

FAACZ – FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME CALDEIRA MASSARIOL
JEFERSON DOS SANTOS CRAVO
JUAN PIMENTEL ROCHA PEREIRA SILVA
MATHEUS TOREZANI MONTOVANI
SOLANGE SFALSIN

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO INVÓLUCRO DE AÇO
INOXIDÁVEL 304 NAS PROPRIEDADES DO AÇO FERRAMENTA ISODUR K360
TEMPERADO**

ARACRUZ
2022

GUILHERME CALDEIRA MASSARIOL
JEFERSON DOS SANTOS CRAVO
JUAN PIMENTEL ROCHA PEREIRA SILVA
MATHEUS TOREZANI MONTOVANI
SOLANGE SFALSIN

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO INVÓLUCRO DE AÇO
INOXIDÁVEL 304 NAS PROPRIEDADES DO AÇO FERRAMENTA ISODUR K360
TEMPERADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento
Leal

ARACRUZ
2022

GUILHERME CALDEIRA MASSARIOL
JEFERSON DOS SANTOS CRAVO
JUAN PIMENTEL ROCHA PEREIRA SILVA
MATHEUS TOREZANI MONTOVANI
SOLANGE SFALSIN

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO INVÓLUCRO DE AÇO
INOXIDÁVEL 304 NAS PROPRIEDADES DO AÇO FERRAMENTA ISODUR K360
TEMPERADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento
Leal

Aprovada em ____ de _____ de _____

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal
Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ
Orientador

Prof. Doutor Harerton Oliveira Dourado
Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ

Prof. Esp. Daniel Otarola Tasaico
Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por mais essa conquista. Dedicamos essa vitória aos nossos pais, mães, irmãos e companheiros, que sempre nos deram muito apoio, para que nós pudéssemos vencer mais essa etapa.

Agradecemos aos nossos amigos, em especial a Fabricio Mandelli Falcão pelo auxílio e disposição em nos apoiar nas pesquisas relacionadas a este trabalho. Aos colegas de turma, pela união, ajuda e todo apoio necessário para que pudéssemos alcançar nosso ideal.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal, pela dedicação, paciência, pelos conselhos e esforços para que pudéssemos concluir este trabalho.

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo o que é ou o que pode ser feito”.

Isaac Newton

RESUMO

A utilização do invólucro de aço inoxidável 304 tem intuito de evitar a perda de carbono da superfície do aço para a atmosfera durante o tratamento térmico de têmpera. A perda de carbono das peças para a atmosfera em tratamentos térmicos faz com que a eficiência do tratamento seja reduzida, impossibilitando que o aço atinja as propriedades necessárias para ser utilizado para trabalho. O presente trabalho busca comparar resultados e avaliar a influência e a importância da utilização dos invólucros de aço inoxidável quando se desprovê de um forno com atmosfera controlada. Foi realizado tratamento térmico de têmpera no aço ISODUR K360, utilizando forno convencional tipo Mufla Quimis com duas condições diferentes, sendo a primeira com a utilização do invólucro e a segunda sem o invólucro. Após isso, os corpos de prova foram submetidos a ensaio de abrasão com abrasômetro roda de borracha de acordo com a norma ASTM G6 e dureza com Durômetro Rockwell para obtenção das propriedades. Também foram comparados os resultados com o aço K340 ISODUR que passou pelos tratamentos térmicos de têmpera convencional e criogênico, ambos feitos em forno com atmosfera controlada. Os resultados demonstraram que, sem a utilização do invólucro de aço inoxidável 304, ocorreu a formação de carepas na superfície dos corpos de prova e apresentou propriedades mecânicas (desgaste e dureza) com valores abaixo do indicado pelo fabricante após a realização do tratamento térmico de têmpera. Também foi verificada a possibilidade de se atingir durezas próximas às alcançadas por tratamentos a vácuo, utilizando fornos convencionais e invólucros de aço inoxidável para as peças a serem tratadas.

