



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS



BRUNO DOS ANJOS BUENO

IMPACTO DA SUBMERSÃO DE PERFIS EXTRUDADOS DE ALUMÍNIO EM
SOLUÇÕES ALCALINAS: UM ESTUDO DE CAPABILIDADE.

São Carlos
2024

IMPACTO DA SUBMERSÃO DE PERFIS EXTRUDADOS DE ALUMÍNIO EM
SOLUÇÕES ALCALINAS: UM ESTUDO DE CAPABILIDADE.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Guilherme Yuuki Koga

São Carlos

2024



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Bruno dos Anjos Bueno

RA: 744370

TÍTULO: IMPACTO DA SUBMERSÃO DE PERFIS EXTRUDADOS DE ALUMÍNIO EM SOLUÇÕES ALCALINAS: UM ESTUDO DE CAPABILIDADE

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

CO-ORIENTADOR(A):


DATA/HORÁRIO: 25/01/2024, 09h30

BANCA – NOTAS:


	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga	10,0	10,0
Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME YUUKI KOGA**
Data: 26/01/2024 12:32:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS BARCELOS OTANI**
Data: 26/01/2024 13:51:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ao meu Pai e minha Mãe de quem eu herdei a força para cumprir qualquer desafio que me seja atribuído e que me educaram a fazê-los de forma digna;

A minha Irmã por ser meu exemplo de resiliência e por me inspirar todos os dias a seguir em frente;

A todos os meus irmãos da República Capô de Fusca, presentes nas principais histórias que eu tenho para contar;

Ao inigualável grupo de amigos que a engenharia de materiais 017 me possibilitou conhecer os autointitulados Caubóis, que me alicerçaram para concluir com os desafios da graduação.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o suporte da empresa Hydro Alumínio, que forneceu os tubos extrudados e permitiu que realizasse os ensaios em questão em suas instalações. Gratidão em especial ao time de aplicação e desenvolvimento que acreditou em mim e ofereceu a oportunidade de estágio que rendeu o tema desta tese e todos os colaboradores da empresa que me deram suporte em cada uma das fases do trabalho, ao operar por mim os equipamentos que, por norma de segurança da empresa, eu não poderia operar e por compartilharem o conhecimento agregado fruto do seu tempo de trabalho atuando na empresa.

Agradeço também o meu orientador por topiar esse desafio e me orientar tanto na escrita do trabalho quanto com aconselhamentos de carreira.

"Olha aonde nós chegou, valeu a pena esperar.
Ontem eram apenas sonhos, hoje podemos
desfrutar." (Mc Menor Mr, Mc Dede)

RESUMO

Marcel Pourbaix dedicou-se ao estudo da corrosão dos metais, culminando na publicação do "Atlas do Equilíbrio Eletroquímico" em 1964. Seu trabalho apresenta diagramas que preveem a estabilidade de espécies químicas em diversas condições de células eletrolíticas. O presente estudo utilizou esse conhecimento para corroborar a hipótese levantada pela Hydro Alumínio, indicando que o banho de desengraxe alcalino aplicado em seus tubos extrudados impactava no aumento da força mínima necessária para o cravamento de tampa por interferência, resultando em não conformidade com as especificações do cliente. Para solucionar esse problema, iniciou-se uma proposta de melhoria, que envolvia a substituição do banho de desengraxe em solução alcalina por um banho em solução neutra. De acordo com Pourbaix, o meio alcalino favorece a solubilização do óxido de Alumínio (Al_2O_3) enquanto em meio neutro o Alumínio metálico (Al) está em passivação, garantindo a estabilidade estatística do processo. Para realizar esse acompanhamento, coletou-se 180 amostras (sendo elas tubos de alumínio extrudados da liga 3103), divididas em 90 para cada uma das condições analisadas. Essa coleta ocorreu ao longo de 101 dias corridos, não consecutivos. Todas as amostras foram confeccionadas seguindo a mesma ficha de processos. A Hydro realizava a coleta dessas amostras como parte de um controle para liberação do lote produzido. Cada lote correspondia a um cesto de desengraxe com capacidade para 330 peças, totalizando um espaço amostral de 59.400 produtos. As amostras, selecionadas aleatoriamente, foram cravadas utilizando uma máquina universal de ensaios da Hydro, configurada para ensaios de compressão, permitindo a obtenção dos valores de força mínima para cravamento. Os dados coletados foram tratados com o software MINITAB® para a confecção do estudo de capacidade do processo, comparando as amostras antes e depois do processo de melhoria. O tratamento dos dados confirmou a eficácia da proposta de melhoria.

Palavras-chave: Corrosão de Alumínio. Alumina. Óxido de Alumínio. Ataque Superficial. Solução Alcalina. Proposta de Melhoria. Melhoria Contínua. Estudo de Capabilidade.

ABSTRACT

Marcel Pourbaix dedicated himself to the study of metal corrosion, culminating in the publication of the "Atlas of Electrochemical Equilibrium" in 1964. His work presents diagrams that predict the stability of chemical species under various electrolytic cell conditions. The present study utilized this knowledge to corroborate the hypothesis raised by Hydro Aluminum, indicating that the alkaline degreasing bath applied to its extruded tubes impacted the increase in the minimum force required for interference fit crimping, resulting in non-compliance with customer specifications. To solve this problem, a proposal for improvement was initiated, which involved replacing the alkaline degreasing bath with a neutral solution bath. According to Pourbaix, the alkaline environment favors the solubilization of Aluminum oxide (Al_2O_3) while in a neutral environment, metallic Aluminum (Al) is passivated, ensuring the statistical stability of the process. To monitor this, 180 samples were collected (being extruded aluminum tubes of alloy 3103), divided into 90 for each of the analyzed conditions. This collection took place over 101 non-consecutive days. All samples were manufactured following the same process sheet. Hydro collected these samples as part of a control for batch release. Each batch corresponded to a degreasing basket with a capacity of 330 pieces, totaling a sample space of 59,400 products. The randomly selected samples were crimped using a Hydro universal testing machine configured for compression tests, allowing the determination of minimum crimping force values. The collected data were processed using MINITAB® software for the construction of the process capability study, comparing the samples before and after the improvement process. Data treatment confirmed the effectiveness of the improvement proposal.

