



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL DE LIMA MAZIERO

**ADEQUAÇÃO DE MATERIAL DE UMA FACA DE CORTE DE LACRES
UTILIZADA NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ilha Solteira, São Paulo, 2022.



GABRIEL DE LIMA MAZIERO

**ADEQUAÇÃO DE MATERIAL DE UMA FACA DE CORTE DE LACRES
UTILIZADA NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Prof. Dr. Antônio de Pádua Lima Filho

Orientador

Ilha Solteira 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Maziero, Gabriel de Lima.
M476a Adequação de material de uma faca de corte de lacres utilizada na indústria alimentícia / Gabriel de Lima Maziero. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
28 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Antonio de Pádua Lima Filho
Inclui bibliografia

1. Aço ferramenta. 2. Revestimento Pvd. 3. Engenharia reversa. 4. Lacradora de garrafas.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO: ADEQUAÇÃO DE MATERIAL DE UMA FACA DE CORTE
DE LACRES UTILIZADA NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

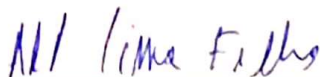
ALUNO:

GABRIEL DE LIMA MAZIERO RA: 152052917

ORIENTADOR: Prof. Antonio de Pádua Lima Filho

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

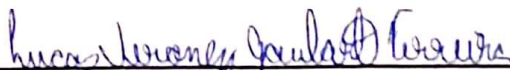
Comissão Examinadora:



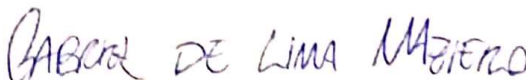
Prof. Antonio de Pádua Lima Filho
Presidente (Orientador)



Prof. Márcio Antonio Bazani



MSc. Lucas Veronez Goulart Ferreira



Aluno: Gabriel de Lima Maziero

Ilha Solteira (SP), 07 de abril de 2022.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu pai Almir José Maziero e minha mãe Denize Francisca de Lima Maziero, que me deram todo o suporte desde o início de minha graduação, sendo atenciosos, pacientes, prestativos, sempre sendo bons ouvintes e me auxiliando a enfrentar meus problemas de frente.

Dedico também a todos os meus amigos que me deram suporte durante a minha graduação frente a momentos difíceis, me ajudando a seguir em frente dando todo o suporte psicológico e me proporcionando bons momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte, apoio, e por toda a criação que me foi dada, sei que essa minha graduação representa muito para todos vocês e o quanto batalhamos para que eu pudesse estar aqui.

Agradeço meus amigos das repúblicas “Mata Burro” e “Cativeiro”, onde pude morar durante minha graduação e meu estágio respectivamente, o suporte de vocês foi fundamental para mim e sem vocês não teria chegado até aqui. Agradeço também as repúblicas “Nostravamos”, “Moita”, e “Transatlântico” que apesar de não ter sido um morador sempre me receberam de forma calorosa quando precisei passar alguns dias em Ilha Solteira e me proporcionaram grandes amizades que levarei para toda vida.

Agradeço aos grupos Precisão Engenharia e Cursinho Diferencial pelas experiências que me foram permitidas viver e às pessoas que tive o privilégio de trabalhar junto, tenho certeza que a vivência nesses grupos foi fundamental para minha construção como profissional.

Agradeço também ao time de Engenharia da Cervejaria Ambev de Jaguariúna, onde pude fazer meu estágio que proporcionou a confecção deste trabalho, obrigado por todo suporte e infraestrutura, saio com muitos aprendizados e com a certeza que estou mais preparado como profissional.

Por fim agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Antônio de Pádua Lima Filho por toda a paciência, humildade e suporte dado durante a confecção deste Trabalho. O senhor me ensinou muito sobre engenharia, caráter e respeito, sendo fundamental para mim durante a graduação.

RESUMO

A indústria 4.0 propõe a criação de áreas de pesquisa e desenvolvimento voltada para resolução de *cases* locais. É nessa proposta que nosso trabalho está inserido. Assim, este estudo se baseia na avaliação de uma peça utilizada na linha de produção para envelopar garrafas plásticas. Dessa forma, o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aqui apresentado, objetiva estudar o aço ferramenta de uma faca de corte para o lacre feito de material polimérico para envolver a tampa de garrafas PET. Esta faca tem apresentado um desgaste rápido. Como resultado, é necessário que esta ferramenta de corte seja trocada com alta frequência, resultando no aumento de custos de manutenção. Por outro lado, a confiabilidade do equipamento fica prejudicada. Então, este estudo objetiva compreender as causas desse problema, sejam elas associadas ao material de corte empregado como lâminas acopladas parafusadas num eixo de aço ou na montagem desse conjunto na gaiola do equipamento de corte. A solução mais adequada é sugerida neste TCC, seja por ajuste do equipamento de corte ou do aço ferramenta da faca.

