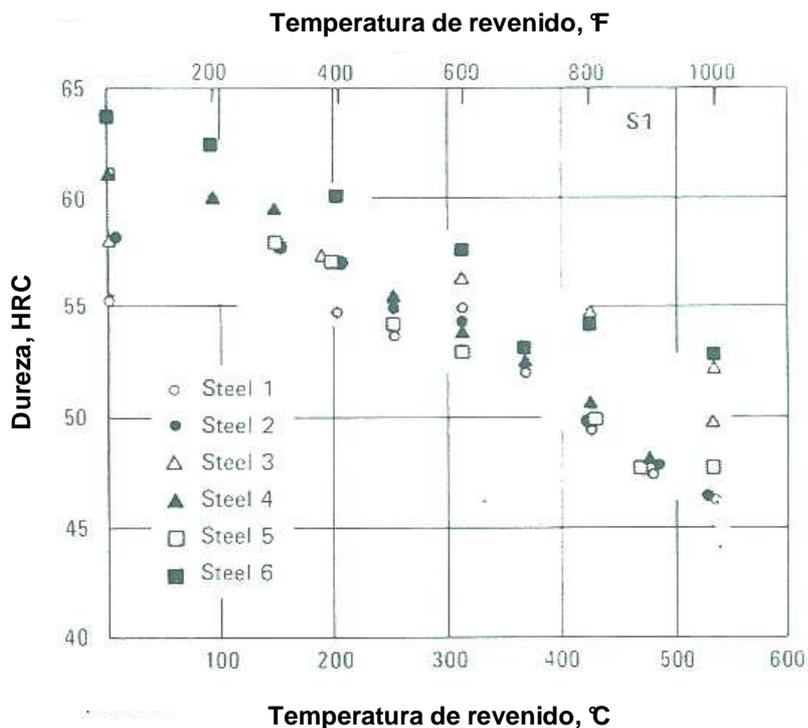


Figura 3.2: Curvas de revenido para o aço AISI S1 (FOREMAN 1997).

Para o aço SAE 4340, também em função da espessura da ferramenta, manteve-se o ciclo historicamente utilizado para as navalhas da prensa tesoura. O mesmo é composto por têmpera em óleo seguida de revenido, de forma a se atingir uma dureza elevada.

O ciclo utilizado é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Ciclo de tratamento térmico utilizado para o aço SAE 4340.

ETAPA	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (h)
Pré-aquecimento	400	1,0
Aquecimento	850	1,5
Resfriamento (óleo)	60	0,25
Revenido	300°C para 46 HRC	2,0

3.2. Caracterização metalúrgica

Para auxiliar na interpretação dos resultados, foram realizadas análises químicas, metalográficas e de dureza em corpos de prova retirados das navalhas após o uso.

As análises químicas foram realizadas em um espectrômetro Thermo Electro Corporation, modelo ARL4460, as medições de dureza em um durômetro Wolpert, modelo

Testor HT2a e as metalografias em um microscópio óptico Olympus, modelo BX60M. O software para a aquisição das imagens foi o Quantimet Q600, versão V.01.06A.

3.3. Medição do desgaste

Devido às grandes dimensões da prensa tesoura e à necessidade de medição do desgaste no próprio local de operação, pois cada navalha pesa 91 kg, desenvolveu-se um equipamento para este fim na própria empresa – Figuras 3.3 e 3.4. De forma a garantir a confiabilidade das medições, o instrumento era calibrado mensalmente pela área de metrologia da empresa. O mesmo é composto por um eixo de deslocamento horizontal, no qual é acoplado um relógio comparador que percorre toda a aresta de corte da navalha, medindo as variações do relevo da mesma em milímetros. Este mesmo eixo tem sua fixação em uma estrutura com sapatas metálicas, que garantem o perfeito alinhamento e um ângulo de 45° entre o relógio comparador e a face da navalha.

Seguindo a mesma metodologia de (SHIH e MC CALL 2004) no estudo do desgaste de facas para corte de pneus, a leitura do relógio comparador foi realizada a cada centímetro, numa faixa pré-definida de 42 cm de cada aresta de corte das navalhas, de forma a permitir posteriores comparações de desgaste entre as navalhas– Figura 3.5. Este comprimento de medição foi assim definido em virtude da limitação de curso do relógio.

Adotou-se também a prática de ajustar o zero do relógio comparador em uma navalha nova previamente às medições de desgaste, de forma a facilitar as medições.

Os parâmetros operacionais estabelecidos para a realização dos testes foram os seguintes:

- Pressão do cilindro do clamp = 40 (bar)
- Pressão de pré-carga do cilindro empurrador = 55 (bar)
- Pressão limite para acionamento dos cilindros auxiliares = 90 (bar)
- Tempo de avanço do cilindro empurrador = 2,7 s
- Tempo máximo subida da tesoura = 10 s

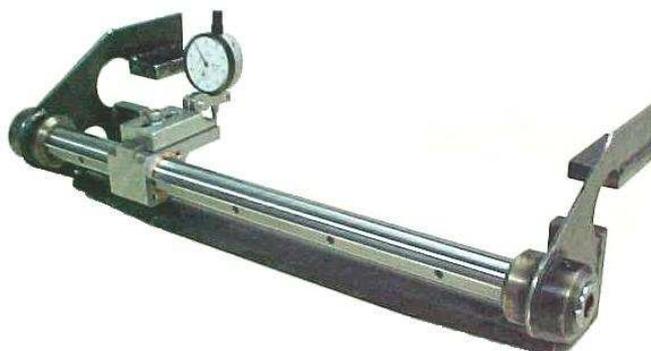


Figura 3.3: Equipamento utilizado para medição do desgaste das navalhas.

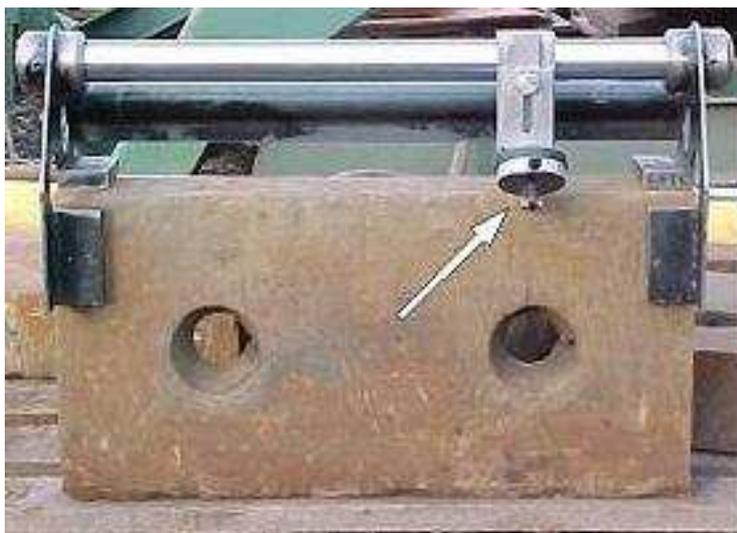


Figura 3.4: Posicionamento do relógio comparador na aresta de corte.