Keywords: *Aluminum Corrosion. Alumina. Aluminum Oxide. Surface Attack. alkaline solution. Improvement Proposal. Continuous Improvement. Capability Study.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Descrição dos processos realizados na Hipótese.....	17
Tabela 2 — Ligas de alumínio com suas respectivas características.....	20
Tabela 3 — Detalhamento dos diferentes elementos presentes no diagrama de Pourbaix	23
Tabela 4 — Força mínima requerida para cravamento de tampa em kgf	50
Tabela 5 — Resultado dos ensaios de rugosidade agrupado por parâmetro	52
Tabela 6 — Amostras dentro e fora das regiões de LSE e LIE	58
Tabela 7 — Análise da variação da média e do desvio padrão	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Força mínima de cravamento para as amostras da hipótese	8
Figura 2 — Tensão de escoamento do alumínio em diferentes ligas	22
Figura 3 — E-pH diagrama para alumínio puro à 25°C	24
Figura 4 — Ferramenta de extrusão - matriz para perfil sólido	26
Figura 5 — Ferramenta de extrusão - matriz para perfil tubular	26
Figura 6 — Matriz de alumínio tubular e perfil	27
Figura 7 — Fluxo esquemático de um processo de extrusão	29
Figura 8 — Fluxograma representativo dos processos de fabricação	31
Figura 9 — Ovalização de perfil tubular	32
Figura 10 — Processo de desengraxe	34
Figura 11 — Demonstrativo Gráfico para a diferença entre C_p e C_{pk}	36
Figura 12 — Paquímetro digital - Mitutoyo	38
Figura 13 — Tampas Utilizadas Para Cravamento Por Interferência	39
Figura 14 — Máquina Universal de Ensaio - AGS-100kNX	40
Figura 15 — Painel digital máquina universal de ensaio	41
Figura 16 — Gráfico gerado pelo software de controle	42
Figura 17 — Rugosímetro - Taylor Hobson Form Talysurf® CNC Series	43
Figura 18 — Amostras ensaiadas - regiões de interesse	45
Figura 19 — Amostra sendo ensaiada	46
Figura 20 — Dados do ensaio de rugosidade	47
Figura 21 — Progressão da força mínima de cravamento requerida antes e após a troca processo	51
Figura 22 — Dados de rugosidade R_a comutados	52
Figura 23 — Dados de rugosidade R_z comutados	53
Figura 24 — Dados de rugosidade R_t comutados	53
Figura 25 — Relatório de Capabilidade para todas as amostras	54
Figura 26 — Relatório de Capabilidade para as amostras desengraxadas em solução alcalina	55
Figura 27 — Relatório de Capabilidade para as amostras desengraxadas em meio neutro	55
Figura 28 — Carta X-barraS - Comparação dos processos Antes/Depois	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Fórmula Química do Alumínio
Al ³⁺	Fórmula Química do Íon Alumínio
AlO ²⁻	Fórmula Química do Óxido de Alumínio
Al ₂ O ₃	Fórmula Química da Alumina
CEP	Controle Estatístico do Processo
Cp	Capabilidade do Processo
Cpi	Diferença do Centro da Distribuição e a Especificação Inferior
Cpk	Capabilidade de Processos Que Não Estão Centrados
Cps	Diferença do Centro da Distribuição e a Especificação Superior
D	No Presente Trabalho Utilizado Como Identificador de Dimensão
Desconhecida	
E(V)	Sigla no Sistema Métrico Internacional para Potencial Elétrico
Fe	Fórmula Química do Ferro
GT	Grupo Técnico
H	Classe Hot
H ⁺	Íons hidroxônio
OH ⁻	Íons Hidroxila
H ₂ O	Fórmula Química da Água
HCl	Fórmula Química do Ácido Clorídrico
ISO	International Organization for Standardization
KgF	Unidade de Medida Para Força, Que Consta no Sistema Métrico Antigo, Técnico, e que Deve Ser Lido Como Kilograma Força
Kw	Constante de ionização da água
L	Líquido
LIC	Limite Inferior Calculado
LIE	Limite Inferior Esperado
Long	No presente trabalho, utilizado para identificar o avanço “Longitudinal” do rugosímetro
LSC	Limite Superior Calculado

LSE	Limite Superior Esperado
m	Sigla no Sistema Métrico Internacional para um Metro
mm	Sigla no Sistema Métrico Internacional para um Milímetro
mm/min	Velocidade de deslocamento, unidade não padronizada ao SI
M	Classe M – para faixa “Média” de tolerância
N	Unidade de medida para força, que consta no Sistema Métrico Internacional e que deve ser lido como Newton
NBR	Sigla para Normas (N) Técnicas Brasileiras (BR)
PCP	Planejamento e Controle de Processos
pH	é o logaritmo negativo da concentração de íons hidroxônio (H ⁺)
pOH	é o logaritmo negativo da concentração de íons hidroxila (OH ⁻)
Ra	Desvio da média aritmética
Rp	Altura máxima do pico do perfil
Rt	Altura total
Rv	Profundidade máxima do vale do perfil
Rz	Altura máxima
S	Sólido
SI	Sistema Métrico Internacional
Si	Fórmula Química do Silício
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
μin	Sigla no Sistema Métrico Internacional para micropolegadas
μm	Sigla no Sistema Métrico Internacional para um Micrômetro
X	Eixo das abscissas, horizontal, no plano cartesiano
Y	Eixo das ordenadas, vertical, no plano cartesiano
Z	Eixo de cotas, paralelo à folha, no plano cartesiano
Zp	Altura máxima do pico – parâmetro de rugosidade
Zv	Profundidade máxima do vale – parâmetro de rugosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
%	Porcentagem
μ	Letra grega que representa o prefixo micro no Sistema Internacional para um milionésimo
®	Marca registrada
α	Letra grega alfa
β	Letra grega beta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	HIPÓTESE	16
1.3	INTERPRETAÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	LIGAS DE ALUMÍNIO.....	20
2.1.1	Série 3XXX	21
2.1.2	Propriedades mecânicas	21
2.2	DIAGRAMA DE POURBAIX.....	22
2.2.1	Diagrama para Alumínio	23
2.2.2	Tarugo	25
2.2.3	Matriz De Extrusão (Ferramenta)	25
2.2.4	Perfil	27
2.2.5	O Processo de Extrusão	28
2.3	PROCESSO PRODUTIVO.....	30
2.3.1	Preparação da Amostra	30
2.3.1.1	Ovalização do perfil	32
2.3.2	Banho de Desengraxe	33
2.3.3	Cravamento de Tampa	34
3	MATERIAIS E METODOS	37
3.1	AMOSTRAS	37
3.1.1	Tubos	37
3.1.1.1	Medição manual	38
3.1.2	Tampas	38
3.2	ENSAIO DE COMPRESSÃO	39
3.3	ENSAIO DE RUGOSIDADE.....	43
3.4	ESTUDO DE CAPABILIDADE	47
3.4.1	Controle Estatístico de Processos (CEP)	47
3.4.2	Histograma de Capabilidade	47
3.4.3	Índices de Capabilidade	48
3.4.4	Carta Xbarra-S	48
3.4.5	MINITAB®	49
4	RESULTADOS	50
4.1	ENSAIO DE COMPRESSÃO	50
4.2	ENSAIO DE RUGOSIDADE.....	51
4.3	ESTUDO DE CAPABILIDADE	54
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
5.1	ENSAIO DE RUGOSIDADE.....	57
5.2	ENSAIO DE COMPRESSÃO E ESTUDO DE CAPABILIDADE	57
5.2.1	Compilamento Gráfico	57

5.2.2	Relatórios de Capabilidade	58
5.2.2.1	Histograma de capacidade	58
5.2.2.2	Carta Xbarra e Carta S.....	59
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O alumínio não é encontrado em sua forma metálica na natureza. Sob a perspectiva da termodinâmica a sua forma elementar é instável e tende a querer voltar para a condição de minério. No entanto, o fenômeno de passivação, formação de óxido ou hidróxido em sua superfície, protege a região metálica da exposição a condições que resultariam na oxidação do material (Gentil, 2007).