Palavras-chave: Tratamento térmico. Aço ferramenta. Invólucro aço inoxidável 304. Ensaio de dureza. Ensaio de desgaste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de transformação isotérmica de um aço hipereutetóide	17
Figura 2 – Forno tipo mufla utilizado para têmpera	20
Figura 3 – Esquema do equipamento de teste.....	20
Figura 4 – Durômetro utilizado para ensaio de Dureza Rockwell C	21
Figura 5 – Corpos de prova do grupo 3 com invólucro de aço inoxidável 304 prontos para serem temperados	22
Figura 6 – Corpos de prova do grupo 2 e grupo 3 após tratamento térmico de têmpera	23
Figura 7 – Grupo 1 dos corpos de prova sem tratamento térmico	27
Figura 8 – Grupo 2 dos corpos de prova com tratamento térmico de têmpera sem utilização do invólucro de aço inoxidável 304.....	28
Figura 9 – Grupo 3 dos corpos de prova com tratamento térmico de têmpera e com a utilização do invólucro de aço inoxidável 304.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (%) média do aço K360 ISODUR.....	13
Tabela 2 - Composição química (%) média do aço K340 ISODUR.....	15
Tabela 3 - Parâmetros de teste	21
Tabela 4 - Resultados do Ensaio de Desgaste	26
Tabela 5 - Média e Desvio Padrão do Ensaio de Desgaste	26
Tabela 6 - Resultados do ensaio de dureza Rockwell C	27
Tabela 7 - Média e Desvio Padrão do Ensaio de Dureza.....	27
Tabela 8 – Custo Médio dos Materiais e Equipamentos	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REFENCIAL TEÓRICO	13
3.1	BÖHLER K360 ISODUR	13
3.2	BÖHLER K340 ISODUR	15
3.3	DESGASTE	15
3.4	TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS	16
3.5	TÊMPERA	17
3.6	PROTEÇÕES DA SUPERFÍCIE	18
4	METODOLOGIA	19
4.1	MATERIAIS	19
4.2	MÉTODOS E EQUIPAMENTOS	19
4.2.1	Realização do Tratamento Térmico de Têmpera	22
4.2.2	Realização do Ensaio de Desgaste	23
4.2.3	Realização do Ensaio de Dureza	24
5	RESULTADO E DISCUSSÕES	25
5.1	RESULTADOS DO ENSAIO DE DESGASTE	25
5.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA	26
5.3	DISCUSSÃO	28
6	CONCLUSÃO	32
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

Por possuir boas propriedades mecânicas o aço Isodur K360 é utilizado em facas para máquinas e em equipamentos de cunhagem e estampagem. E para melhorar essas propriedades é necessário a aplicação de uma têmpera, conforme Ribeiro *et al.* (2018) é um tratamento térmico em que a peça é aquecida até a 50° C acima da sua zona crítica e resfriada (em água ou óleo ou ar ou em outros meios) rapidamente em seguida, porém ao realizar esse tipo de tratamento ocorre a oxidação e a descarbonetação, segundo o Guia nº 2 do IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo) é a perda de átomos de carbono para meio externo por conta de um reagente, no material. Mas pode-se diminuir esses impactos causados com a utilização de um invólucro (uma fina camada protetora) de aço inoxidável 304 na realização a tempera.

A análise da influência dessa camada protetora sobre as propriedades mecânicas de um aço tratado termicamente é de grande importância para que profissionais possam mapear e diagnosticar possíveis falhas durante o tratamento térmico, uma vez que a não utilização da proteção pode acarretar o não-alcance das propriedades desejadas.

O presente trabalho de conclusão de curso buscou analisar a influência do invólucro de aço inoxidável 304 sobre as propriedades mecânicas de um aço tratado termicamente e informar profissionais da área sobre a importância de sua utilização, uma vez que em muitos casos ainda não se emprega a utilização do mesmo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade do uso da técnica de proteção com invólucro de aço inoxidável nos aços ferramenta ISODUR K360, submetidos a tratamento térmico de têmpera em fornos convencionais sem a presença de atmosfera controlada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os valores de dureza e resistência ao desgaste do aço ISODUR K360 bruto, após a realização do tratamento térmico sem atmosfera controlada.
- Analisar a importância da aplicação do invólucro de aço inoxidável 304 sobre as propriedades mecânicas do aço ISODUR K360.
- Avaliar os possíveis ganhos do uso de invólucro de aço inoxidável 304 em aço ferramenta de trabalho a frio.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 BÖHLER K360 ISODUR

Consiste em um desenvolvimento avançado dos aços com 8% de Cromo. Apresenta alta resistência ao desgaste e boa resistência compressiva. Esse aço está disponível no mercado nas formas de produtos longos, forjamento livre e placas (BÖHLER, 2021).

Segundo Claver *et al.* (2021), o aço Böhler K360 ISODUR apresenta propriedades mecânicas excelentes e elevada aplicabilidade industrial, com destaque nas aplicações de trabalho a frio para os processos de corte, estampagem ou extrusão. Nessas utilizações, as ferramentas submetem-se a grandes esforços repetitivos, sendo necessário que os materiais sejam duros e resistentes a compressão, com tenacidade suficiente para suportar as condições de trabalho em que serão submetidas e ter alta resistência ao desgaste. Dessa forma, é possível aumentar a vida útil e a produtividade. Além disso, é preciso notar que a resistência das ligas metálicas comerciais está aumentando, sendo cada vez mais requerido, aços-ferramenta com maior dureza, mais fortes e duráveis para realizar sua conformação ou corte. O K360 é um aço fabricado por refusão sob eletroescória e possui qualidade superior aos aços convencionais.

A composição química desse aço está distribuída conforme a tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Composição química (%) média do aço K360 ISODUR

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	al	Nb
1,25	0,90	0,35	8,75	2,70	1,18	+	+

Fonte: BÖHLER, 2021

As principais características do aço BÖHLER K360 ISODUR são:

- Excelente resistência ao desgaste em combinação com alta tenacidade e boa resistência compressiva;
- Muito boa estabilidade da têmpera;

- Aço para trabalhos a frio de endurecimento secundário, com boa estabilidade dimensional;
- Muito bem apropriado para nitretação em banho salino ou de plasma;
- Boa revestibilidade com PVD (Physical Vapor Deposition);
- Endurecível em vácuo;
- Condicionado por sua liga e o processo de fabrico, existem carbonetos mais finos e distribuídos mais uniformemente do que em aços ledeburíticos com 12% de cromo.