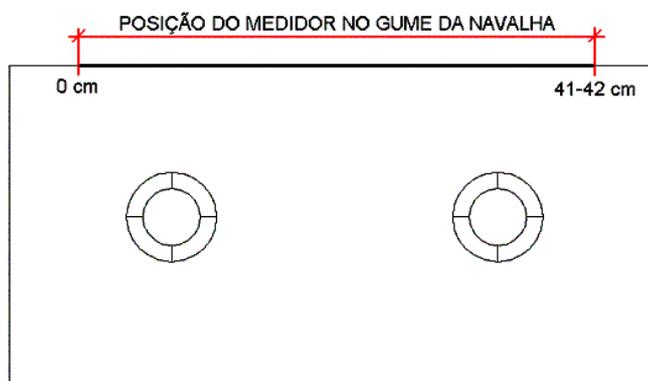


Figura 3.5: Extensão da medição ao longo da aresta de corte.

3.4 Amostragem e restrições no processamento da sucata

O sistema de corte de sucata é composto por 2 pares de navalhas – Figura 3.6, sendo que, para os testes, restringiram-se as medições a um único par, o das navalhas inferiores. Também se estabeleceu a identificação das navalhas de acordo com sua posição no bloco de fixação em Sul e Norte.

De modo a excluir a influência do tipo e quantidade de sucata processada nos resultados de desgaste, já que as densidades das mesmas podem variar de 0,2 a 0,8 (t/m³), se definiu que os testes seriam conduzidos exclusivamente com sucatas com densidade entre 0,2 e 0,3 (t/m³) e os resultados normalizados pela quantidade de sucata processada no período, resultando em valores com a unidade ($\frac{mm}{t \times 10^4}$).

Ao ser instalado, cada par de navalhas operou na mesma posição por um período de 3 a 4 dias, sendo que sua configuração permite que as mesmas sejam viradas 3 vezes aproveitando-se as 4 arestas de corte de cada uma – Figura 3.7.

Foram testados 9 jogos de navalhas do aço AISI S1 e 2 jogos de navalhas do aço SAE 4340, totalizando 32 arestas de corte de navalhas de aço ferramenta e 12 arestas de corte do aço ligado. Em virtude de problemas operacionais, como por exemplo, impossibilidade de medição e quebras de navalhas, alguns arestas de corte não tiveram o seu desgaste medido.

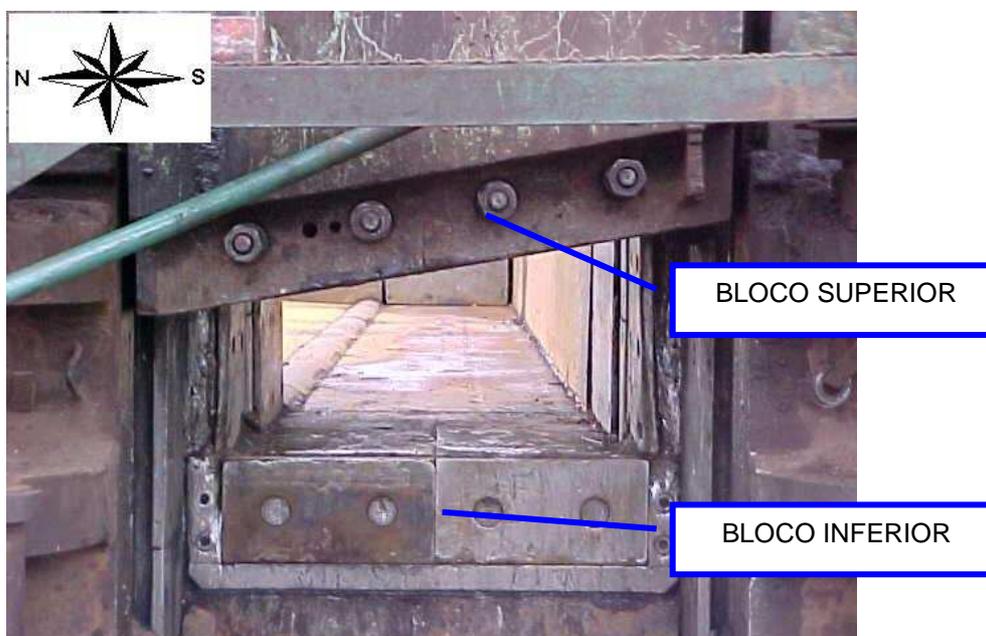


Figura 3.6: Vista frontal da prensa identificando as navalhas superiores e inferiores e suas posições Norte e Sul.

A figura 3.7 apresenta as dimensões da navalha e um corte transversal da mesma. Nela podemos observar a geometria intrincada da ferramenta de corte.

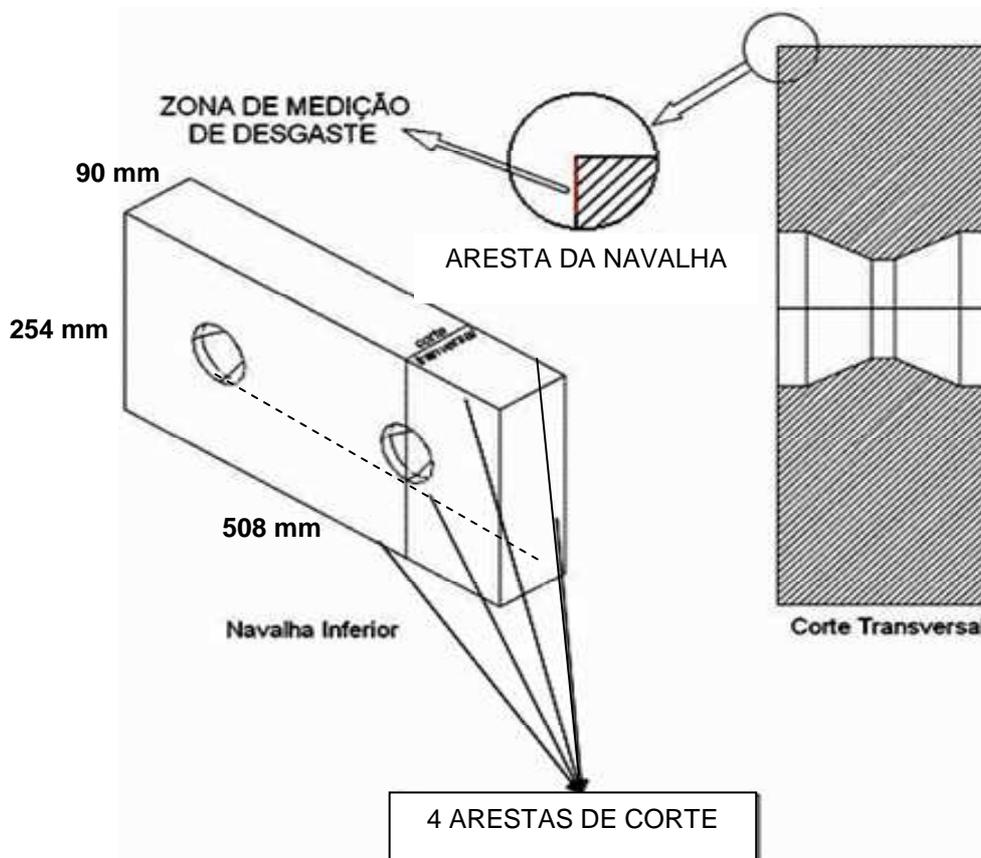


Figura 3.7: Corte transversal da navalha mostrando suas dimensões e em detalhe a área de medição do desgaste e as 4 arestas de corte.

4.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos tratamentos térmicos realizados, foram obtidas durezas em ambos os materiais conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição química e dureza para os pares de navalhas de aço AISI S1 e SAE 4340 utilizados no experimento.