De consulta feita ao Guia Técnico do Alumínio (2008), obtém-se o alumínio metálico, comercialmente puro, minerando a bauxita, após limpeza para remoção dos resíduos juntamente coletados – aumentando a concentração do minério -, moendo, decantando, prensando e precipitando para a obtenção da alumina, que é um pó branco que contém o elemento alumínio ligado com o oxigênio na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3). Este óxido é o resultado da passivação que protege as peças acabadas de alumínio.

Segundo afirmou Janaina Donas, presidente-executiva da ABAL: “o Brasil tem a 4ª maior reserva de bauxita do mundo, sendo que parte significativa dessa reserva está no Pará.” em entrevista à CBN Amazônia em dezembro de 2023 (Revista Alumínio, 2023).

Em um processo de eletrólise aquosa, solução de ácido clorídrico (HCl), aplicasse alta quantidade de energia elétrica ao sistema, para desagregar o Alumínio do Oxigênio, obtendo, junto com outros produtos da reação, Alumínio sólido ($\text{Al}_{(s)}$) e água ($\text{H}_2\text{O}_{(l)}$) (Abal, 2008).

A partir da redução eletrolítica da alumina, pelo processo Hall-Héroult, também conhecido como “smelter” obtém-se o alumínio metálico. Esse processo ocorre com a deposição da alumina em uma cuba eletrolítica e com a submissão de grandes quantidades de energia elétrica para que ocorra a redução de forma não espontânea. Essa condição forçosa resulta em o alumínio ser um metal eletro-intensivo (Xavier, 2014).

Como disponível no blog da Saint-Gobain, “Óxido de Alumínio (Al_2O_3), frequentemente abreviado como Alumina, é uma das famílias de materiais de cerâmica fina mais populares em todo o mundo.”. Por ser um material cerâmico, apresenta propriedades mecânicas distintas da faixa de propriedades dos metais (Saint-Gobain).

No presente trabalho será apresentado o impacto que soluções com diferentes pH tem na camada de óxido de alumina que recobre peças de alumínio. Utilizando o diagrama de Pourbaix como a possível justificativa teórica para essa variação e demonstrando através de estudo de capacidade - avaliação estatística da habilidade de um processo atender a produção de peças de acordo com as especificações predefinidas -, o impacto na linha de produção de um dos produtos fornecidos pela empresa Hydro Alumínio.

As amostras fornecidas pela empresa Hydro alumínio, que são o objeto desse estudo, são tubos redondos extrudados da liga 3103 que serão cravados por prensa hidráulica em processo com interferência, no decorrer do trabalho esse processo será identificado como cravamento.

Saber que o processo ocorreu com interferência é crucial para esse estudo, pois o processo realizado pelo cliente da Hydro tem limite de força exercível e que das amostras que apresentaram força para cravamento superior ao requerido pelo cliente houve arraste de material na direção da força aplicada para cravamento.

1.1 OBJETIVOS

Após acompanhamento de toda a cadeia produtiva ao qual o alumínio foi submetido para a confecção do produto. O presente trabalho teve como objetivo revisar na bibliografia uma justificativa teórica para o processo que apresentou o maior impacto na redução da força mínima para cravamento de tampa por interferência nos tubos redondos de alumínio da liga 3103. Com o processo identificado, realizou-se estudo de capacidade, com suporte do software estatístico MINITAB®, para avaliar a repetibilidade do processo de melhoria implementado. Sendo a capacidade do processo a habilidade de se gerar produtos dentro da faixa de especificação definida pela empresa ou cliente (Coutinho, 2020).

1.2 HIPÓTESE

Dentre os processos analisados, e isolados para teste de força mínima requerida para cravamento, o grupo de ensaios que apresentou a maior variação e nos condicionou ao aprofundamento de testes e resultou no desenvolvimento deste trabalho foi na fase final da cadeia produtiva. O processo de banho de desengraxe.

O teste que proporcionou a hipótese, com os dados demonstrados abaixo, foi o cravamento de um grupo de 16 amostras subdivididas em quatro grupos com quatro amostras cada. Todas as amostras foram obtidas após corte em serra, processo corrente. O primeiro grupo, “Controle”, foram as peças cravadas sem nenhum processo posterior ao corte, logo as peças foram ensaiadas com óleo lubrificante (neutro) residual do processo.

O segundo grupo, “Fluido Refrigerante” (fluido utilizado no processo de usinagem, para garantir que nem a peça nem a ferramenta de desbaste aqueçam no processo, e possui pH neutro), foi ensaiado após ter sido usinado e sem passar pelo processo de desengraxe.

O terceiro grupo, “banho de desengraxe” (processo utilizado para lavagem de todas as peças produzidas na Hydro e que ocorrem em solução com pH alcalino), foi ensaiado após as peças serem limpas no processo corrente de desengraxe.

Para a obtenção do quarto grupo, “Processo Corrente” as peças simulam o processo corrente, tendo sido ensaiadas após processo de usinagem (submetidas a exposição do fluido refrigerante analisado individualmente no grupo 2) e banho de desengraxe (submetidas a exposição do fluido desengraxante analisado individualmente no grupo 3).

As informações apresentadas nos parágrafos anteriores estão compiladas na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Descrição dos processos realizados na Hipótese.

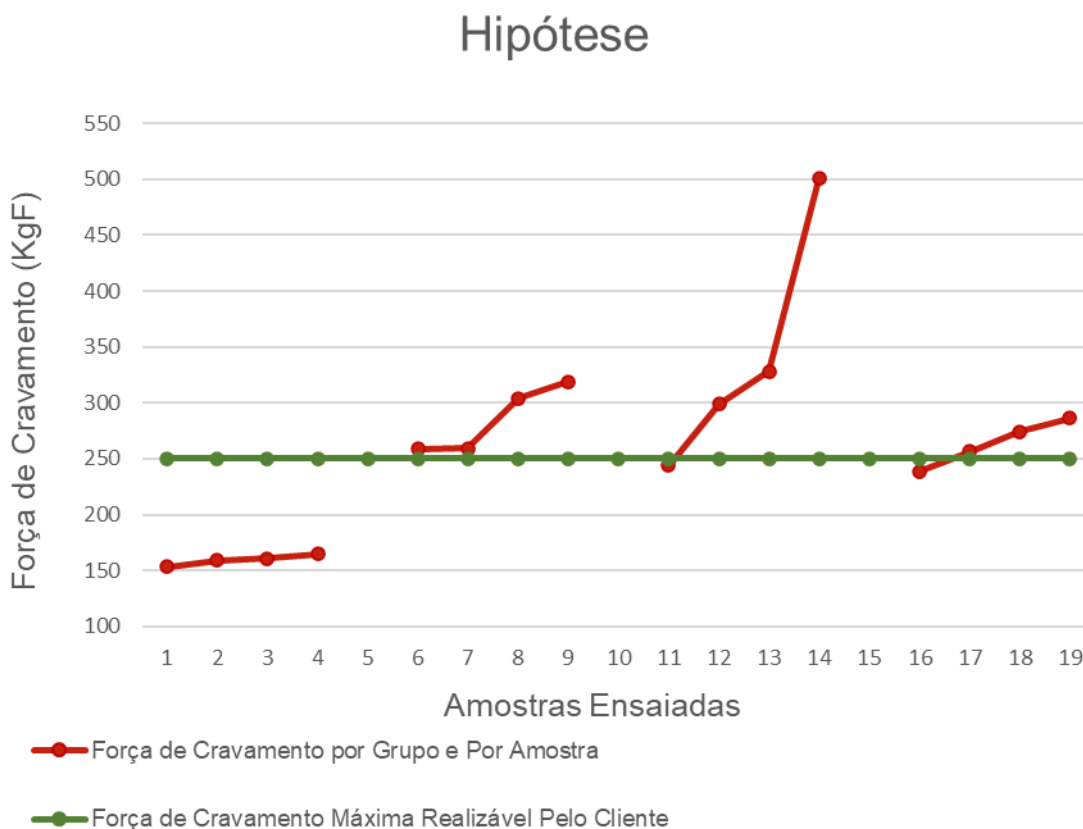
Grupos		Processos		
		Corte	usinagem	Desengraxe
1	Controle	O	X	X
2	Fluido Refrigerante	O	O	X
3	Banho de desengraxe	O	X	O
4	Processo corrente	O	O	O