Esses aços podem ser aplicados nos seguintes itens:

- Facas para máquinas (para produtores);
- Laminação;
- Conformação a frio;
- Cunhagem;
- Corte fino / estampagem;
- Compactação de pós;
- Parafusos e cilindros;
- Peças de desgaste;
- Thread rolling (laminação de rosca);
- Rolos;
- Punções e matrizes para produção de comprimidos;
- Componentes para equipamentos de subsolo (perfuração, eixos, etc.)
- Componentes para a indústria de reciclagem;
- Componentes em geral para a Engenharia Mecânica.

Segundo o catálogo do fabricante BÖHLER (2021), o tratamento térmico desse aço deve ser realizado entre as temperaturas de 1040 e 1080 °C. Seu resfriamento pode ser feito por óleo, banho de sal, ar comprimido, ar após aquecimento por um intervalo de 15 a 30 minutos.

3.2 BÖHLER K340 ISODUR

Esse aço possui 8% de cromo e é produzido usando o método de refusão por eletroescória (ESR). Esta tecnologia de refusão desenvolvida e comprovada pela BÖHLER garante separações micro e macro extremamente baixos e dá ao material a pureza e a homogeneidade necessárias para um excelente desempenho na prática (BÖHLER, 2022).

A composição química do K340 ISODUR está dividida conforme a tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Composição química (%) média do aço K340 ISODUR

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,10	0,70	0,40	8,20	2,10	0,50

Fonte: BÖHLER, 2022

As principais características das propriedades desse aço são:

- Tenacidade e Ductilidade: boa
- Resistência ao desgaste: alta
- Resistência à compressão: boa
- Estabilidade dimensional: boa
- Moagem: muito alta

3.3 DESGASTE

O desgaste tem sido caracterizado diferentemente por vários estudiosos, principalmente quando se fala em mecanismos de desgaste, que existem várias teorias rivais. Para Norton (2013), o desgaste abrange vários tipos de falhas, todas envolvendo alterações na superfície do material em análise. Normalmente, são divididos em cinco categorias, sendo elas: o desgaste por adesão, desgaste por abrasão, desgaste por erosão, desgaste por corrosão e fadiga superficial, onde cada um descreve a forma em que os corpos que estão em contato interagem entre si.

Vários fatores devem ser considerados na análise de um sistema tribológico, pois o desgaste ou retirada de material é resultante de uma grande quantidade de variáveis, o que torna seu estudo complexo. De modo geral, a dureza e a microestrutura são

dois dos principais fatores que influenciam no desgaste abrasivo (Bressan e Schopf, 2011).

Conforme Bressan e Schopf. (2011), com o aumento da dureza, a perda por desgaste pode aumentar em até duas ordens de grandeza. Neste caso, a transição de desgaste brando para severo ocorre quando a dureza da partícula abrasiva passa a ser igual ao do material desgastado. Os aços comerciais estão cada vez mais com dureza elevada, isso torna essencial a utilização de um aço ferramenta de resistência maior ao desgaste, além disso em aços ferramenta a micro estrutura destaca-se como fator chave no desgaste resultante. O percentual de carbono de um aço está diretamente ligado à temperabilidade da liga, o que o torna um elemento determinante na obtenção de estruturas com elevada resistência ao desgaste, no entanto, para obtenção de excepcionais resultados, se faz necessário a utilização de elementos de liga adicionais que propiciam a formação estruturas ainda mais resistentes, principalmente através da formação de carbeto.

3.4 TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS

O tratamento térmico é um método que envolve aquecimento e resfriamento sob determinadas condições de ligas metálicas, podendo ser ferrosas ou não ferrosas, com finalidade de modificar as propriedades, se adequando em determinadas situações, até mesmo reduzir gastos.

Os tratamentos térmicos englobam um conjunto de ações e operações de aquecimento e resfriamento sob condições controladas de temperatura, atmosfera, tempo e velocidade de resfriamento, gerando alterações nas estruturas dos aços e conseqüentemente, mudança das suas propriedades (SPECTRU, 2018).

Para Chiaverini (1986) tratamentos térmicos são realizados quando se deseja alterar as propriedades mecânicas dos materiais, geralmente ligas ferro-carbono, ou quando se torna necessário alterar a composição química com intuito de elevar a dureza superficial dos mesmos. O tratamento térmico tem como principais objetivos:

Arai *et al* (1991), afirma que a têmpera pode ser realizada não só com intuito de aumento de dureza, mas também para alívio de tensões e estabilidade dimensional, uma vez que tensões podem ser induzidas pela formação e usinagem do aço.

3.6 PROTEÇÕES DA SUPERFÍCIE

Para Silva (2010), mesmo que os aços dependam das suas ligas para compor suas propriedades, o carbono implicará mais significativamente em alterações de suas propriedades, sendo assim, o teor de carbono deve ser controlado durante o tratamento térmico para se evitar perdas para atmosfera e garantir bom acabamento superficial, uma vez que em alguns casos se deseja a superfície isenta de oxidação.