Aço	PAR	C	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	W	Dureza (HRC)
SAE 4340	A e B	0,41	0,21	0,014	0,014	0,76	1,79	0,23	0,01	0,15	----	46
AISI S1	B	0,48	0,82	0,016	0,006	1,38	0,18	0,27	0,19	0,15	2,10	51
	C	0,51	0,96	0,013	0,007	1,37	0,18	0,26	0,18	0,17	2,21	56
	D	0,49	0,95	0,008	0,007	1,37	0,10	0,27	0,18	0,12	2,43	51
	E	0,51	0,86	0,006	0,012	1,37	0,11	0,26	0,20	0,14	2,20	50
	F	0,50	0,96	0,008	0,007	1,37	0,10	0,27	0,18	0,11	2,47	50
	G	0,51	0,86	0,006	0,012	1,37	0,11	0,26	0,20	0,14	2,20	56
	H	0,50	0,96	0,008	0,007	1,37	0,10	0,27	0,18	0,11	2,47	53
	I	0,51	0,96	0,025	0,009	1,13	0,07	0,18	0,16	0,09	1,82	52

Em virtude do par A do aço S1 ter quebrado sendo perdido em meio à sucata durante o processamento, não foram feitas análise química nem metalográfica nestas navalhas.

Os pares A, C e G do aço S1, todos com 56 HRC, apresentaram excessiva fragilidade e quebraram durante as primeiras horas de operação, antes da primeira medição como pode ser observado nas Figuras 4.1 e 4.2.

Não foram detectadas trincas ou microestruturas indesejadas nestas amostras.

Como durezas iguais ou superiores à 56 HRC mostraram-se excessivamente frágeis, adotou-se como padrão para estas ferramentas uma faixa de dureza de 51 à 53 HRC, com isto eliminaram-se as quebras de navalha e os riscos de acidentes operacionais decorrentes dos procedimentos de remoção das navalhas quebradas.

A partir dos resultados, observou-se uma forte tendência à redução do desgaste com o aumento da dureza do material como já era esperado.

As Figuras 4.3 à 4.10 apresentam as metalografias realizadas em corpos de prova de cada uma das navalhas.



Figura 4.1: Par de navalhas C do aço AISI S1 após 4 h de operação.



Figura 4.2: Par de navalhas G do aço AISI S1 após 6 h de operação.

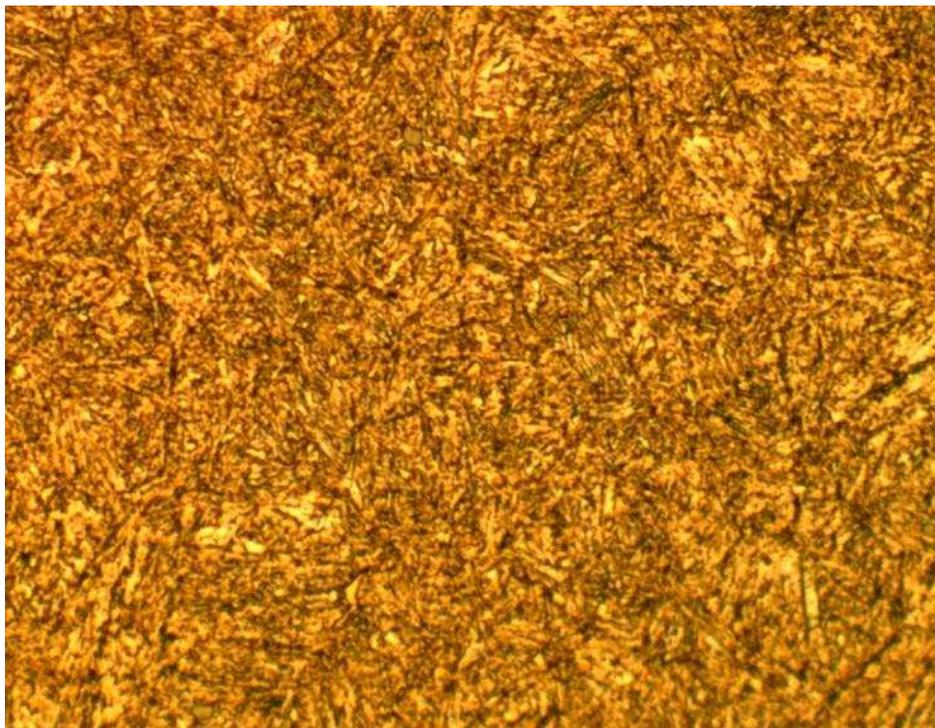


Figura 4.3: Microestrutura representativa do aço SAE 4340, pares A e B composta por martensita revenida com dureza de 46 HRC. Ataque, Nital, 200 X.

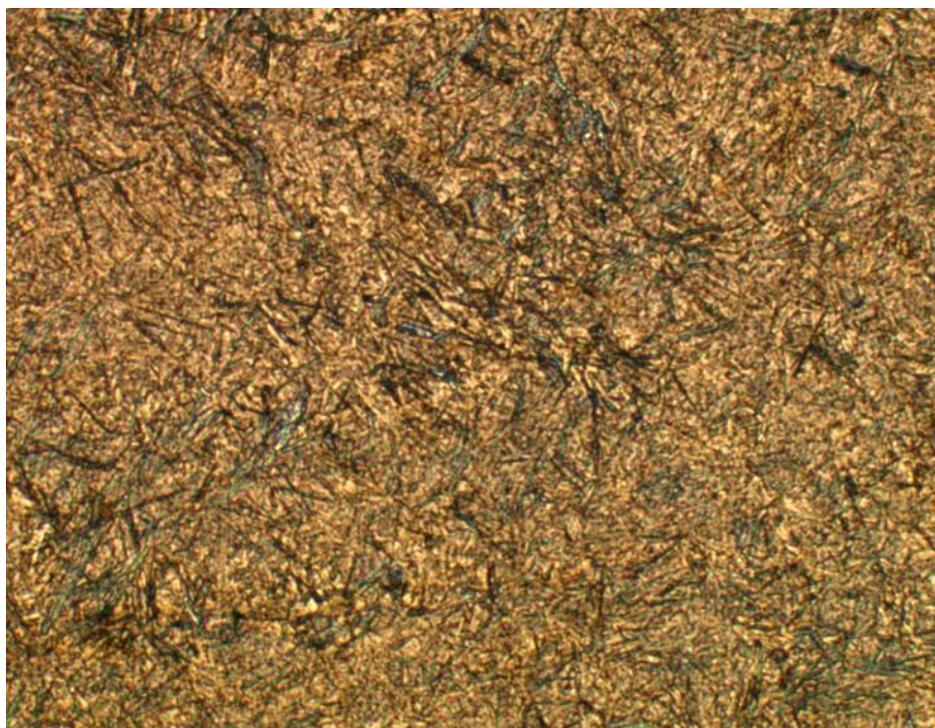


Figura 4.4: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par C composta por martensita revenida com dureza de 56 HRC. Ocorreu quebra em operação. Ataque, Nital, 200 X.