ABSTRACT

Industry 4.0 proposes the creation of research and development areas aimed at solving local cases. It is in this proposal that our work is inserted. This study is based on the evaluation of a part used in the production line to envelop plastic bottles. Therefore, the Course Completion Thesis (TCC) presented here aims to study the tool steel of a cutting knife for the seal made of polymeric material to wrap the lid of PET bottles. This knife has shown fast wear. As a result, this cutting tool needs to be changed constantly, increasing the maintenance costs. On the other hand, the reliability of the equipment is impaired. So, this study aims to understand the causes of this problem, whether associated with the cutting material used as coupled blades screwed on a steel shaft or in the assembly of this set in the cutting equipment cage. The most suitable solution is suggested in this TCC, either by adjusting the cutting equipment or the knife tool steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Indústria.....	13
Figura 2 – Modos de falha mais frequentes em ferramentas de trabalho a frio....	16
Figura 3 – Exemplo de microestrutura de um aço D6 (a) e de um 0,8%C-8%Cr desenvolvido pela Villares Metals (b).....	19
Figura 4 – Lacradora de garrafas.....	22
Figura 5 – Módulo do conjunto do ferramental (a), eixo de sustentação das lâminas de corte fixadas por parafuso (b) e lâminas de corte e contra faca de corte (c)....	22
Figura 6 - Microestrutura do aço ferramenta do tipo H42 (UNS T20842) ASTM A681 – 08.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos aços ferramentas de acordo com a norma AISI.....**14**

Tabela 2 – Alguns exemplos de aplicação de revestimento em aço ferramenta...**20**

Tabela 3 – Análise química via espectrometria óptica.....**23**

LISTA DE SIGLAS

AISI – American Iron and Steel Institute, Sistema americano para a classificação dos aços.

ASTM – American Society for Testing and Materials, é um órgão estadunidense de normalização.

CAD – Computer Aided Design.

CAM – Computer-aided manufacturing.

ESR – Electro-Slag Remelting.

HRC – Hardness Rockwell C, é uma unidade de dureza.

HV – Hardness Vickers, é uma unidade de dureza.

PVD – Physical Vapor Deposition.

VAR – Vacuum Arc Remelting.

VIM – Vacuum Induction Melting.

3D – É uma sigla que significa tridimensional.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Contexto	12
1.2. Engenharia Reversa	13
1.3. Indústria 4.0	14
1.4. Aços ferramentas	15
1.4.1. Aços para trabalho a frio	17
1.5. Revestimento PVD	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS	22
2.1. Análise do problema no estágio numa indústria alimentícia	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1. Lacradora de garrafas	23
3.2. Desmembramento do equipamento de corte para análise	23
3.3. Análise química	24
3.4. Análise metalográfica	24
3.5. Sugestão da substituição do material da lâmina de corte	25
4. CONCLUSÃO	26
5. SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO	26
6. REFERENCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

No mundo globalizado, existe o cenário competitivo entre indústrias e tem fomentado uma busca por ganhos em manutenção e confiabilidade nos equipamentos. Neste contexto, dentro das indústrias, células locais especializadas ou centro de pesquisa na solução de problemas têm sido adotadas. A estratégia por trás dessas células é resolver problemas de forma interna gerando um aumento de confiabilidade dos equipamentos. Como resultado, isto permite que os equipamentos possibilitem operar por mais tempo sem parada não programada. Consequentemente, ocorrem menor perda de insumos resultando economia de custos na produção de produtos com um custo reduzido.

A quarta revolução industrial, ou seja, a indústria 4.0, revela novas tecnologias como ferramenta integradas ao processo produtivo para minimizar custos. Dentre essas tecnologias, por exemplo, a manufatura aditiva é empregada na elaboração de desenhos digitais de peças através de um software de modelagem tridimensional para posteriormente serem manufaturados em uma impressora 3D (prototipagem rápida).

As impressoras 3D podem fabricar peças usando diversos materiais, como uma gama de polímeros com diferentes propriedades, metais, borrachas, fibras, cerâmicas, por exemplo [13]. Dessa forma, muitos dos problemas surgidos dentro de uma indústria na linha de produção podem ser rapidamente solucionados. Então, o emprego da modelagem tridimensional dentro da empresa pode fazer uma adequação de material com a geometria dos componentes danificados. Isto aumenta a vida útil e gera economia. Entretanto, há muitos casos ainda onde é necessária uma outra forma de manufatura, seja por usinagem, forjamento, injeção de plástico, soldagem, por exemplo.

Desse modo, existem estudos de caso que é feito pelo time interno de pesquisa para o desenvolvimento da indústria. Em geral, a manufatura de peças pode ser terceirizada criando a desverticalização da empresa. Assim, a indústria tem se utilizado do recurso da Engenharia Reversa para solucionar diversos dos problemas presentes no dia a dia como será descrito a seguir.

1.2. Engenharia Reversa

A ideia de Engenharia Reversa é produzir uma peça com base num modelo sem o uso de desenhos técnicos de engenharia. Atualmente, empresas tem usado tecnologia da Engenharia Reversa empregando ferramentas CAD/CAM e prototipagem rápida. Isto minimiza as dificuldades encontradas no desenvolvimento de projeto. Desta forma, a ordem convencional de se manufaturar um produto, que começava com um desenho de engenharia e terminava com a execução de um protótipo para ser testado é transformada e assim economizando tempo de produção [1].

Uma situação que não é nova em engenharia, e acontece frequentemente, é a seguinte: uma peça de certa máquina falha e a produção em uma linha tem que parar devido à falta do elemento essencial dessa máquina, e não se possui nenhuma peça sobressalente em disponibilidade para reposição imediata [10].