Segundo Paz (2016), fornos como, por exemplo, os a vácuo, fazem com que os gases sejam eliminados da região de aquecimento, podendo controlar os parâmetros dos tratamentos térmicos. Em fornos elétricos e a gás, que não possuem essa forma de controle, o processo de descarbonetação e oxidação do material durante o tratamento térmico é dificilmente evitado (ARAI *et al*, 1991).

Na ausência de fornos a vácuo, na prática faz-se o uso de materiais como camadas protetoras envolvendo as peças, com intuito de controlar os potenciais de oxigênio, evitando o contato entre a peça e a atmosfera do forno. (SILVA, 2010).

Para All Foils (2018), uma das maneiras de reduzir a descarbonetação e oxidação devido à falta de controle da atmosfera é utilizar folhas de aço inoxidável do tipo 304, 309 e 321 empacotando as peças a serem tratadas.

4 METODOLOGIA

Para a estruturação e escrita deste trabalho de conclusão de curso foi utilizado o método de pesquisa exploratória, o qual permitiu analisar, comparar resultados e avaliar a influência e importância da utilização dos invólucros de aço inoxidável quando se desprovê de um forno com atmosfera controlada. E o trabalho analisado foi feito da seguinte maneira:

4.1 MATERIAIS

Para realização do teste analisado, foi explorada a utilização do aço para trabalho a frio ISODUR K360, fabricado pela BÖHLER-UDDEHOLM. O material analisado foi escolhido por ser muito utilizado como matriz em máquinas de corte e estampagem de aços por possuir propriedades mecânicas compatíveis para tal atividade. A composição química e propriedades físicas do material utilizado estão listadas na tabela 1 (pág. 13), conforme catálogo fornecido pelo fabricante.

4.2 MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Para a realização do tratamento térmico e ensaios de desgaste e dureza, foram confeccionados nove corpos de prova nas mesmas dimensões, circulares e com diâmetro de 40 mm e espessura de 15 mm. Os protótipos foram confeccionados em 2018, por Fabricio Mandelli Falcão, aluno da faculdade UNESC, Centro Universitário do Espírito Santo, UNESC - Colatina/ES. Todos os modelos foram confeccionados manualmente e testados no laboratório de Engenharia Mecânica da própria universidade. O tratamento térmico foi realizado utilizando um forno tipo mufla Quimis, mod. Q318M21, forno convencional sem ambiente controlado. A temperatura utilizada para o tratamento térmico foi 1040 °C, dado que o fabricante do aço utilizado indica temperaturas entre 1040 e 1080 °C.

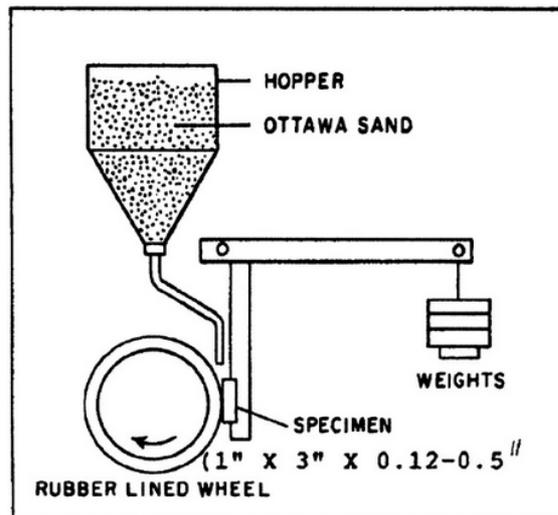
Figura 2 – Forno tipo mufla utilizado para têmpera



Fonte: Autor

Após o tratamento térmico de têmpera, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de desgaste utilizando um abrasômetro tipo roda de borracha normatizado pela ASTM G65. A figura 3 demonstra um esboço do equipamento utilizado.

Figura 3 – Esquema do equipamento de teste



Fonte: ASTM G 65

A norma em questão determina os seguintes parâmetros para teste:

Tabela 3 – Parâmetros de teste

Procedimento específico	Força aplicada no corpo de prova* (N)	Revoluções (ciclos) da roda de borracha	Abrasão linear (m)	Tempo aprox. (min)
A	130	6.000	4.309	30
B	130	2.000	1.436	10
C	130	100	71,8	0,5
D	45	6.000	4.309	30
E	130	1.000	718	5

Fonte: ASTM G65 – 85

*A força aplicada no corpo de prova pode variar em $\pm 3\%$

No trabalho analisado, foi utilizado o procedimento específico B por se adequar às características do aço utilizado para confeccionar os corpos de prova utilizados.

Importante ressaltar que todos os corpos de prova foram pesados antes e depois dos ensaios de desgaste, utilizando uma balança analítica de precisão 0,001g, pois é a partir da perda de massa que se obtém os resultados do ensaio.