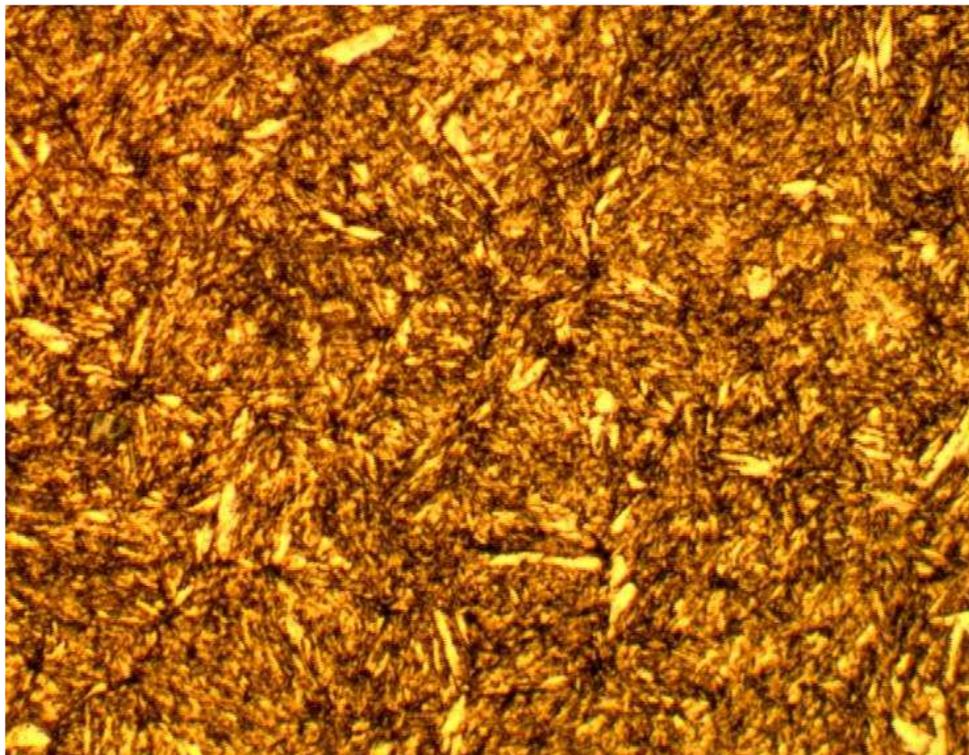


Figura 4.5: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par D composta por martensita revenida com dureza de 51 HRC. Ataque, Nital, 200 X.

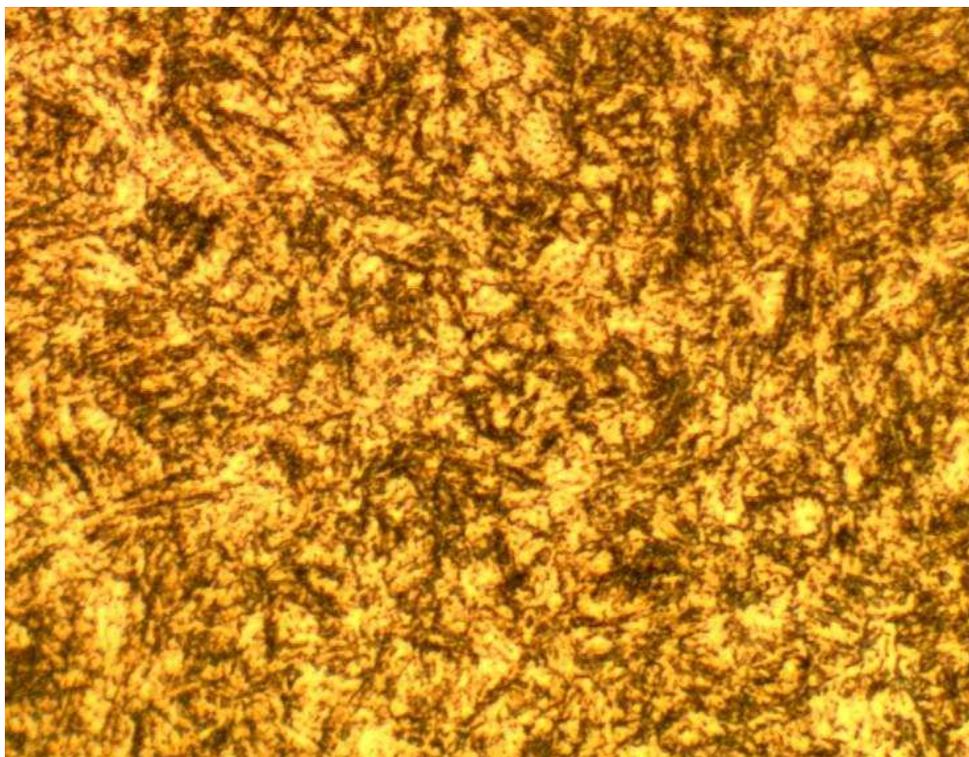


Figura 4.6: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par E composta por martensita revenida e carbonetos com dureza de 50 HRC. Ataque, Nital, 200 X.

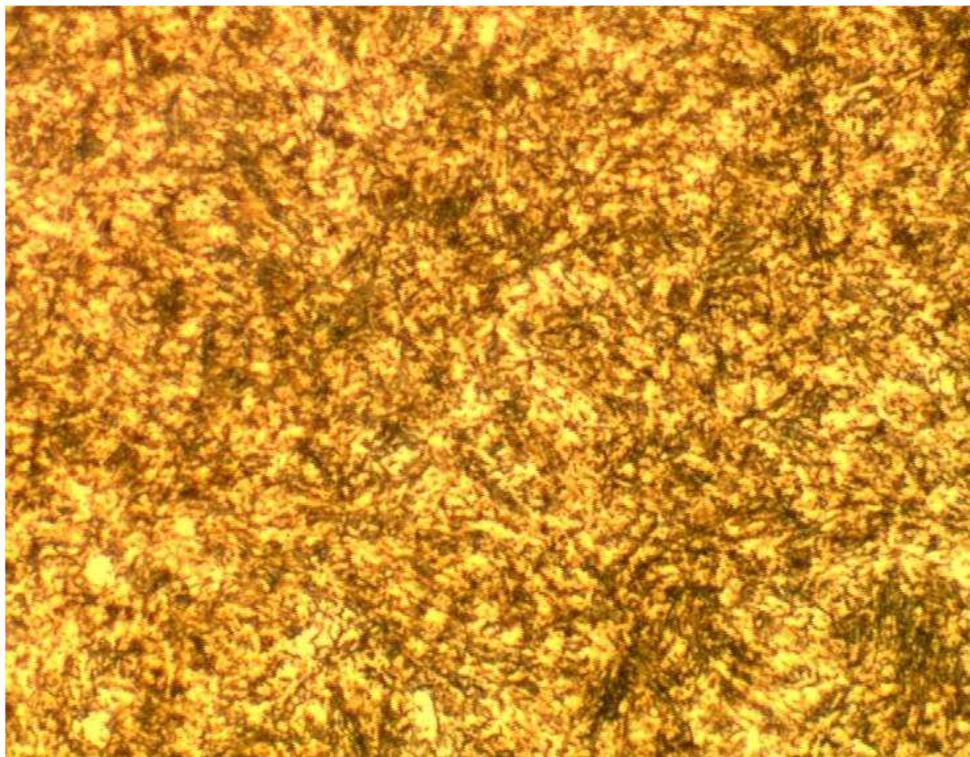


Figura 4.7: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par F composta por martensita revenida e carbonetos com dureza de 50 HRC. Ataque, Nital, 200 X.