Fonte: Autoria Própria (2024).

Para melhor visualização das informações descritas anteriormente, abaixo temos na Figura 1 os resultados das forças mínimas de cravamento, apresentadas em forma de gráfico. As forças estão agrupadas na mesma ordem de apresentação dos subgrupos. Sendo da amostra 1 a 4 - “Controle”, 5 a 8 - “Fluido Refrigerante”, 9 a 12 - “banho de desengraxe” e 13 a 16 - “Processo Corrente”, e apresentadas na cor

vermelha. Na cor verde temos a linha referência com a força máxima aceita no processo do cliente.

Figura 1 — Força mínima de cravamento para as amostras da hipótese.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Pode-se observar que somente o grupo “controle” obteve valores de força mínima de cravamento abaixo do requisitado pelo cliente, alvo do processo de melhoria.

1.3 INTERPRETAÇÃO

Sendo o grupo “banho de desengraxante”, o grupo com a amostra com a maior força requerida para cravamento, e por ser o único com fluido de processo com pH diferente de neutro, pH alcalino, investigou-se o impacto que soluções alcalinas apresentavam em peças, perfis e produtos de alumínio em um geral.

Como fortalecimento da hipótese, analisou-se o estudo de pourbaix, que, através do diagrama disponível para alumínio, em soluções alcalinas ocorre o favorecimento da formação de alumina, o óxido que recobre peças de alumínio metálico. Tendo o grupo 1 “controle” apresentado as menores forças para cravamento e do diagrama interpretou-se que em soluções com pH neutro ocorre a passivação do alumínio, apresentou-se a proposta para substituição da solução para o banho de desengraxe. (Sukiman, 2012, p. 52).

O limite utilizado como referência para o estudo de hipótese estava baseado na capacidade instalada do cliente, com força máxima disponível para 250kgf. No entanto, para atender a demanda do cliente de redução de força mínima exigida para cravamento, foi estipulada um objetivo de produzir peças que não ultrapassassem uma força máxima de 150kgf para cravamento.

Nas amostras analisadas neste trabalho, identificou-se que nas peças que atenderam esse novo target não se observou arraste de material junto com o processo de cravamento. Porém esse comportamento foi observado nas peças que para serem cravadas foi exigida maior força.

Essa deposição de material foi analisada através de um ensaio de rugosidade, utilizando o Rugosímetro - Taylor Hobson Form Talysurf® CNC Series -, disponível na Hydro. Comparando os parâmetros fornecidos pelo dispositivo, Desvio da média aritmética - Ra, Altura total - Rt e Altura máxima – Rz.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O alumínio, o metal mais abundante na crosta terrestre, é amplamente utilizado na indústria devido à sua menor densidade, resistência à corrosão e versatilidade. A descoberta e produção industrial em larga escala do alumínio ocorreram no século XIX, marcando uma revolução na fabricação de materiais. Sua popularidade cresceu ainda mais com o desenvolvimento de ligas de alumínio, que visam melhorar propriedades específicas do metal (Abal, 2008).

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio são combinações metálicas que incluem o alumínio como componente principal, combinado com outros elementos para aprimorar suas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Essas ligas são cruciais em uma variedade de aplicações industriais, desde aeronaves até estruturas arquitetônicas, devido à sua relação única entre resistência e peso (Abal, 2008). O principal elemento de liga presente em cada uma das séries e a respectiva propriedade esperada estão presentes no Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 — Ligas de alumínio com suas respectivas características

Série	Características
Ligas 1xxx	Ligas com 99% de pureza de alumínio. Utilizado em contatos elétricos.
Ligas 2xxx	Ligas base de alumínio/cobre. Um dos tipos de alumínio aeronáuticos, muita resistência mecânica e menor densidade, além de excelente condutividade térmica
Ligas 3xxx	Ligas base de alumínio/manganês. Usadas em aplicações arquitetônicas
Ligas 4xxx	Ligas base de alumínio/silício. Muito usadas em aplicações para varetas de solda, brasagem
Ligas 5xxx	Ligas base de alumínio/magnésio. Conhecidas amplamente como “alumínio naval”, devido a sua excelente resistência a corrosão em ambientes agressivos. Usada amplamente em moldes de alumínio para injeção e sopro de materiais poliméricos de baixa densidade
Ligas 6xxx	Ligas base de alumínio/magnésio/silício. Liga usada em produtos extrudados, como perfis estruturais e arquitetônicos. Liga que aceita muito bem processos posteriores como Anodização, soldagem, texturização etc.

Série	Características
Ligas 7xxx	Ligas base de alumínio/zinco. Também conhecida como alumínio aeronáutico ou “duralumínio”. Ligas excelentes para moldes de injeção de polímeros de alta densidade

Fonte: Adaptado de METALTHAGA (2017).