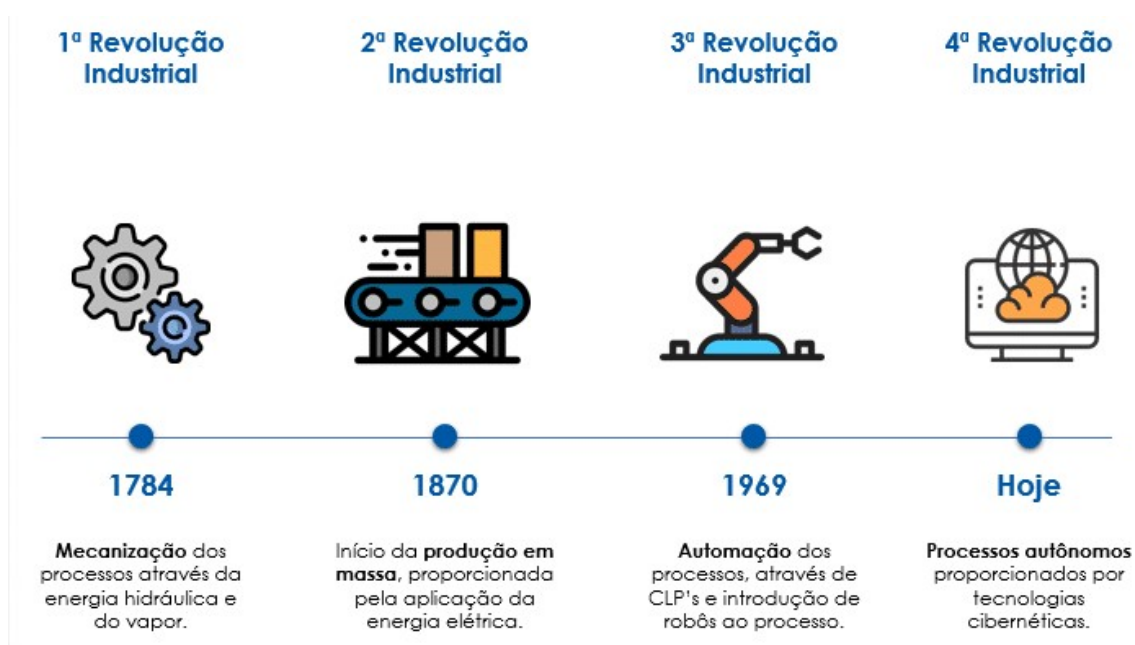
Então, essa peça severamente danificada é entregue a um operador de máquina-ferramenta para fabricar uma nova peça com as mesmas características geométricas. Em geral, é feito um esboço da peça antes de realizar as operações de usinagem da nova peça o qual é denominado de Engenharia Reversa [1].

A Engenharia Reversa tem sido uma grande alternativa principalmente para quando se perde um fornecedor de peças de reposição para um equipamento, muitas vezes se tornando a única alternativa. Muitos equipamentos que se usa hoje podem ser de até 30 ou 50 anos atrás, ou até mais antigos; e devido a isso muitas vezes se torna difícil encontrar uma forma de abastecimento de peças sobressalentes para todo equipamento que se possui [11]. Ainda segundo INGLE (1994), nações em desenvolvimento, emergentes ou até desenvolvidas se deparam com estes tipos de problemas [11].

1.3. Indústria 4.0

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, aborda sobre uma série de tecnologias que impactam a produção industrial. O conceito desta quarta revolução industrial é pautado no dinamismo que o cenário contemporâneo impõe às companhias, na qual os dados e informações devem ser traduzidos de forma rápida em soluções de problemas cotidianos, contribuindo para melhorar a eficiência e desempenho do sistema produtivo pela aplicação de novas tecnologias de fabricação [3].

Figura 1 – Evolução da Indústria.



Fonte: 8.

A Indústria 4.0 surge com a conversão dos dados físicos em digital e depois o inverso, do digital ao físico, essa explicação resume uma série de eventos que culmina na fabricação de uma peça de engenharia. Através do levantamento de dados, seu correto tratamento traduz as informações digitais em algo físico, como é o caso da manufatura aditiva [3].

A maioria das empresas hoje tem adotado todo esse conhecimento para desenvolvimento de protótipos ou produção de componentes finais complexos e personalizados [3].

Os custos desse tipo de serviço são viabilizados economicamente a cada ano, esse fator associado à sua velocidade e precisão, deixam a obtenção de peças cada vez mais tangível. Shafraneck e colaboradores (2019) afirmaram que a liberdade de criação e o suporte a projetos complexos estão indo um passo a diante da prototipagem rápida. As exigências por peças funcionais através da fabricação rápida são uma realidade cada vez mais aplicada pelas indústrias. Entretanto, as ferramentas de corte em estudo não foram usinadas dentro do pátio industrial onde o estágio foi realizado. Assim, tem usado uma desverticalização na fabricação de peças para compor o equipamento [3].