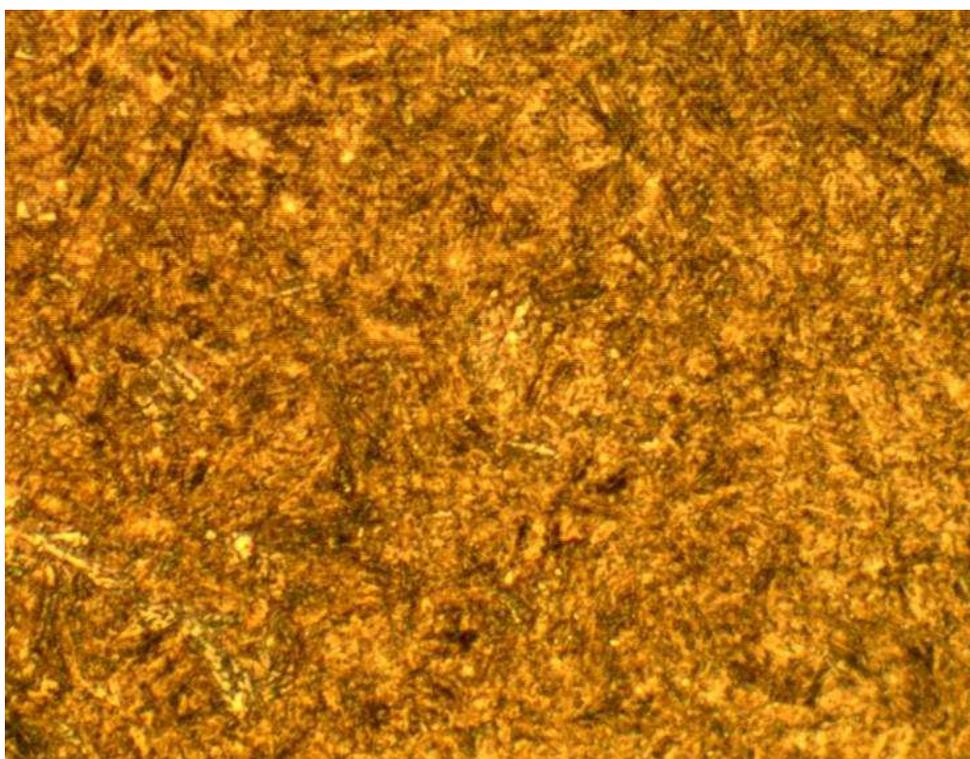


Figura 4.8: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par G composta por martensita revenida com 56 HRC. Ocorreu quebra em operação. Ataque, Nital, 200 X.

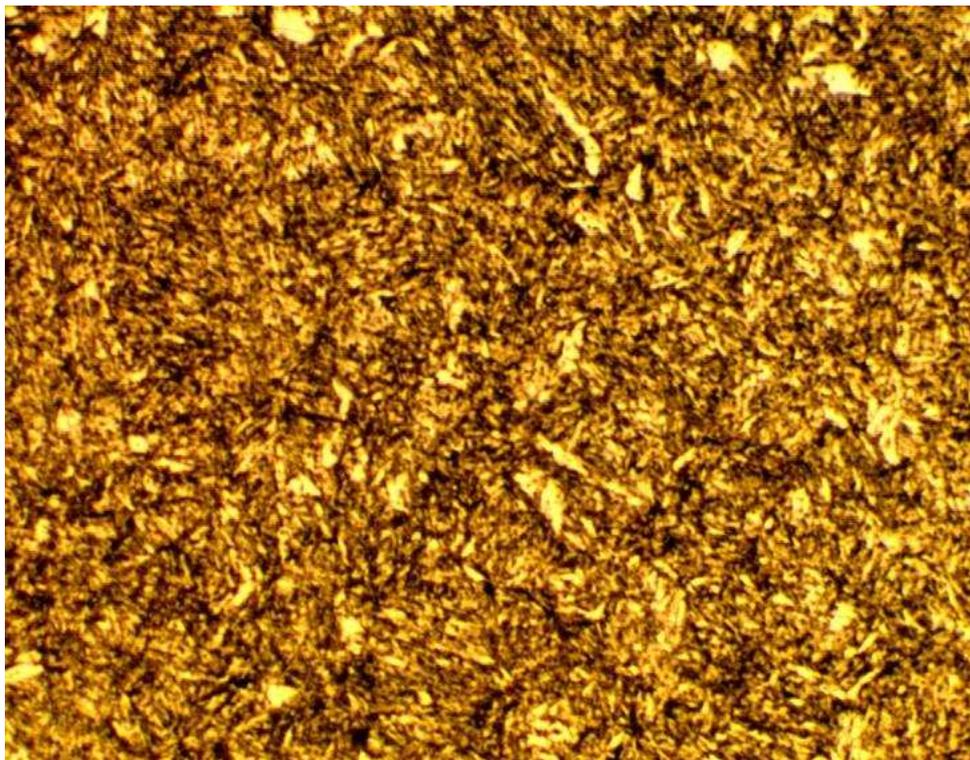


Figura 4.9: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par H composta por martensita revenida com dureza de 53 HRC. Ataque, Nital, 200 X.

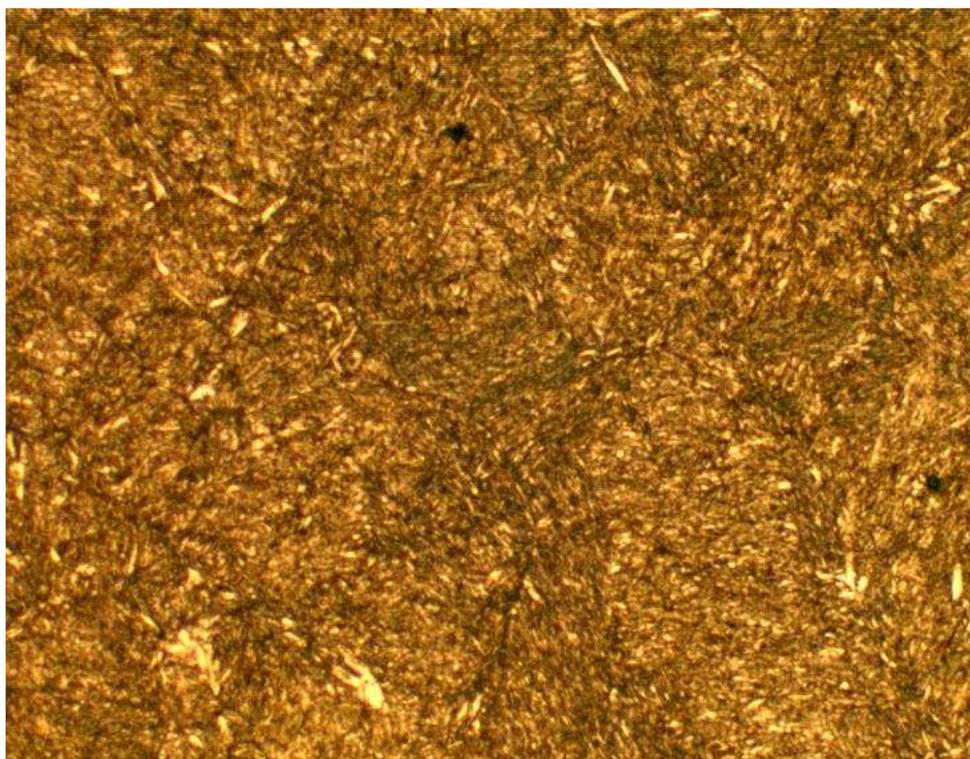


Figura 4.10: Microestrutura representativa do aço AISI S1, par I composta por martensita revenida com dureza de 52 HRC. Ataque, Nital, 200 X.