2.1.1 Série 3XXX

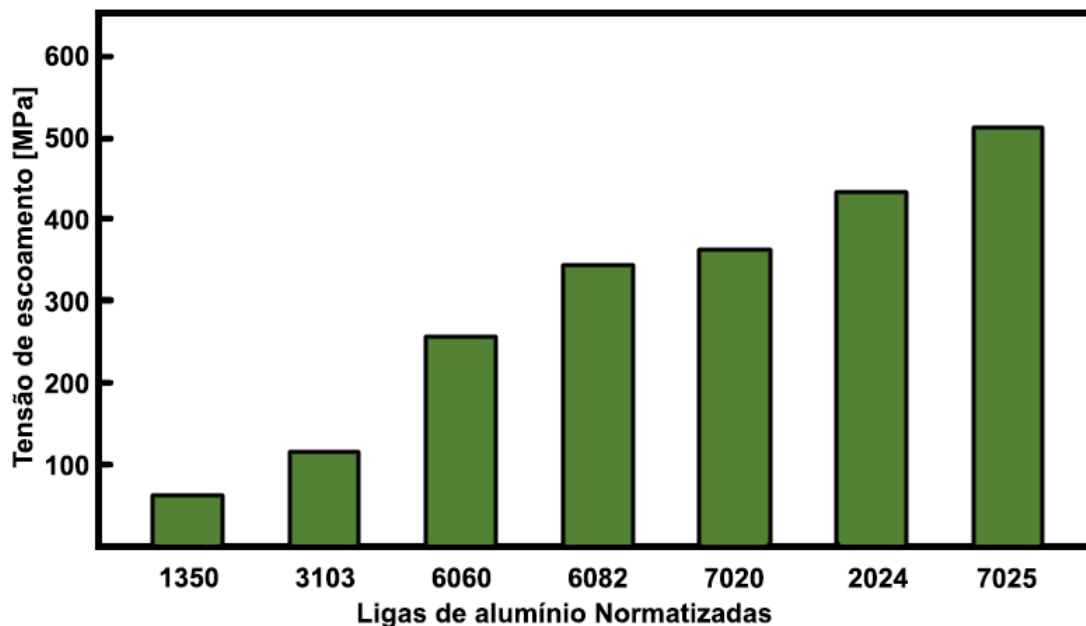
A série 3xxx tem como característica o manganês ser seu principal elemento de liga. Essa adição auxilia no processo de homogeneização, transformação da fase β -AlFeSi, em forma de placas frágeis, para a fase α -AlFeSi, menor razão de aspecto (Zajac *et al.*, 1994). Na liga 3103 utilizada, sua faixa de concentração é entre 0,9-1,5% em porcentagem de massa (Abal, 2008) e ligas a partir de 1% de concentração de Mn já apresentam melhores propriedades mecânicas sem perder a ductilidade (Lee; Park; Nam, 1999).

2.1.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das ligas de alumínio, são determinadas por fatores como a composição química, processamento térmico e método de fabricação. A resistência à tração, limite de fluência, alongamento e dureza são parâmetros críticos que refletem o desempenho mecânico dessas ligas e seu entendimento é crucial para o processo de seleção de materiais.

No Figura 2. temos uma comparação entre as tensões de escoamento em diferentes ligas de diferentes séries de alumínio, que conforme o Tabela 2, resulta em aplicações preferencias para os diversos setores de produção em que podemos encontrar o alumínio.

Figura 2 — Tensão de escoamento do alumínio em diferentes ligas



Fonte: Autoria Própria: A partir de dados disponíveis de ABAL (2008).

2.2 DIAGRAMA DE POURBAIX

Os diagramas de Pourbaix, são uma ferramenta importante na química e na eletroquímica para entender o comportamento de elementos e compostos em soluções aquosas em termos de potencial elétrico (E(V)) e pH. Eles foram desenvolvidos por Marcel Pourbaix, um químico Belga, e são particularmente úteis na determinação das condições de estabilidade de diferentes estados de oxidação de um elemento ou a formação de diferentes espécies químicas em solução (Falleiros, 2023).

Para uma melhor compreensão, no Tabela 3 abaixo, estão detalhadas informações referentes a elementos gráficos comumente encontrados nos diagramas.

Tabela 3 — Detalhamento dos diferentes elementos presentes no diagrama de Pourbaix

Propósito	Os diagramas de Pourbaix são usados para prever a estabilidade de compostos e espécies em soluções aquosas. Eles ajudam a identificar as condições em que um elemento ou composto está na forma de metal, íon, hidróxido, óxido ou outros estados de oxidação.
Eixos do Diagrama	O eixo horizontal representa o pH, que é uma medida da acidez ou basicidade da solução. O eixo vertical representa o potencial elétrico (voltagem) em relação ao eletrodo de referência.
Regiões do Diagrama	Cada região corresponde a um diferente estado de oxidação do elemento. Enquanto uma região prevê a condição em que o metal está na forma metálica sólida, passivação. Em outra, indica a condição em que ele se dissolve como íon metálico em solução.
Linhas de Equilíbrio	As linhas no diagrama de Pourbaix representam equilíbrios entre diferentes espécies químicas. Cada linha separa duas regiões com condições termodinâmicas diferentes. Quando um ponto está sobre uma linha, indica que as duas espécies em ambos os lados da linha estão em equilíbrio sob as condições especificadas.
Aplicações	Os diagramas de Pourbaix são amplamente usados na eletroquímica, na proteção contra corrosão, no tratamento de água e em processos industriais que envolvem reações em soluções aquosas. Eles também são úteis na pesquisa em química, geologia e ciências ambientais.
Interpretação	A interpretação dos diagramas de Pourbaix envolve a identificação das regiões de estabilidade de diferentes espécies químicas, a determinação das condições de corrosão e a previsão das reações eletroquímicas em soluções aquosas.
Exemplos	Os diagramas de Pourbaix são desenvolvidos para vários elementos e sistemas, e são amplamente disponíveis na literatura científica. Eles podem ser usados para entender o comportamento de elementos como ferro, alumínio, cobre, manganês, entre outros, em diferentes condições de pH e potencial elétrico.

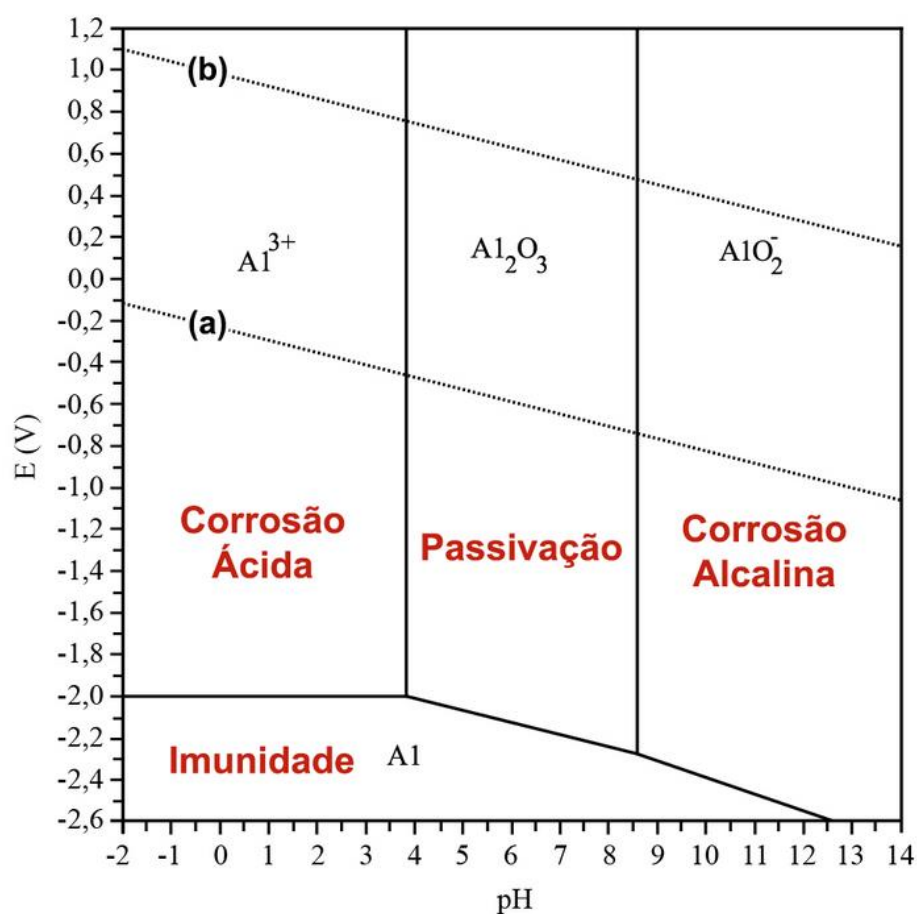
Fonte: Informações consultados em slide de aula da professora Neusa Alonso-Falleiros (2023) disponível pelo EDISCIPLINAS da USP (DIAGRAMAS DE POURBAIX ou DIAGRAMAS E vs pH).