1.4. Aços ferramentas

Com a revolução industrial, acelerou-se a busca por ferramentas que apresentassem uma maior vida útil associada a uma maior performance. Foi nesse contexto, que se iniciou uma pesquisa sobre ligas de aço que possibilitassem a confecção de ferramentas de alto desempenho. Até o momento, pesquisas sobre aços ferramentas de alta performance tem sido feitas aplicando o revestimento PVD. Assim, o núcleo é mais tenaz pelo controle da distribuição de carbonetos primários diminuindo o teor de carbono e de cromo. Nesse contexto, pode-se citar o desenvolvimento do aço ferramenta para trabalho a frio para competir com o aço da série D na Villares Metals [2].

Tabela 1 - Classificação dos aços ferramentas de acordo com a norma AISI.

Aplicação	Classificação
Trabalho a frio	W (<i>Water</i>) – temperado em água
	D (<i>Die</i>) – temperável geralmente no óleo
	O (<i>Oil</i>) – temperável em óleo
	A (<i>Air</i>) – temperável no ar
Trabalho a quente	H (<i>Hot</i>) – temperável no óleo
Aços rápidos	T (ao tungstênio) - temperável no óleo
	M (ao molibdênio) - temperável no óleo

Fonte: 2

A Classificação AISI dos aços ferramentas leva em conta a sua aplicação: Aços para trabalho a frio, a quente e para usinagem (aço rápido). A Tabela 1 apresenta os tipos de aços ferramentas de acordo com a sua aplicação.

Existem outros tipos de aços ferramentas classificadas pela norma AISI, aços resistentes ao choque (série *S-Shock*); aços para injeção de plástico (*P – Plastic*), tipo L (*Low alloy*) e F tipo carbono-tungstênio [2].

Devido à complexidade da composição química dos aços ferramentas e o requerimento para alto desempenho, os aços ferramentas são preparados em forno de fusão primária tipo VIM (*Vacuum Induction Melting*) seguido pela refusão dos lingotes VIM em fornos ESR (*Electro-Slag Remelting*) e VAR (*Vacuum Arc Remelting*) para obter o máximo de desempenho da ferramenta. Dessa forma, a porcentagem de inclusões e segregação ao longo do lingote é controlada. Praticamente, os lingotes obtidos são isentos de macrossegregação, o material é denso, isto é, não existem porosidades interdendríticas, e somente pequenas inclusões dispersas são obtidas [2].

O lingote é conformado a quente e cuidados devem ser tomados durante a conformação a quente porque eles têm elevada temperabilidade devido ao elevado teor de carbono e elementos de liga (Cr, W, Mo, V, Nb, por exemplo). Assim, o resfriamento é feito dentro do forno e são recozidos para obter uma microestrutura de ferrita e carbonetos complexos com os elementos de liga para a usinagem.

O tratamento térmico visando o uso da ferramenta é feito através da têmpera e revenido múltiplo pelo menos três vezes para eliminar a austenita residual. A dureza final está relacionada ao tipo de aço ferramenta relacionada com a quantidade de carbonetos. A dureza final do aço ferramenta está relacionada com o tipo de trabalho: trabalho a frio em torno de 55 HRC, para trabalho a quente 45 a 50 HRC e usinagem em torno de 60-65 HRC [2].

Para selecionar aços ferramenta, deve-se levar em consideração uma série de fatores atrelados ao desempenho e o custo. Naturalmente, o aço escolhido deve apresentar a melhor relação custo de ferramenta por peça por ela produzida [2].

Para selecionar um aço para ferramenta também é levado em conta características como resistência ao desgaste, tenacidade, resistência ao trincamento

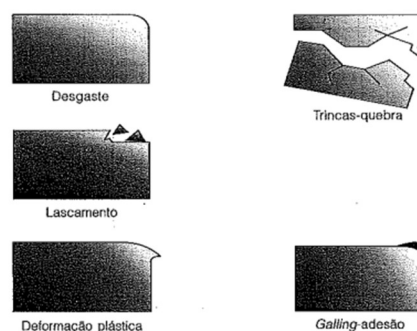
a quente e distorção na têmpera. Seleção baseada somente na resistência mecânica e tenacidade usualmente aplicada na seleção de aços para construção mecânica, não são consideradas na seleção de aços ferramentas, pois estes envolvem contato matriz e material sendo processado que resulta em mais exigências como brevemente analisadas anteriormente [2].

Uma gama de aços utilizados para confecção de ferramentas apresenta uma elevada quantidade de elementos de liga em sua composição, além de altos teores de carbono, justamente para formação de carbonetos e também obter alta temperabilidade. Dessa forma um processo de fabricação convencional pode resultar em aços com uma microestrutura não uniforme e uma composição química não homogênea devido à segregação durante a solidificação, como descrito anteriormente [2].

1.4.1. Aços para trabalho a frio

Dentre as aplicações para aços destinados a trabalho a frio, temperatura homóloga abaixo de 0,3 [12], podemos citar operações de trefilação, corte, rebarbação, forjamento, embutimento e estiramento, por exemplo. Busca-se nesses aços características como a manutenção da aresta de corte (para ferramentas de corte), resistência ao desgaste aliada com a tenacidade suficiente para evitar a falha catastrófica da ferramenta [2]. A Figura 2 ilustra falhas mais frequentes nas ferramentas de corte para trabalho a frio.

Figura 2 - Modos de falha mais frequentes em ferramentas de trabalho a frio [2].