Pode-se concluir que a necessidade de 3 revenidos para este caso é questionável, pois seu objetivo é exclusivamente o de decompor a austenita retida formada durante o resfriamento em ferrita e cementita, porém analisando-se as micrografias, praticamente não se encontra austenita.

Uma sensível diferença no desgaste das navalhas de aço AISI S1 em relação ao aço SAE 4340 foi observada após operação sob as mesmas condições. A Figura 4.11 mostra o desgaste médio a cada centímetro das arestas de corte das navalhas de ambos os aços. Enquanto o desgaste médio do SAE 4340 foi de 5,5 mm, o desgaste do aço ferramenta foi de 2 mm. A diferença é confirmada pelo aspecto visual de ambas as navalhas nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

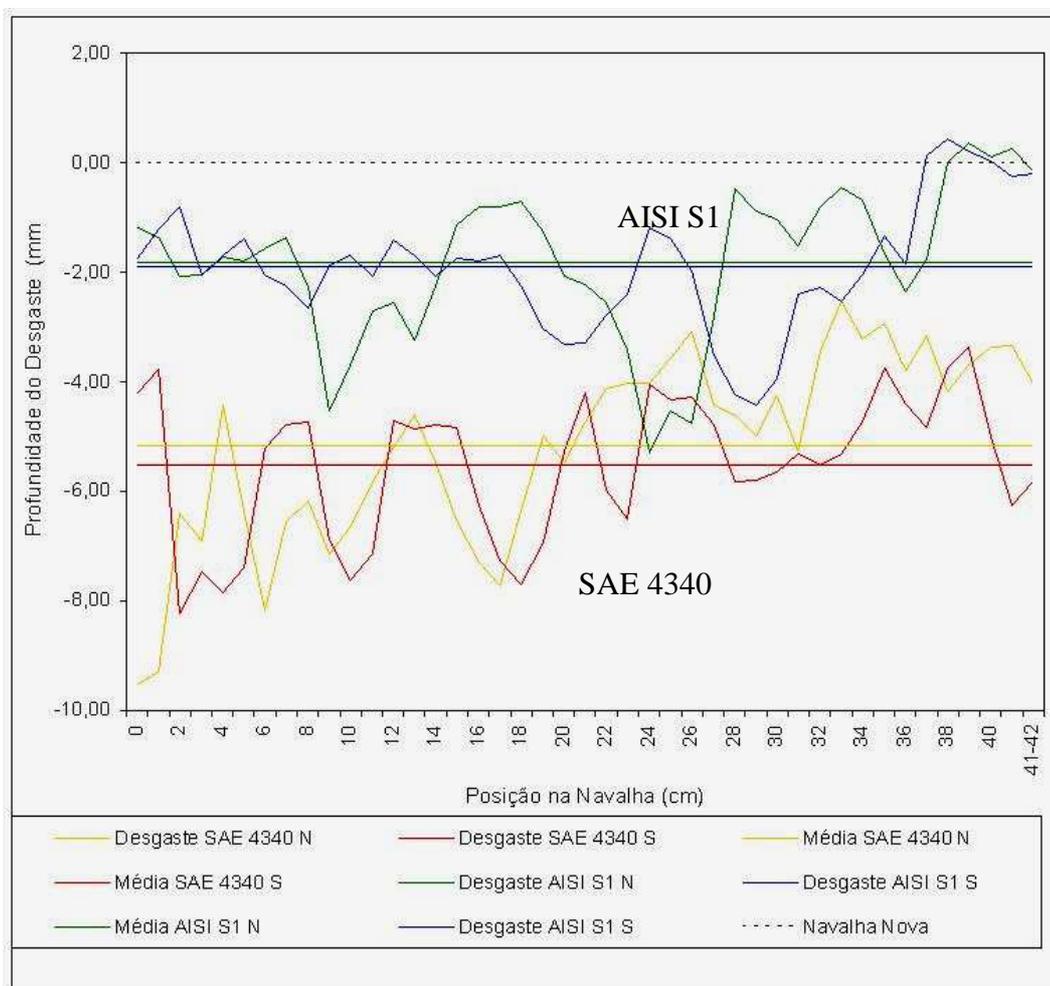


Figura 4.11: Desgaste comparativo entre 2 navalhas de ambos os aços. S=Sul e N=Norte.



Figura 4.12: Navalha de aço S1 com pequenas quebras na aresta de corte.



Figura 4.13: Navalha de aço SAE 4340 com grandes depressões na aresta de corte (vista superior).



Figura 4.14: Aço SAE 4340 com grandes depressões na aresta de corte (vista frontal).

Um comparativo de desgaste entre todos os pares testados de ambos os aços é apresentado na Figura 4.15. Os valores apresentados resultam da média dos desgastes verificados a cada centímetro nas arestas de corte de cada par de navalhas, sendo que os valores estão normalizado pela quantidade de sucata cortada por cada par de navalhas.

Pode-se observar novamente a superioridade do aço ferramenta, pois enquanto o SAE 4340 apresentou um desgaste médio em torno de $26 \left(\frac{mm}{t \times 10^4}\right)$, o aço ferramenta desgastou $14 \left(\frac{mm}{t \times 10^4}\right)$ nas mesmas condições.

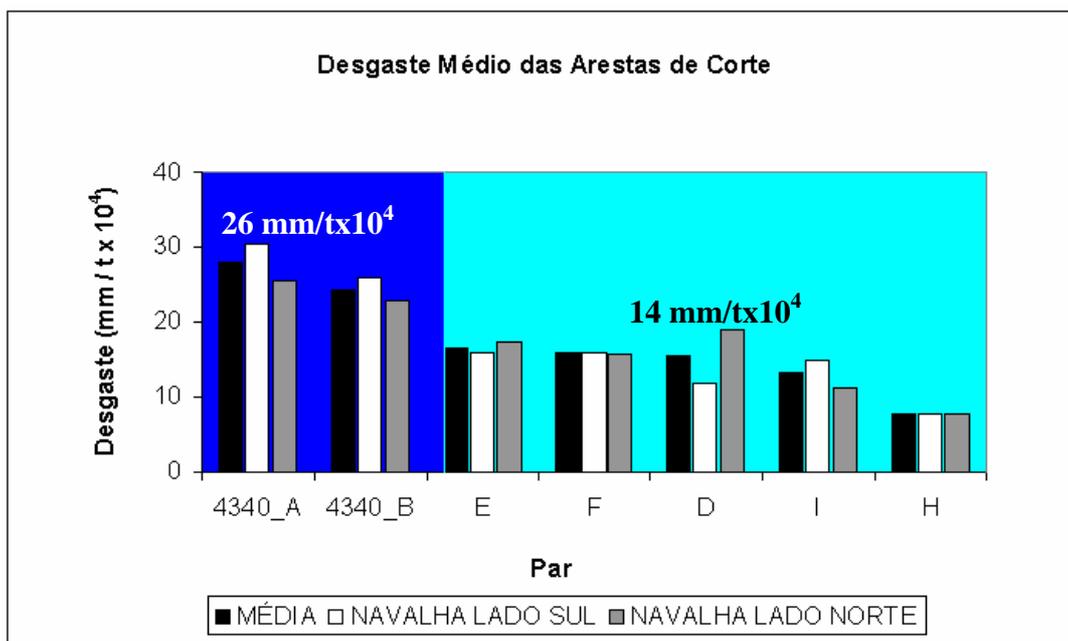


Figura 4.15: Comparação entre o desgaste médio das arestas de corte das navalhas dos aços SAE 4340 e AISI S1.