Os diagramas de Pourbaix são ferramentas valiosas para cientistas e engenheiros que trabalham com reações em soluções aquosas, especialmente em sistemas eletroquímicos. Eles fornecem informações essenciais para a compreensão das reações químicas auxiliando na predição da estabilidade, ou não, de diferentes espécies químicas.

2.2.1 Diagrama para Alumínio

Baseando nas informações descritas na seção anterior, o Figura 3 abaixo, foi construído para prever o comportamento do alumínio metálico quando exposto a diferentes soluções aquosas e para diferentes potenciais eletrolíticos.

Figura 3 — E-pH diagrama para alumínio puro à 25°C



Fonte: Adaptado de Pourbaix (1962) apud Sukiman (2012, p. 52).

Entre as linhas (a) e (b) temos a estabilidade da água e dos produtos decompostos no processo de corrosão. Essa será a nossa região analisada. Os diagramas de Pourbaix não preveem o impacto que os elementos de liga teriam na variação da estabilidade para a corrosão (Sukiman, 2012, p. 52).

O alumínio se encontra passivo à corrosão na faixa de pH entre 4 e 9, protegido pelo filme de Al_2O_3 . Essa região contempla soluções neutras, onde a alumina não é solubilizada, mantendo a integridade da peça submersa.

Para as regiões mais ácidas, $pH < 4$, ocorre a oxidação do Al, favorecendo a formação do íon de alumínio Al^{3+} , enquanto na região alcalina, $pH > 8,5$, o favorecimento é para a formação do óxido de alumínio AlO_2^- por redução.

2.2.2 Tarugo

Segundo o glossário de termos técnicos da ABAL, Tarugo - Produto de forma geralmente cilíndrica, obtido por fundição e destinado a extrusão; e sendo a geometria mais utilizada para o transporte do alumínio metálico para os seus beneficiadores, e entregues já na liga desejada, seja para utilização imediata na extrusão ou para ser utilizado como matéria prima para refusão e vazamento na composição de uma liga especial (Abal, 2008).

As dimensões do tarugo são definidas de forma a otimizar as cargas de transporte. No entanto a dimensão recebida não é a ideal para o processo de extrusão. Antes de ser alimentado na prensa, o tarugo, é cortado em partes de menor comprimento, nomeado *billet*, que a partir de tradução livre do inglês, significa: peça de metal maciço com seção de corte comumente circular ou quadrada (Astro Machine Works, 2021).

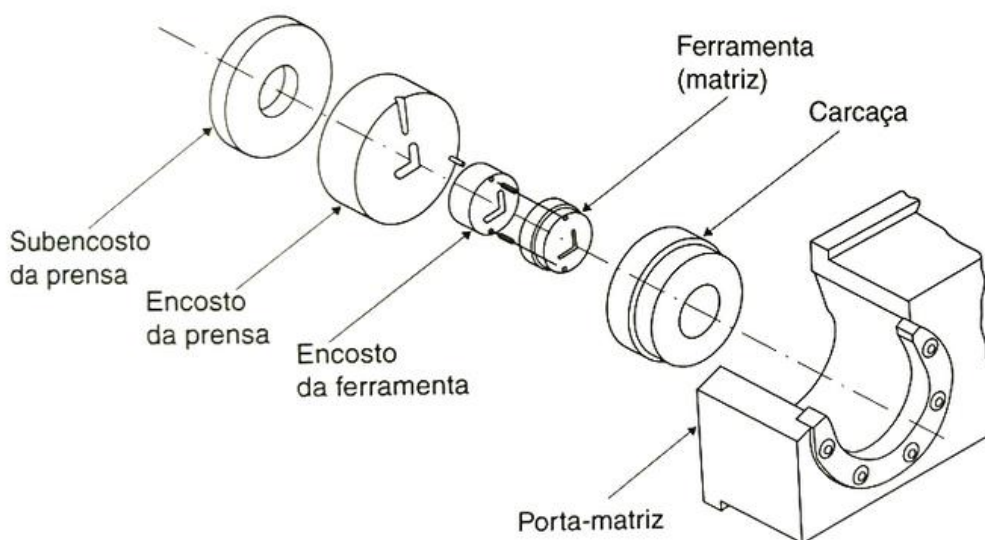
2.2.3 Matriz De Extrusão (Ferramenta)

A obtenção do perfil desejado está atrelada a passagem de um bloco de alumínio através de uma matriz especial, criando um perfil longo e contínuo com a seção transversal desejada. As ferramentas utilizadas nesse processo, conhecidas como matrizes de extrusão, desempenham um papel crucial na definição da forma e qualidade do produto final.

Para suportar o trabalho realizado pela prensa para deformação do alumínio, é utilizada uma classe especial de aço. Para a extrusão, normalmente é utilizado o chamado aço para trabalho a quente (Abal, 2008), sendo os principais aços para trabalho a quente são os da série AISI (*American Iron and Steel Institute*) H (classe Hot) E, nesta classe, os principais representantes são os aços H11 e H13 (Mesquita *et al.*, 2013).

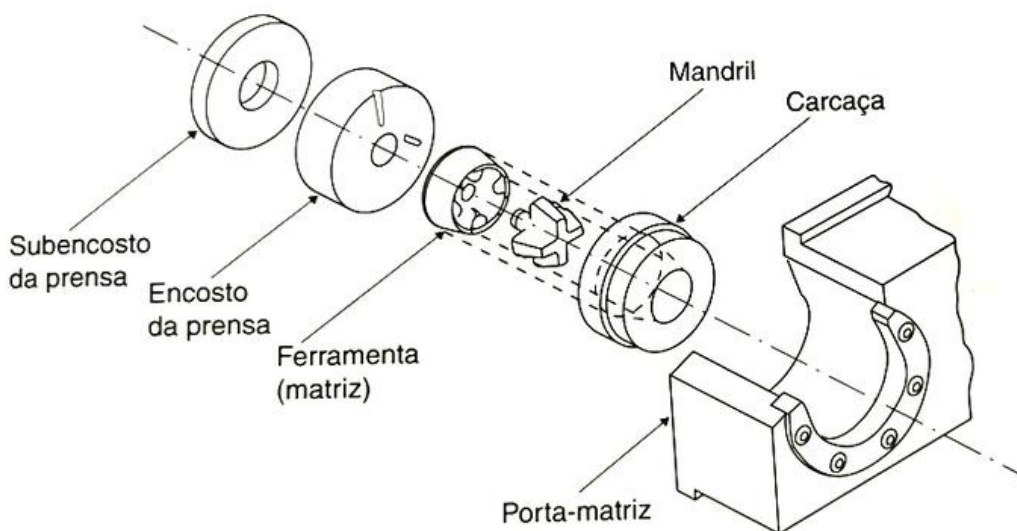
O processo para obtenção dos perfis sólidos e tubulares é semelhante, variando com a troca da matriz utilizada no processo de extrusão. As figuras 4 e 5 a seguir são representações de montagem e colocação da matriz na prensa para auxiliar na compreensão do processo. Sendo a Figura 4 para os perfis sólidos e a Figura 5 para os tubulares.