Fonte: 2

Em geral, basicamente busca-se aços ferramentas para trabalho a frio com elevada dureza (55-60 HRC) resultado da têmpera e revenido triplo para obter uma microestrutura formada por uma matriz de martensita de alto carbono revenida e uma dispersão uniforme de carbonetos duros de pequenas dimensões [2].

Dentre os aços para trabalho a frio podemos citar as famílias D, O, A e W da classificação AISI, como descrito na Tabela 1. Aços da série D apresentam alto cromo e alto carbono, alta resistência ao desgaste (devido a presença de carbonetos primários de cromo) requerendo mínima distorção após o tratamento térmico de têmpera e revenido, sendo comumente chamados de aços “indeformáveis” [2].

Os aços da série D foram desenvolvidos a fim de substituir aços rápidos durante a Primeira Guerra Mundial. Entretanto, isso não foi possível, pois esses aços apresentaram uma dureza a quente insuficiente. Apesar disso, foi possível notar que esses aços apresentaram uma alta resistência ao desgaste, surgindo então a possibilidade de utilizá-los em matrizes de emprego na temperatura ambiente [2].

O alto carbono (1,50 – 2,20% C) e alto cromo (12% Cr) presente nos aços da Série D, torna-os suscetíveis à segregação durante o processo de solidificação, sendo assim é necessário um bom controle da qualidade de solidificação na fabricação desses aços como descrito anteriormente [2].

Por se tratar de um aço com muitos elementos de liga para ser homogeneizados na austenita antes da têmpera, é necessário um duplo ou até triplo revenimentos, isso porque não finaliza a transformação martensítica na temperatura ambiente. Assim, é necessário fazer revenimentos múltiplos para transformar a austenita residual em martensita. Então, a cada revenimento ocorre a formação de austenita em martensita, que ainda não foi transformada. Dessa forma são necessários múltiplos revenimentos de forma a garantir uma maior dureza e que resulta também para diminuir as tensões residuais da têmpera aplicada [2].

As principais aplicações para aços da Série D, são punções e matrizes de corte, embutimento e estampagem, pentes para laminação de roscas, punções, calibres, mandris e fieiras para trefilação [2]. Estes aços podem ser revestidos por uma camada de alta dureza de 3200 HV de (Ti, Al)N como analisada a seguir.

1.5. Revestimento PVD

No processo PVD, o material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo e alumínio) pode ser evaporado pelo calor ou então bombardeado com íons (*Sputtering*). Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo (por exemplo, nitrogênio ou um gás que contenha carbono), formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente. Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes a uma velocidade constante [5].

O Revestimento PVD pode ser aplicado em ferramentas para usinagem, estampagem, moldes de injeção plástica, na área odontológica em instrumentos e materiais para implantes, em peças decorativas, em peças de alta solicitação mecânica ou até para peças utilizadas na fabricação de vidro por exemplo [6].

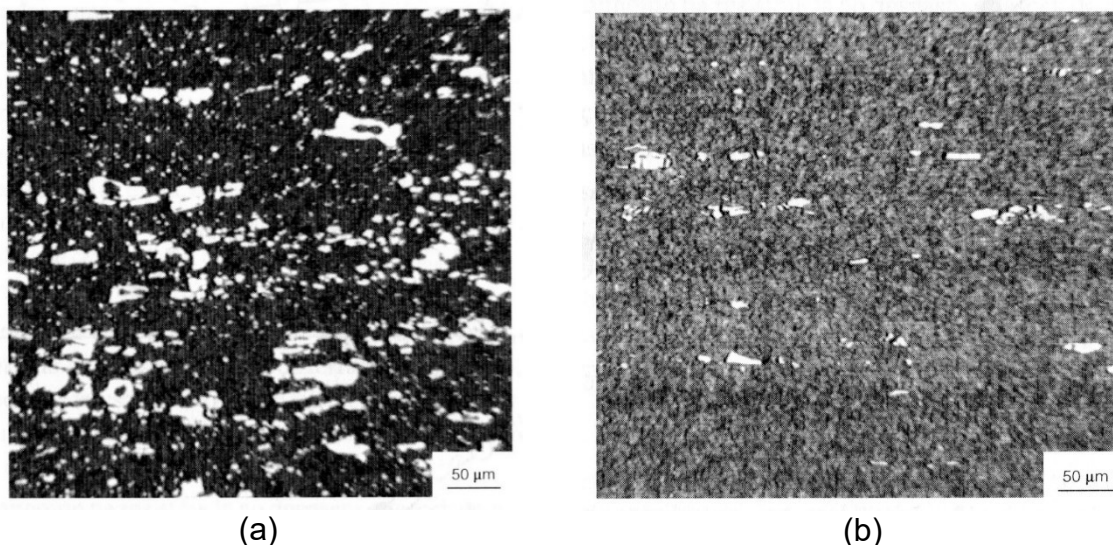
Uma estratégia comumente utilizada buscando aumentar a dureza superficial, tenacidade e resistência a fadiga e desgaste de peças é a utilização de aços ferramentas para trabalho a frio com menor quantidade de carbono e cromo revestidos de (Ti,Al)N.