O último ensaio realizado foi o de dureza Rockwell C, utilizando-se para isso um durômetro da Insize modelo ISH-BRV. O ensaio de dureza consta na norma brasileira NBR-6671 e na norma internacional ASTM E18-94. Foi utilizado um penetrador cônico de ponta de diamante. A pré-carga aplicada foi 98,07N e a carga total 1471N.

Figura 4 – Durômetro utilizado para ensaio de Dureza Rockwell C



Fonte: Autor

4.2.1 Realização do Tratamento Térmico de Têmpera

Os corpos de prova foram separados em três grupos, cada um contendo três peças. No primeiro grupo não foi realizado nenhum tratamento térmico para fins de cálculo de ganho de propriedades em relação ao material original.

No segundo grupo, o tratamento térmico de têmpera foi realizado sem a utilização do invólucro (folha de aço inoxidável que tem finalidade de manter o ambiente do tratamento térmico controlado, evitando a perda de carbono da superfície dos corpos a serem tratados).

No terceiro grupo, o tratamento térmico de têmpera foi realizado com o invólucro de aço inoxidável 304 de espessura 0,25mm. Os corpos de prova do grupo 2 e 3 foram tratados simultaneamente, para garantir maior uniformidade dos resultados.

Todos os resultados foram anotados manualmente pelo técnico responsável pelo laboratório, durante a realização de todos os procedimentos.

Figura 5 – Corpos de prova do grupo 3 com invólucro de aço inoxidável 304 prontos para serem temperados



Fonte: Autor

Os corpos de prova foram aquecidos até 650°C e mantidos a essa temperatura por duas horas para alívio de tensões advindas do processo de usinagem. Após as duas horas, a temperatura do forno foi ajustada para 1040°C, temperatura de austenitização, sendo essa indicada pelo fabricante. Após atingir 1040°C foram cronometrados 30 minutos para homogeneização da temperatura dos corpos de

prova. Em seguida, os corpos de prova foram retirados do forno e resfriados diretamente utilizando óleo específico para tratamentos térmicos.

Após a realização do tratamento térmico de têmpera, notou-se a primeira influência da utilização do invólucro de aço inoxidável. Os corpos de prova sem a utilização do invólucro sofreram oxidação e tiveram alteração de sua aparência superficial apresentando carepa como mostra a figura 6.

Figura 6 – Corpos de prova do grupo 2 e grupo 3 após tratamento térmico de têmpera



Fonte: Autor

4.2.2 Realização do Ensaio de Desgaste

Para realização do ensaio de desgaste, seguindo a norma ASTM G65, foi previamente peneirada, areia de rio com granulometria classificada na AFS 50/70 com 5% de retenção máxima na peneira 50 mesh e 95% de retenção mínima para peneira de 70 mesh.

O ensaio de desgaste foi realizado em um corpo de prova por vez, fixando-o no suporte da máquina. Após a fixação do corpo de prova, foi liberado o fluxo de areia entre 250 e 400g/min e, em seguida, ligado o inversor que controla a rotação de 200 ± 10 rpm da roda de borracha. Após, foi liberado o contato entre o corpo de prova, roda de borracha e areia por 10 minutos para atingir o procedimento específico B utilizado como padrão de teste para esse trabalho.

Ao fim do ensaio, os corpos de prova foram novamente pesados para obtenção dos resultados de perda volumétrica e perda de massa.

4.2.3 Realização do Ensaio de Dureza

Antes da realização do ensaio de dureza, os corpos de prova passaram por uma máquina politriz, obtendo-se uma superfície plana e polida a fim de garantir maior qualidade dos resultados do ensaio.

Conforme a norma NBR-6671, os corpos de prova foram colocados sobre a plataforma, a pré-carga foi ajustada em 98,07N e em seguida aplicada a carga total pré-estabelecida de 1471N. Após 15 segundos a carga total foi removida e pelo visor foi verificado o resultado da dureza. Esse procedimento se repetiu por três vezes para cada corpo de prova, com intuito de avaliar a média dos resultados obtidos.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Esse capítulo abordará os resultados obtidos nos ensaios de dureza e impacto realizado nos corpos de prova, com o objetivo de conhecer as características que cada tratamento oferece ao material.

5.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE DESGASTE

Após a realização dos ensaios de desgaste, os corpos de prova foram novamente pesados e foram levantados os dados para fins de cálculo da perda volumétrica, que pode ser determinada pela Equação 1. Segundo a tabela disponível pela UDDEHOLM (2018), a densidade do aço ISODUR K360 é 7,7g/cm³. Os valores obtidos foram então representados na tabela 4.

$$\text{Perda volumétrica (mm}^3\text{)} = 1000 * \frac{\text{Perda mássica (g)}}{\text{Densidade } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}$$

Vale lembrar que os corpos de prova foram separados da seguinte forma:

- Grupo 1: Corpos de prova sem tratamento térmico, com propriedades originais de fábrica.
- Grupo 2: Corpos de prova temperados sem a utilização do invólucro de aço inoxidável 304.
- Grupo 3: Corpos de prova temperados com a utilização do invólucro de aço inoxidável 304.