O desgaste médio por aresta também pode ser obtido pela divisão da produção por 4, que é o número de arestas de corte por ferramenta.

A ausência de amassamentos nas arestas de corte aliada ao reduzido desgaste observado nas medições, confirmam a elevada resiliência do aço S1.

A confirmação da relação inversa entre desgaste e dureza pode ser observada através da Figura 4.16, onde foram feitas as médias entre navalha Sul e Norte de cada par e comparadas com as respectivas durezas. Os dados estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Desgaste médio x dureza em navalhas do aço AISI S1, após o processamento de sucatas com densidades entre 0,2 e 0,3 (t/m³).

Par	Norte	Sul	Dureza (HRC)	Desgaste Médio ($\frac{mm}{t \times 10^4}$)
B	18,0	13,0	51	15,5
D	19,1	11,7	51	15,4
E	17,3	15,9	50	16,6
F	15,8	15,8	50	15,8
H	7,6	7,7	53	7,7
I	11,2	14,9	52	13,1

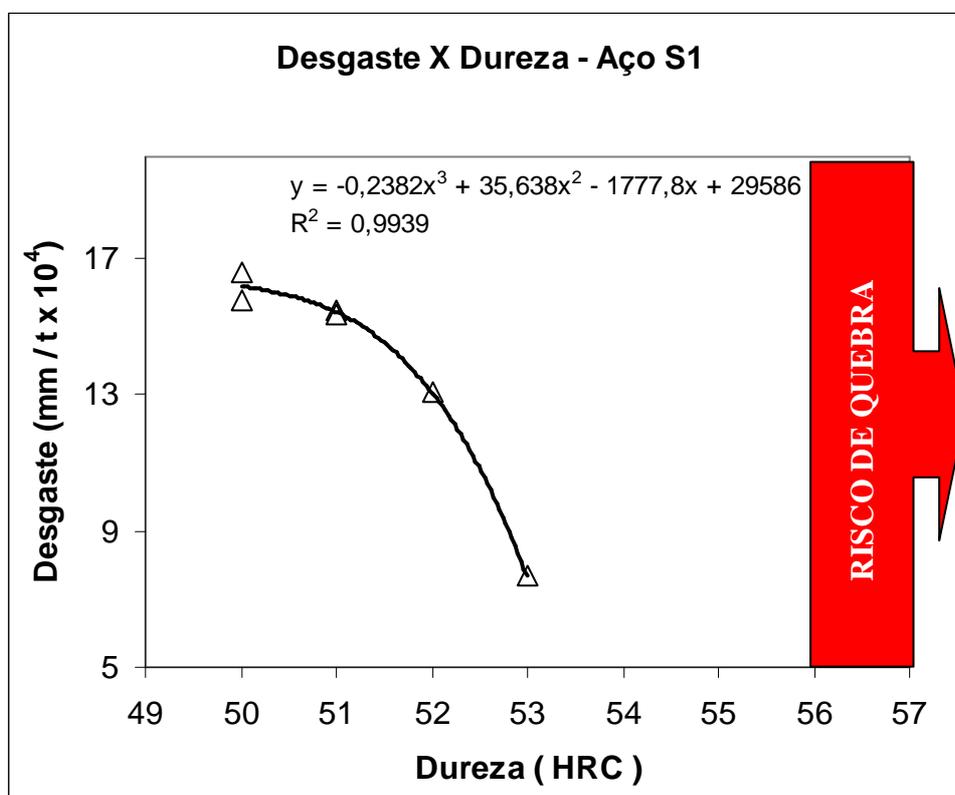


Figura 4.16: Relação entre desgaste e dureza para o aço AISI S1.

De maneira geral, pode-se dizer que a utilização do aço AISI S1 em substituição ao SAE 4340 resultou nos seguintes ganhos:

- Redução do custo do aço produzido em aciaria.

O tempo ganho com a redução das interrupções por sucata alta de 0,43 min/corrida para 0,09 min/corrida apresentado na Figura 4.17, resultou em aumento de produção com uma conseqüente diluição dos custos em um mesmo período.

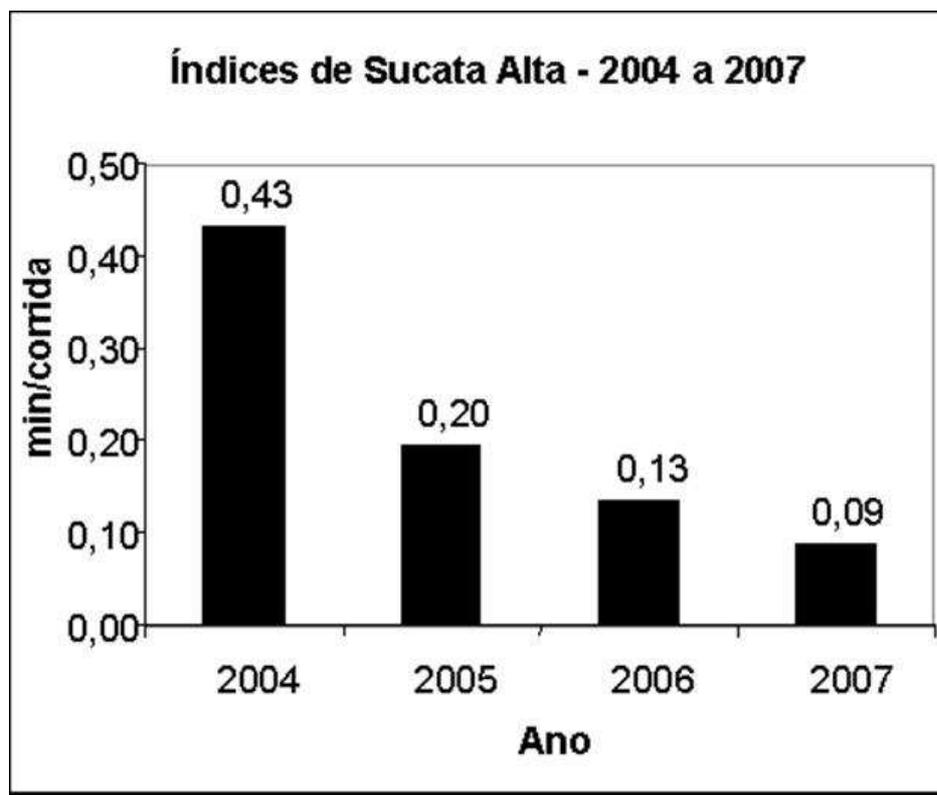


Figura 4.17: Redução das interrupções por sucata alta devido à substituição do SAE 4340 por AISI S1 como material base para as navalhas da prensa tesoura.

- Aumento da produção da prensa tesoura.

Com a eliminação das ocorrências de quebras de navalha mencionadas na Introdução deste trabalho, elevou-se a produção da prensa tesoura em **397 t/ano**.

Um segundo incremento na produção da prensa tesoura se deu em virtude da redução do número de paradas programadas da prensa de 8 para 4 paradas/mês, resultando em um ganho anual de 384 h. Considerando-se a mesma produtividade de 16 t/h, um segundo ganho de **6.144 t/ano** de sucata foi obtido.

Somando-se ambos os ganhos, tem-se um aumento de produção de **6.541 t/ano** de sucata na prensa tesoura.