Aços ferramentas com menores quantidades de carbono e cromo apresentam uma melhor distribuição de carbonetos com menores dimensões. Sendo assim é possível através do Revestimento PVD obter uma peça com um núcleo tenaz e resistente a fadiga mantendo-se uma dureza superficial alta, resistente ao desgaste [2].

Na Figura 3 (a), é possível ver uma estrutura característica de um aço D6, com carbonetos primários maiores e com uma distribuição menos uniforme, enquanto que na Figura 3 (b) é possível ver uma melhor distribuição de carbonetos de menores dimensões [2].

O processo de PVD ocorre em uma câmara ao vácuo e envolve a fonte de vapor e o substrato onde a deposição acontece. Diferentes técnicas existem devido à variação em atmosferas, meio da formação de vapor e tensão elétrica do substrato, as quais influenciam a estrutura, as propriedades e a taxa de deposição do revestimento [7].

Figura 3 – Exemplo de microestrutura de um aço D6 (a) e de um 0,8%C-8%Cr desenvolvido pela Villares Metals (b).



Fonte: 2.

A deposição no substrato é feita em três passos [7]:

1. Transição de um estado condensado, sólido ou líquido, para a fase de vapor do material depositado, ou, para a deposição de compostos, reação entre os componentes dos compostos, alguns dos quais podem ser introduzidos na câmara como um gás ou vapor;
2. O vapor sendo transportado da origem para o substrato; e
3. Condensação do vapor seguido pela nucleação e crescimento do filme.

Existem três principais técnicas para a aplicação do PVD, sendo elas: Vaporização Térmica (*Thermal vaporization*), Revestimento por jato (*Sputter Coating*) e Metalização iônica (*Ion Plating*).

- **Vaporização térmica:** é a mais antiga e mais amplamente utilizada técnica de PVD. Vaporização Térmica ocorre em um vácuo de pressão 0,1 a 10mPa e o átomo de vaporização da fonte percorre o caminho na câmara em linha reta, o que limita o processo, e, portanto, revestimentos de cantos e de ângulos reentrantes não são possíveis de realizar sem a manipulação do substrato. Revestimentos de Alumínio e Cromo para a indústria automotiva são as maiores aplicações deste processo [9].

- **Sputter Coating:** é um processo a vácuo que envolve o uso de íons de um plasma de gás gerado para desalojar átomos ou moléculas de um alvo feito do material que se tornará o revestimento. O plasma é estabelecido entre o alvo e o substrato pela aplicação de um potencial de corrente contínua ou alternada. Um gás inerte é introduzido na câmara para formar o plasma de descarga entre os eletrodos. Os materiais que podem sofrer este processo são metais puros, ligas, compostos inorgânicos e alguns polímeros. A maior restrição a ser considerada para o material do substrato é a temperatura de processo, a qual varia de 260 a 540°C. O *Sputter Coating* é frequentemente utilizado para compostos e materiais que são difíceis de revestir a partir da Vaporização Térmica [9].
- **Ion Plating:** A metalização iônica é um processo de revestimento a vácuo em que uma parte dos elementos do revestimento colide com o substrato em forma iônica. O processo é um híbrido do processo de Vaporização térmica e do *sputtering*, com a taxa de Vaporização mantida a uma taxa maior do que o *sputtering*. Alguns átomos evaporados passam pelo plasma na forma atômica, enquanto alguns átomos colidem com os elétrons do substrato e os íons. Eles incidem sobre o substrato na forma iônica [9].

Seguem alguns exemplos de aplicação de revestimentos em aços ferramenta comumente utilizados, Tabela 2.

Tabela 2 – Alguns exemplos de aplicação de revestimento em aço ferramenta.

Aço (substrato)	Aplicação
Aço rápido M2	Ferramentas de corte e brocas
Aço para trabalho a quente	Matriz para extrusão de alumínio
Aço D2	Matriz para conformação a frio

Fonte: 2.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Análise do problema no estágio numa indústria alimentícia

O primeiro passo para investigar a causa de desgaste do ferramental de corte do material polimérico na linha de produção durante o estágio na Indústria Alimentícia, foi verificar se as condições de operação estavam adequadas. Dentre estas condições podemos citar o ajuste do equipamento e a lubrificação dos mancais e as condições ambientais, por exemplo, temperatura e umidade.

Por se tratar de um equipamento de corte com diversos componentes de montagem, praticamente não há interferências externas de correntes de ar, que poderiam transportar partículas do ambiente e assim provocar desgaste prematuro do componente durante a operação de corte. Ressalta aqui que a cada 15 dias é feito o ajuste do equipamento que é uma rotina de calibração.

Por ter sido observado um desgaste prematuro da ferramenta de corte foi sugerido que estava sendo utilizado um aço ferramenta inadequado. Dessa forma, uma amostra desse material foi enviada para análise metalúrgica da ferramenta de corte. Assim, primeiramente foi feita uma análise química para obter a composição química do aço ferramenta. A análise química foi feita via espectrometria óptica. Análise metalográfica também foi feita para verificar a distribuição dos microconstituintes do aço.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Lacradora de garrafas

A Figura 04 ilustra o equipamento empregado para corte de tiras poliméricas. Estas tiras lacram garrafas de armazenamento de bebidas.

Figura 4 - Lacradora de garrafas.