Figura 4 — Ferramenta de extrusão - matriz para perfil sólido



Fonte: disponível em ABAL (2008).

Figura 5 — Ferramenta de extrusão - matriz para perfil tubular



Fonte: disponível em ABAL (2008).

A diferença nas representações é a presença do mandril, para os perfis tubulares, pois, a partir dele que se controla a forma interna dos produtos ocios durante a extrusão. Essa peça adicional, também pode ser denominada pelo nome "espina".

Na Figura 6, de forma simplificada, temos uma representação adicional de como o conjunto mandril e matriz resultam na obtenção do perfil tubular desejado.

Figura 6 — Matriz de alumínio tubular e perfil



Fonte: VOESTALPINE.

2.2.4 Perfil

O perfil extrudado, resultado do processo de extrusão, pode apresentar uma variedade de formas e tamanhos, dependendo da configuração da matriz utilizada durante sua fabricação. Esse produto é fundamental em diversas aplicações, encontrando utilidade desde esquadrias de janelas até componentes para a indústria automotiva, construção civil, eletrodomésticos, entre outros setores (ABAL, 2021).

Durante o processo de fabricação, as propriedades específicas do perfil extrudado, como resistência mecânica, resistência à corrosão e aparência, são cuidadosamente controladas. Além disso, após a extrusão, os perfis podem ser cortados conforme as dimensões desejadas e passar por processos adicionais de acabamento, como anodização ou revestimentos, para atender aos requisitos específicos dos clientes.

A inspeção de qualidade é uma etapa crucial, submetendo os perfis extrudados a rigorosos processos para garantir que atendam aos padrões estabelecidos. A extrusão proporciona uma flexibilidade significativa na personalização dos perfis, permitindo adaptá-los aos requisitos específicos de design e funcionalidade.

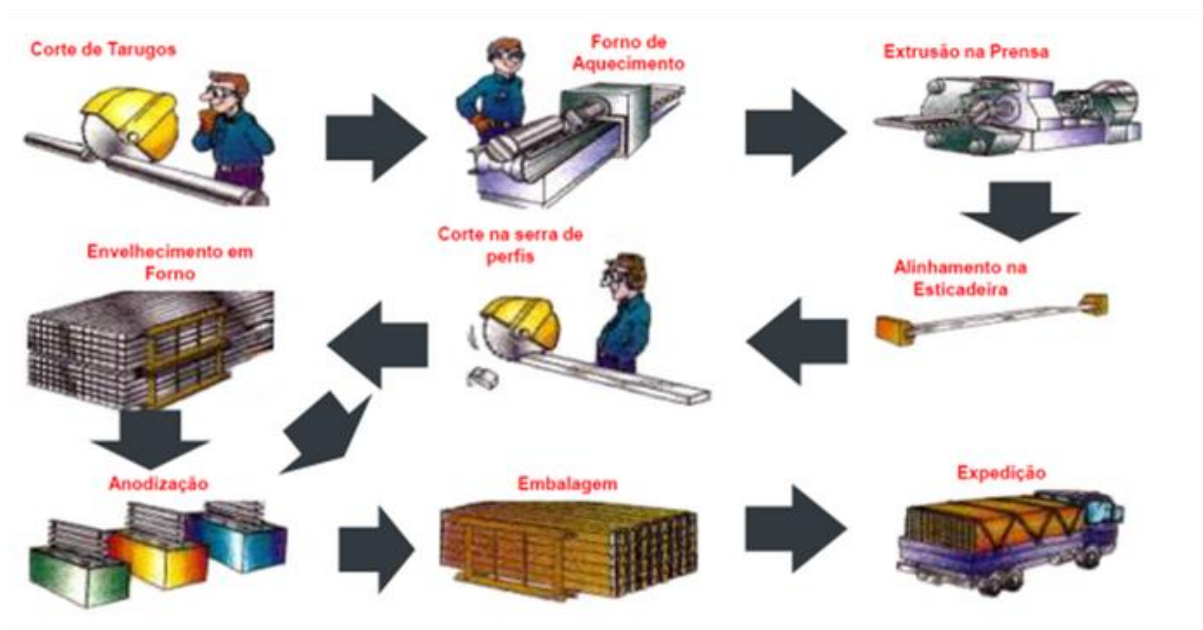
A eficiente combinação da prensa de extrusão com a matriz correta e controles adequados é essencial para a produção de perfis extrudados de alta qualidade, atendendo às exigências dos clientes. Esse processo é amplamente adotado devido à sua versatilidade na criação de formas complexas de alumínio, proporcionando uma boa relação resistência-peso.

2.2.5 O Processo de Extrusão

No processo de extrusão, o tarugo é impulsionado contra a matriz ferramenta, etapa fundamental e nomeadora. Além disso, existem etapas de preparação e posteriores a extrusão que devem ocorrer e, em busca de eficiência e produtividade. Na Hydro, essas etapas são planejadas em uma reunião multidisciplinar entre os times de engenharia, processos e qualidade, denominada GT (Grupo Técnico) que definem quais os parâmetros ideais devem ser implementados para obter o melhor desempenho da extrusão, como um todo.

No Figura 7, a “expedição” é a última etapa do processo de extrusão, sendo utilizada como transporte interno para o galpão da fabricação, onde obteremos a peça final e por consequência as amostras que foram ensaiadas neste trabalho.

Figura 7 — Fluxo esquemático de um processo de extrusão



Fonte: Autor Desconhecido (2024).

Na Hydro, o processo de extrusão, pode ser abastecido por tarugos confeccionados internamente, vazados na refusão, ou transferidos de outras plantas. O tarugo recebido já está de acordo com a composição química que caracteriza a liga que será extrudada, normatizada, porém em um comprimento superior ao limite de alimentação da prensa, passando por etapa de corte para adequação.

No entanto, devido à extrusão ser processo de conformação a quente, antes do corte, o tarugo é aquecido à temperatura de trabalho e mantido em forno até a hora do corte e abastecimento da prensa. Este processo de alimentação é automático e cronometrado, para que não haja perda de calor.

Analisando o processo no momento da troca de item a ser extrudado, para que o billet empurrado resulte no perfil desejado, é necessária a troca de ferramenta matriz. O alumínio, que possui boa condutividade térmica, se fosse pressionado contra uma ferramenta em temperatura ambiente, trocaria calor de forma eficiente sendo pressionado fora da temperatura de trabalho, fragilizando o produto, exigindo a aplicação de mais força do que o necessário, prejudicando a integridade da prensa e acelerando a quebra da matriz (MORO e AURAS, 2006).

Para evitar os problemas citados anteriormente, a matriz também é aquecida. O deslocamento da ferramenta entre o forno que está alocada até a boca da prensa

ocorre em processo controlado e cronometrado, para manutenção da temperatura planejada.