Tabela 4 – Resultados do Ensaio de Desgaste

Grupos	Corpo de prova	Densidade (g/cm ³)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)	Perda volumétrica (mm ³)	Taxa de desgaste (g/min)	Perda de massa relativa (%)
1	1	7,7	140,63	139,59	1,04	135,32	0,10	0,74
	2		143,83	142,53	1,31	169,74	0,13	0,91
	3		143,40	142,07	1,33	172,34	0,13	0,93
2	1	7,7	142,25	141,49	0,76	98,83	0,08	0,53
	2		144,34	143,63	0,71	91,69	0,07	0,49
	3		143,86	142,97	0,90	116,36	0,09	0,62
3	1	7,7	145,40	145,08	0,32	41,82	0,03	0,22
	2		145,07	144,57	0,50	64,81	0,05	0,34
	3		146,72	146,11	0,61	78,96	0,06	0,41

Fonte: Autor

A tabela a seguir mostra os dados de média e desvio padrão calculados para o ensaio de desgaste (descritos no formato de Média ± Desvio Padrão):

Tabela 5 – Média e Desvio Padrão do Ensaio de Desgaste

Dados	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Massa inicial (g)	142,62 ± 1,42	143,48 ± 0,89	145,73 ± 0,72
Massa final (g)	141,40 ± 1,29	142,70 ± 0,89	145,25 ± 0,64
Perda de massa (g)	1,22 ± 0,13	0,79 ± 0,08	0,48 ± 0,12
Perda volumétrica (mm³)	159,13 ± 16,87	102,29 ± 10,37	61,86 ± 15,31
Taxa de desgaste (g/min)	0,12 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,05 ± 0,01
Perda de massa relativa (%)	0,86 ± 0,08	0,55 ± 0,06	0,33 ± 0,08

Fonte: Autor

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA

Os resultados obtidos no ensaio de dureza estão representados na tabela 6. Para cálculo de ganho de dureza relativa, foi adotado dureza média de 15,77 HRC referente ao grupo 1 de corpos de prova, que não sofreram nenhum tratamento térmico e possuem as propriedades originais do material.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de dureza Rockwell C

Grupos	Corpo de prova	Pré carga (N)	Carga total (N)	Dureza média (HRC)	Ganho de dureza relativa (%)
1	1			15,66	-
	2	98,07	1471	16	-
	3			15,66	-
2	1			52	229,74
	2	98,07	1471	50,66	221,24
	3			53	236,08
3	1			60	280,46
	2	98,07	1471	62	293,15
	3			62	293,15

Fonte: Autor

Na tabela 7, segue os dados de média e desvio padrão calculados para o ensaio de dureza (apresentados no formato de Média \pm Desvio Padrão):

Tabela 7 – Média e Desvio Padrão do Ensaio de Dureza

Dados	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Dureza (HRC)	15,77 \pm 0,16	51,89 \pm 0,96	61,33 \pm 0,94
Ganho de dureza relativa (%)	-	229,02 \pm 6,08	288,92 \pm 5,98

Fonte: Autor

Logo abaixo, estão ilustradas as fotografias dos corpos de prova dos 3 grupos após a realização de todos os testes, evidenciando o desgaste abrasivo aplicado e as marcas deixadas pelo penetrador de diamante do ensaio de dureza Rockwell C.

Figura 7 – Grupo 1 dos corpos de prova sem tratamento térmico



Fonte: Autor

Figura 8 – Grupo 2 dos corpos de prova com tratamento térmico de têmpera sem utilização do invólucro de aço inoxidável 304



Fonte: Autor

Figura 9 – Grupo 3 dos corpos de prova com tratamento térmico de têmpera e com a utilização do invólucro de aço inoxidável 304



Fonte: Autor

5.3 DISCUSSÃO

No artigo de Tóth *et al.* (2022), onde foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera convencional e criogênica (nitrogênio a baixa temperatura) no aço K340 ISODUR, para os ensaios de dureza e desgaste, foram apresentados os seguintes resultados:

- Tratamento Térmico Convencional (CT) – Dureza de 60 HRC e Fator de Abrasão K de $4,49 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.
- Tratamento Térmico Criogênico (DCT) – Dureza de 59 HRC e Fator de Abrasão K de $4,40 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

Analisando os dados acima, é possível verificar que os resultados das propriedades mecânicas do aço K340 ISODUR, após passar pelos dos tratamentos térmicos convencional e criogênico, ficaram bem próximos dos resultados apresentados para

o aço K360 ISODUR submetido a tratamento de têmpera em forno convencional com o uso do invólucro de inox 304.

O tratamento térmico criogênico é realizado em forno de atmosfera controlada com a utilização do nitrogênio líquido para alterar as propriedades do aço. Esse componente deve ser adquirido frequentemente e mantido em estoque para garantir que o procedimento seja realizado com êxito. Isso gera um aumento significativo de custo e tempo para a empresa, além de demandar espaço e armazenamento adequado.