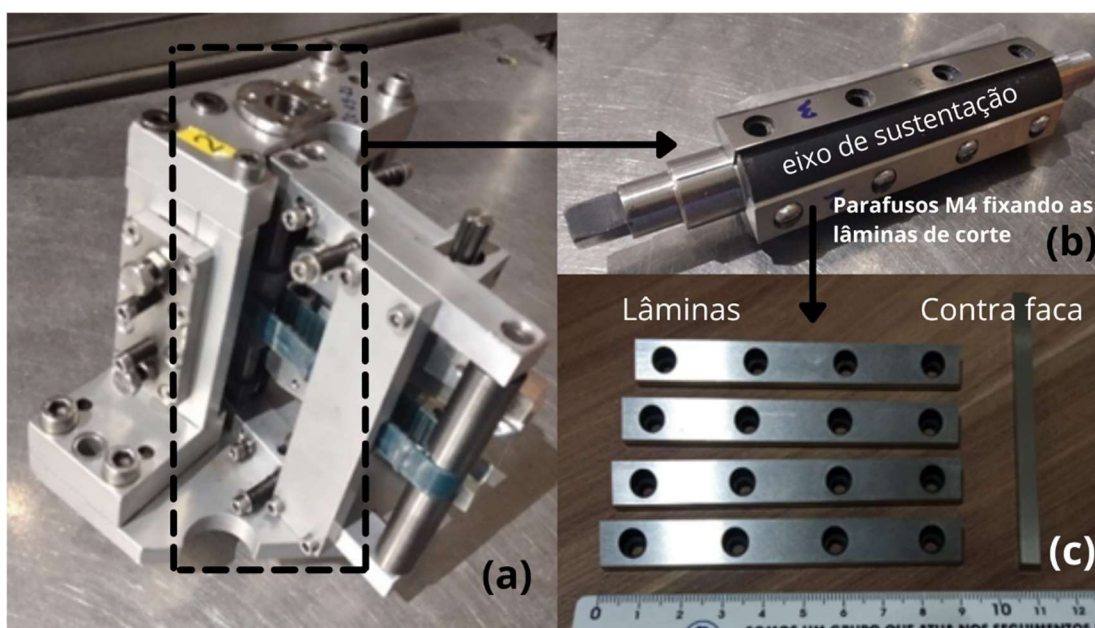


Fonte: Próprio autor.

3.2. Desmembramento do equipamento de corte para análise

O conjunto do ferramental composto pelo eixo de suporte com as lâminas de corte e contra faca foram retiradas do equipamento de corte para análise química e metalográfica, Figura 5.

Figura 5 - Módulo do conjunto do ferramental (a), eixo de sustentação das lâminas de corte fixadas por parafuso (b) e lâminas de corte e contra faca de corte (c).



Fonte: Próprio autor

3.3. Análise química

A Tabela 3 mostra a análise química das lâminas de corte. Tudo indica pela análise química da lâmina de corte que o material apresenta uma composição química similar a um aço ferramenta do tipo H42 (UNS T20842) ASTM A681 – 08 como alegado pela Empresa que executou esta análise química. Dessa forma, trata-se de um aço para trabalho a quente da série H (*Hot*).

Tabela 3 - Análise química via espectrometria óptica.

Elementos	C <i>Carbono</i>	Si <i>Silício</i>	Mn <i>Manganês</i>	P <i>Fósforo</i>	S <i>Enxofre</i>	Cr <i>Cromo</i>	Mo <i>Molibdênio</i>	Ni <i>Níquel</i>	Al <i>Alumínio</i>	Co <i>Cobalto</i>
Concentração média obtida (%)	0,90	0,53	0,29	0,033	0,002	4,1	4,8	0,29	0,029	0,94
<i>Incerteza expandida, U*</i>	± 0,0871	± 0,0608	± 0,0294	± 0,0066	± 0,0011	± 0,1145	± 0,2919	± 0,0215	± 0,0017	± 0,1043
Elementos	Cu <i>Cobre</i>	Nb <i>Nióbio</i>	Ti <i>Titânio</i>	V <i>Vanádio</i>	W <i>Tungstênio</i>	Pb <i>Chumbo</i>	Sn <i>Estanho</i>	B <i>Boro</i>	Mg <i>Magnésio</i>	Fe <i>Ferro</i>
Concentração média obtida (%)	0,17	NA	0,009	1,76	6,0	NA	0,009	NA	NA	80,1
<i>Incerteza expandida, U*</i>	± 0,0103	---	± 0,0008	± 0,1468	± 0,0993	---	± 0,0021	---	---	± 0,4234

ND – Não Detectado NA – Não Analisado Rest. – Restante --- – Não Aplicável

Fonte: Dados da pesquisa.

3.4. Análise metalográfica

A Figura 6 ilustra a análise micrográfica com aumento suficiente para observar uma microestrutura típica do aço ferramenta de corte em estudo. Este material foi temperado e revenido, constituída por carbonetos primários e dispersos na matriz martensítica.

Figura 6 - Microestrutura do aço ferramenta do tipo H42 (UNS T20842) ASTM A681 – 08.



Fonte: Dados da pesquisa.