- Melhoria das condições de segurança e ergonomia

Como o aço ferramenta apresentou uma menor deformação após a operação, as ocorrências de interferência entre navalhas foram eliminadas e o procedimento de troca destas ferramentas tornou-se mais simples, o que pode ser evidenciado pela redução do tempo gasto nesta atividade de 158 minutos em 2004 para menos de 120 minutos em 2006 conforme a Figura 4.18.

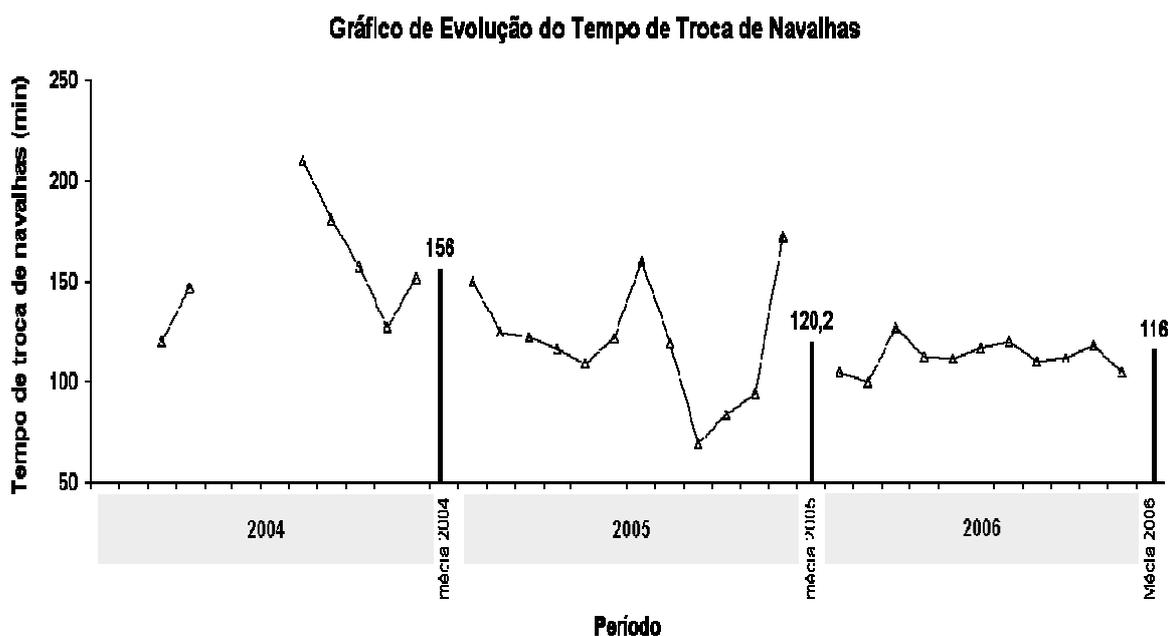


Figura 4.18: Redução dos tempos de troca de navalhas devida ao uso do aço ferramenta AISI S1

É interessante salientar que como o desgaste das navalhas de aço SAE 4340 é praticamente o dobro do desgaste das navalhas de AISI S1, o número de navalhas consumidas no mês foi reduzido pela metade. Sendo o custo do aço ferramenta 2 vezes superior ao do SAE 4340, o custo total com navalhas durante o mês não foi alterado.

Posteriormente a estes testes, foram conduzidos outros 4 experimentos, com 4 pares de navalhas de aço AISI S1, todas com 52 HRC, processando sucatas com densidade de 0,4 à 0,6 (t/m^3), denominadas Sucatas Pesadas. Conforme a Tabela 4.3, os resultados mostram que o desgaste das ferramentas de corte é bem mais elevado, não sendo proporcional à densidade do material processado. Em grande parte, esta desproporção ocorre em virtude da presença de peças de maior espessura junto a esta sucata, as quais trazem maiores danos à aresta de corte.

Tabela 4.3: Desgaste médio x dureza em navalhas do aço AISI S1, após o processamento de sucatas com densidades entre 0,4 e 0,6 (t/m³).

Par	Norte	Sul	Dureza (HRC)	Desgaste Médio ($\frac{mm}{t \times 10^4}$)
J	69,1	68,0	52	68,6
K	49,4	45,9	52	47,7
L	45,8	37,7	52	41,8
M	48,9	38,3	52	43,6

5.0 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que:

- 1- A substituição do aço SAE 4340 pelo AISI S1 nas operações de corte de sucatas com densidades entre 0,2 e 0,3 (t/m³) é economicamente e tecnicamente viável ;
- 2- Para navalhas com geometria e tratamento térmico de acordo com este estudo, durezas iguais ou superiores à 56 HRC mostram-se frágeis e quebram durante o corte;
- 3- Esta substituição também traz ganhos de produção de sucata cortada de 6.541 t/ano;
- 4- Consideráveis ganhos de segurança operacional durante a atividade de troca de navalhas foram atingidos;
- 5- Como o tratamento térmico do aço ferramenta possui uma maior complexidade, há uma maior necessidade de garantir junto ao fornecedor o cumprimento do ciclo de tratamento térmico e a obtenção da dureza estabelecida para este material.
- 6- O desgaste das navalhas não é proporcional à densidade do material que está sendo cortado. Isto se deve em grande parte pela não homogeneidade da sucata.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o desempenho de navalhas de aço ferramenta S1 submetidas á austêmpera;
- Avaliar o desempenho de navalhas com durezas de 54 e 55 HRC;
- Desenvolver tratamento térmico para aumento da vida útil de navalhas durante o corte de Sucata Pesada.
- Avaliar a influência do ângulo de corte na vida útil das navalhas.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FILHO, M. S. II Seminário de Trefilação de Arames, Barras e Tubos ABM. 1995.
- FOREMAN, R. W. Metals Handbook, 9th ed., vol.4, Heat Treating, p. 561-587, 1997.
- GERDAU S/A, Grupo. Instrução Técnica de Sucata – ITS n° 006, Rev. B, Abril 2007.
- GUNN, Philips. Shear Power: Learning how Scrap Shears Work is the Best First Step in the Shopping Process. Recycling Today, p.284-90, 2005.
- ITS - Instrução Técnica de Sucata , Grupo Gerdau S/A, n° 006, Maio 2008.
- JUNIOR, Ivan B. Tecnologia de Estampagem, 3^a ed., vol.1, p. 15-19, 2007.
- KOUTSKY, J.; BYSTRICKY, J. Materiálově Technologická Problematika Nožů Pro Stříhání Ocelového Odpadu. Hutnické Listy, vol. 33, n° 9, p. 638-43, 1978.
- KRAUSS, G. Tool Steels Fifth Edition, cap. 9, p. 165-180, 1997.
- PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E. Phase Transformation in Metals and Alloys, 2nd ed., p. 335-345, 1992.
- SHIH, A. J.; MC CALL, R. C. Kinematics and Wear of Tool Blades for Scrap Tire Shredding. Machining Science and Technology, vol. 8, n° 2, p. 193-210, 2004.
- SHUSHAN, F. B. Mobile Scrap-Breaking Equipment. Metallurgist, vol. 40, n° 12, p. 30-31, 1996.

- VERMA, R. S.; BHAKAT, A. K.; CHATTERJI, T. D.; MEDIRATTA, S. R. High-Carbon High-Chromium Tool Steel Blades for Silicon Steel Scrap Chopping. *Tool Alloy Steels (India)*, vol. 28, no. 12, p. 359-365, 1994.
- WIENTEZEK, Bruno. J. J. Press-Shears for Cutting and / or Baling Scrap Metal. *Metallurgist*, vol. 47, n^os 11 e 12, 2003.