Os resultados obtidos com a utilização do invólucro de aço inoxidável mostram que foram satisfatórios, quando comparados aos resultados extraídos dos tratamentos convencional e criogênico do aço ferramenta Böhler K340 ISODUR, tanto no ensaio de desgaste (tendo o resultado entre 0,322 e 0,608g) quanto no ensaio de dureza (com o resultado entre 60 e 62 HRC), confirmando a importância do controle dos potenciais da atmosfera do forno durante o tratamento térmico de têmpera.

O grupo 3 de corpos de prova, que foi utilizado como invólucro o aço inoxidável AISI 304, teve perda de massa relativa média de 0,326% e ganho de dureza relativa média de 288,92% em relação ao grupo 1, que não foi tratado termicamente.

Esse método de tratamento térmico de têmpera utilizando invólucro para as peças em fornos convencionais garantiu uma excelente resposta quanto à capacidade de ganho de propriedades, mesmo se comparado aos tratamentos realizados em fornos a vácuo, onde não há a presença de oxigênio, garantindo o controle dos potenciais, pois, para UDDEHOLM (2018), o aço ISODUR K360 pode alcançar dureza entre 61 e 64 HRC em fornos a vácuo.

Em contrapartida, o grupo 2 de corpos de prova, que foram temperados sem o invólucro, tiveram perda de massa relativa média de 0,548% e ganho de dureza relativa média de 229,07%, além da alteração da aparência superficial apresentando formação de carepas.

A têmpera realizada no grupo 3 alcançou dureza entre 60 e 62 HRC enquanto a dureza do grupo 2 ficou entre 50,66 e 53 HRC. Sendo assim, utilizando invólucro de

aço inoxidável obteve-se um aumento de até 16,99%, enquanto houve uma redução na perda de massa relativa de 0,222% se comparado ao aço temperado sem ele.

Para a obtenção de custo financeiro médio dos principais itens necessários para realizar os tratamentos de têmpera e criogênico, foram realizadas pesquisas no mercado digital e contato com alguns fornecedores, chegando aos valores expressados na tabela a seguir:

Tabela 8 – Custo Médio dos Materiais e Equipamentos

Forno Convencional	Forno Atmosfera Controlada	Chapa Aço Inox 304	Cilindro de Nitrogênio 20L	Cilindro de Nitrogênio 50L	Recarga de Nitrogênio (1m³)
R\$ 5.000,00	R\$ 100.000,00	R\$ 280,00	R\$ 1.450,00	R\$ 2.230,00	R\$ 200,00

Fonte: Autor

É aconselhável utilizar o forno de atmosfera controlada sempre que uma empresa tenha condições financeiras e espaço de instalação adequados. Outro fator que poderá definir a sua aquisição, será a sua frequência de utilização. Também é interessante para a empresa, já possuir a mão de obra qualificada para operar esse tipo de equipamento, visto que o mesmo possui detalhes técnicos mais específicos do que um forno convencional.

O forno convencional pode ser utilizado em qualquer empresa que precisa realizar o tratamento térmico em suas ferramentas. O seu baixo custo e suas pequenas dimensões, possibilita sua aquisição, mesmo que o orçamento da empresa seja bem limitado. Além disso, não exige uma mão de obra qualificada, visto que sua operação é de baixa complexibilidade.

A utilização do nitrogênio é mais indicada para fornos de atmosfera controlada, por eles possuírem uma estrutura mais resistente em comparação com o forno convencional. O controle da baixa temperatura deve ser o mais preciso possível, por isso, realizar o tratamento criogênico em forno convencional, pode não ser a melhor estratégia. Cilindros de nitrogênio requerem um local de armazenagem específico e o manuseio adequado para que não ocorra danos nos mesmos. Geralmente é exigido um volume mínimo de 1m³ pelas empresas que recarregam o nitrogênio para poderem fechar o contrato do serviço.

As chapas de aço inoxidável são de baixa dimensão e carecem de menos espaço de armazenagem do que os cilindros de nitrogênio, por exemplo. Uma chapa de inox pode ser aproveitada em vários tratamentos térmicos sem que suas propriedades mecânicas sejam muito afetadas. O custo para se obter essas chapas podem são variados, mas diminuem de acordo com a quantidade que a empresa deseja comprar e manter em estoque. Seu manuseio é literalmente simples e não requer uma mão de obra qualificada para tal finalidade.

6 CONCLUSÃO

Após o desfecho do tratamento térmico de têmpera e de todos os ensaios com as devidas análises comparativas dos resultados obtidos, é possível concluir que o uso do invólucro de aço inoxidável 304 pode proporcionar um aumento na sua dureza e uma redução na sua perda de massa em comparação a uma têmpera feita sem ele. Além disso, comparando-os com o tratamento térmico criogênico, foi possível alcançar valores de dureza e desgaste bem próximos uns dos outros.

Ponderando o aspecto financeiro, no que diz respeito aos valores de aquisição, manuseio e armazenamento dos equipamentos e material utilizado para os tratamentos descritos no presente trabalho, é indicado a utilização do forno convencional com invólucro de chapa de aço inoxidável. Tratamentos de têmpera em forno de atmosfera controlada e tratamento criogênico também podem gerar custos com mão de obra que podem ser evitados com o tratamento que acabara de ser indicado.