O aço utilizado nas lâminas de corte é da série H para trabalho a quente como analisado anteriormente. Assim, este aço pode ser também empregado como lâminas para cortar tiras poliméricas na temperatura ambiente em altos ciclos de trabalho no equipamento em estudo. Pela análise micrográfica, observa-se que o material tem a presença de carbonetos primários de comprimento de 12 μm aproximadamente. Estes podem atuar como a principal causa de desgaste da lâmina de corte do material em estudo. Dessa forma, sugere-se a substituição desse aço ferramenta por um de menor teor de carbono e de elementos formadores de carbonetos (Cr, W, Mo e V) para minimizar a formação de carbonetos primários durante a solidificação. No próximo item, sugere-se a substituição desse aço ferramenta.

3.5. Sugestão da substituição do material da lâmina de corte

Consultando a referência “Aços e Ligas Especiais” dos autores André Luiz V. da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, 2ª Edição, 2006 da Editora Edgard Blücher é comparado o aço ferramenta AISI da série D com um desenvolvido pela Villares Metals. Na verdade, este estudo foi apresentado acima no item 1.5. A tenacidade é aumentada pela diminuição do teor de carbono e praticamente não observado a formação de carbonetos primários. A dureza é diminuída e neste caso é importante aplicar o revestimento PVD (Ti,Al)N e podendo essa chegar até 3200 HV [2]. Assim, garantindo uma maior resistência ao desgaste, aumentando a vida útil da lâmina de corte em estudo.

4. CONCLUSÃO

Pelo estudo brevemente realizado acima, pode-se concluir e sugerir:

A análise química e micrográfica da faca de corte da lacradora e as lâminas de corte sugerem que a causa de falha do componente estava ligada à utilização de um material que pode não ser o mais adequado para a aplicação (H42 (UNS T20842) ASTM A681 – 08) devido a presença de carbonetos primários de 12 μm aproximadamente. Este aço é empregado para trabalho a quente e pode ser naturalmente empregado para trabalho a frio.

O uso de um aço ferramenta de menor teor de carbono e elementos formadores de carbonetos com revestimento PVD (Ti, Al)N pode ser viável para aplicar como ferramental de corte dos materiais poliméricos em questão. Assim, a dureza superficial do aço ferramenta pode atingir até 3200 HV com o núcleo tenaz e resistente a fadiga. Isto possibilita o aumento da durabilidade do componente mecânico em estudo.

5. SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

Além da análise química e metalográfica realizada na ferramenta de corte estudado neste trabalho, seria importante estudar a superfície do componente desgastado empregando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) para verificar a forma de desgaste e realizar a análise química pontual para verificar eventual presença de hidrogênio formado durante a execução da operação de corte das tiras poliméricas. Sabe-se que o hidrogênio provoca a fragilização do aço.

Analisar o desgaste dos sistemas de mancais durante a operação aplicando sensores que informam a alteração da vibração durante o trabalho de corte.

Verificar se o eixo de apoio das lâminas de corte pode sofrer deformação elástica além da necessária devido a severidade do uso do módulo de corte.

6. REFERENCIAS

[1] FERNEDA, Amauri Bravo. **Integração metrologia, CAD e CAM: uma contribuição ao estudo de engenharia reversa**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

[2] André Luiz V. da Costa e Silva, Paulo Roberto Mei, Aços e Ligas Especiais, Editora Edgard Blücher, 2ª edição, 2006

[3] SILVA, Lucas Emanuel Pereira. **O uso da manufatura aditiva como ferramenta de manutenção nas indústrias de alimentos**. Orientadora: Dra. Renata Oliveira Gama. 2020. 49 f. TCC (Graduação) – Curso de engenharia de Materiais, Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba. 2020. [4] GAVRILJUK, V.G., BERNIS, H., High Nitrogen Steels, Berlin, Springer-Verlag, 1999.

[5] Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/tecnologias-de-superficie/processos-a-base-de-pvd/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20revestimento%20PVD,%C2%B0%20e%20500%20%C2%B0C.>>>

[6] Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/revestimento-pvd/>>

[7] WOLSKI, Antonio; OLIVEIRA, Mario Cezar de. Análise da influência de revestimentos aplicados por PVD na vida útil de brocas canhão e helicoidais de metal duro em processo de furação de ferro fundido e alumínio em condições reais de processo. 2015. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

[8] Disponível em: <<https://engeteles.com.br/industria-4-0/>>

[9] OERLIKON. **Oerlikon Balzers**. Disponível em <<http://www.oerlikon.com/balzers/>>. Acesso em: 09 de março de 2022.

[10] DASCHBACH, J. M.; ABELLA, R. J.; WANG, C. (1989). CAD/CAM: *reverse engineering applications*. *Univesity programs in computer aided engineering, desing, and manufaccturing*. *Seventh annual conference*. P174 – 181. Julho.

[11] INGLE, K. A. (1994). *Reverse Engineering*. New York., McGraw-Hill.

[12] Disponível em: < [http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia de Fabricacao/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20conforma%C3%A7%C3%A3o%20mec%C3%A2nica.pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia_de_Fabricacao/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20conforma%C3%A7%C3%A3o%20mec%C3%A2nica.pdf)> Acesso: 09 de Março de 2022.

[13] Disponível em: < <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-materiais-de-impress%C3%A3o-3d-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es>> Acesso: 09 de Março de 2022.