Analisando a tabela 8 (Pág. 29) é possível verificar que, adquirir o forno convencional e utilizar em conjunto com a chapa de aço inoxidável para obter os resultados mecânicos desejados, acaba sendo financeiramente mais acessível do que recorrer ao forno de atmosfera controlada (usado na têmpera ou criogenia) ou até mesmo, usar a alternativa do tratamento criogênico em forno convencional.

Já para o forno de atmosfera controlada, o ônus principal está na aplicação inicial que a empresa precisará desembolsar para contar com este recurso. O investimento primário é muito alto, comparado a um forno convencional, o que não torna factível, já que a empresa não utilizará esses fornos com uma frequência muito alta.

Os modelos de fornos convencionais também podem atender demais necessidades como, fundição de materiais e outros tipos de tratamento térmico (além da têmpera) que estejam dentro da capacidade de temperatura do forno.

Então a utilização do invólucro de aço inoxidável 304 permite alcançar as propriedades desejadas do aço, mesmo quando realizado em um forno convencional que não possui atmosfera controlada. Assim sendo a utilização dessa camada

protetora é uma boa alternativa para empresas que não possuem um forno a vácuo, pois é possível chegar a resultados próximos com um custo menor.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALL FOILS. **Stainless Steel Sheeting, Foil and Tape**. Disponível em: <<http://www.allfoils.com/products/stainless-steel/>>. Acesso em: 19 jun. 2018.
- ARAI, Tohru *et al.* **Metals Handbook**. vol. 4. Heat Treating, ASM International, 1991.
- BÖHLER, Edelstahl GmbH & Co KG. **Aços de Trabalho a Frio**. Voestalpine one step ahead, 2021. Disponível em: < <https://www.bohler-edelstahl.com/de/products/k360/>>. Acesso em: 29 Out. 2022.
- BÖHLER Brasil. **BÖHLER K340 ISODUR**. Divisão da Aços Böhler-Uddeholm do Brasil Ltda, 2022. Disponível em <<https://www.bohler-brasil.com.br/en/products/k340ecostar/>>. Acesso em 15 Nov. 2022.
- BRESSAN, José e SCHOPF, Roberto. **Resistência ao desgaste abrasivo de aços ferramenta avaliada por meio do ensaio pino-disco**. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas (UDESC) - Campus Universitário. Joinville/SC, 2011.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Tratamentos Térmicos**. Vol.II, 2ª ed. Editora McGraw-Hill. São Paulo, 1986.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. Vol.III, 2ª ed. Editora McGraw-Hill. São Paulo,1986.
- CLAVER, Adrián *et al.* **Comparative Study of Tribomechanical Properties of HiPIMS with Positive Pulses DLC Coatings on Different Tools Steels**. Editora Coatings, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/coatings11010028>> Acesso em 10 dez. 2022.
- GARCIA, Amauri, SPIM, Jaime Alvares e SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 73 p.
- GENTIL, Vicente. Corrosão, 6ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Grupo GEN, 2011. E-book. ISBN 978-85-216-1944-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1944-4/>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas**: Uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- OLIVEIRA, Francisco Estevam Martins D. **Estatística e Probabilidade - Exercícios Resolvidos e Propostos**. 3ª edição. Barueri, São Paulo: Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788521633846. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633846/>>. Acesso em: 16 Nov. 2022.

PAZ, Vinicius. **Estudo e caracterização metalográfica da resistência ao desgaste em aços ferramenta sinterizados, temperados a vácuo, utilizados em matrizes de estampagem**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/150990>> Acesso em 24 nov. 2018.

RIBEIRO, João P C.; GODOI, Pollianna J. de Paiva M.; BATISTA, Fábio D.; CORREA, Priscila M. Tecnologia metalúrgica. São Paulo, SP: Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788595025936. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025936/>> Acesso em: 16 dez. 2022.

RIJEZA. Disponível em: <<https://www.rijeza.com.br/blog/tribologia-o-que-e->>. Acesso em: 02 Nov. 2018.

SPECTRU. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf>>. Acesso em: 25 Out. 2018.

TÓTH, László, PINKE, Péter e TRAUTMAN, Bence. **THE PROPERTIES OF BÖHLER K340 STEEL DEPENDING ON THE APPLIED HEAT TREATMENT**. European Journal of Materials Science and Engineering, 2022, pages 37-42, volume 7, issue 1. Disponível em <https://ejmse.ro/articles/07_01_04_EJMSE-22-158.pdf> Acesso em 05 de novembro de 2022.

UDDEHOLM, Böhler. **Trabalho a frio**. Disponível em: <<http://www.bohler-uddeholm.com.br/produtos-trabalho-a-frio-catalogos-gerais.php>>. Acesso em: 19 Jun. 2018.

UDDEHOLM, Böhler. **Isodur K360**. Disponível em: <<http://www.bohler-uddeholm.com.br/produtos-trabalho-a-frio-bohler-k360-isodur.php>>. Acesso em 20 Jun. 2018.

Zolin, Ivan. **Materiais de construção: mecânica**. 3. ed. – Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 76 p.: il.; 30 cm