Após o deslocamento e posicionamento da matriz guiado pelos colaboradores da Hydro que operam a prensa, ela já se encontra apta para o recebimento do billet e realização da pressão. A extrudabilidade característica da série 3XXX (Zajac *et al.*, 1994) possibilita que o processo ocorra em grande velocidade e para guiar a saída da barra na velocidade desejada, a barra tem a sua ponta puxada.

Os perfis produzidos na Hydro atendem as tolerâncias dimensionais de acordo com a ISO NBR 2768 classe M. Como parte do processo para adequação de norma, após a extrusão dos perfis, antes de resfriar, são esticados para reduzir empenamento.

As barras extrudadas podem ser comercializadas com até 15m, mas para movimentação interna, não ultrapassam 6m de comprimento. Porém, após o processo de esticamento, lidam-se com perfis de até 40 metros. Para cumprir com essa padronização, os perfis são cortados após serem endireitados. Resultado do processo de esticamento.

Antes da expedição do lote produzido, ele deve ser liberado pelos colaboradores que trabalham no time de PCP (Planejamento e Controle de Processos) e logística. Sendo de responsabilidade do time de embalagem a conferência do volume total disponível para faturamento, que tende a não ser o mesmo que foi produzido, pois algumas barras podem ser descartadas nessa fase devido a avarias e não conformidades detectadas.

2.3 PROCESSO PRODUTIVO

Após o romaneio, as barras cortadas e embaladas são entregues para o galpão do *Fabrication*, onde obteremos a peça final. Para essa conclusão são realizadas cinco etapas de fabricação, corte, usinagem, rebarbação, calibração e desengraxe. as quatro primeiras etapas foram mantidas constantes durante o estudo, variando apenas o processo final de desengraxe.

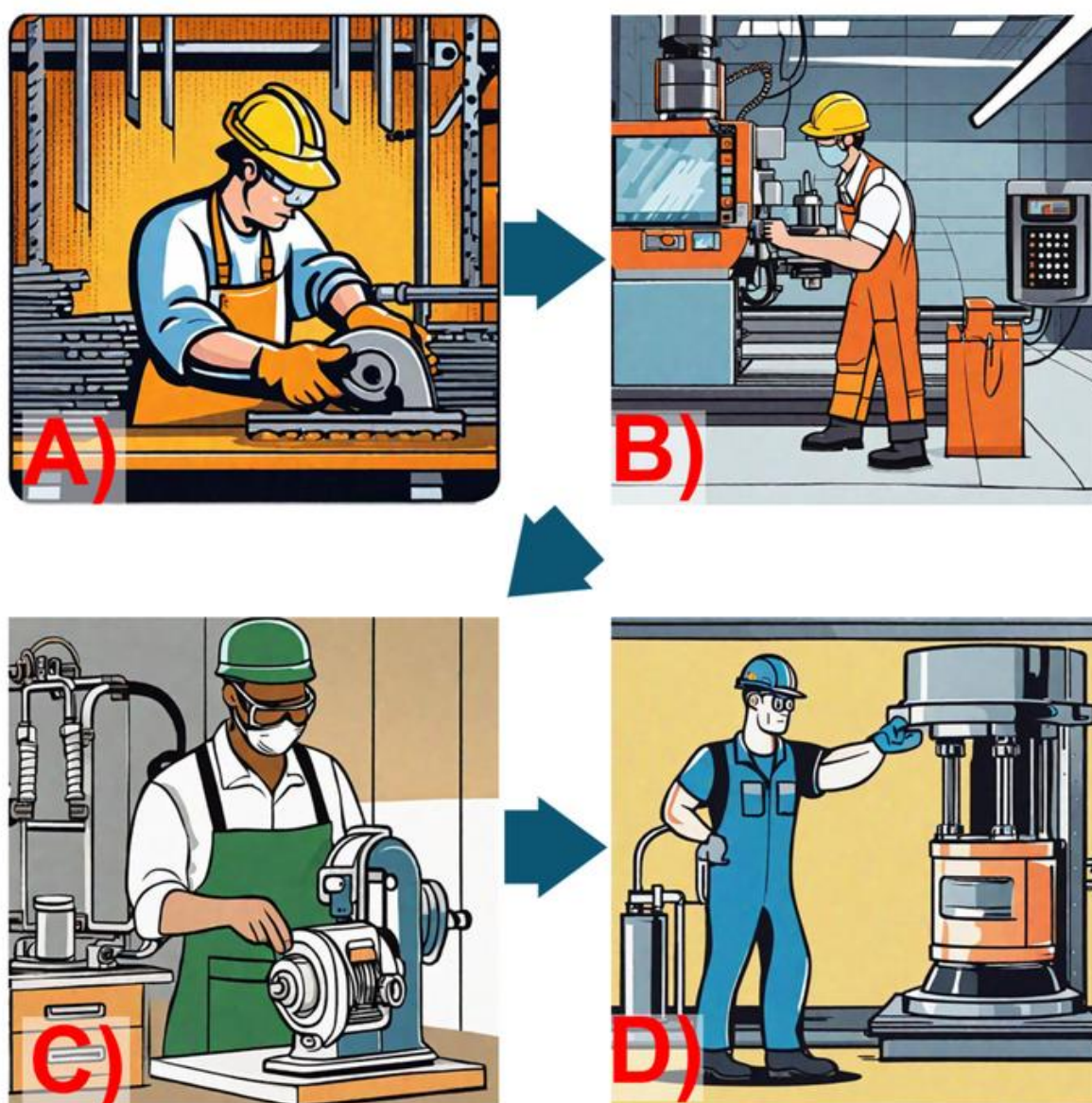
2.3.1 Preparação da Amostra

Para a transformação das barras recebidas da Extrusão Geral (EG) até a obtenção da peça para comercialização, serão percorridas algumas etapas de

processo. A fabricação do produto final ocorre em cinco estações distintas, sendo na última estação que ocorre o processo de desengraxe. A demonstração desses 5 processos será dividida em dois grupos. No primeiro grupo estarão contidas as 4 estações em que todas as amostras foram igualmente submetidas e no segundo grupo o processo de desengraxe, objeto de estudo.

Na figura 8 temos as estações do primeiro grupo. Sendo o processo de corte representado por (A), de usinagem por (B), de rebarbação por (C) e calibração por (D).

Figura 8 — Fluxograma representativo dos processos de fabricação



Fonte: Autoria Própria, com auxílio da inteligência artificial Runway (2023).

No processo de corte (A), realiza-se o corte das barras de 6 metros para obtenção das amostras no comprimento de acordo com o desenho do cliente. Esse corte é realizado com serra circular de avanço lateral. O processo posterior (B) é de usinagem e, para esse produto, o tempo de máquina é baixo.

Por solicitação do cliente, o produto não pode ser recebido com cantos-vivos ou rebarba e para evitar inspeção 100% foi adicionado o processo de rebarbação (C) em esmerilhadeira para 100% das peças, processo que seria realizado caso esses defeitos fossem encontrados.

O processo de calibração (D), única variação implementada após os testes da hipótese, com o intuito de eliminar a variável de dimensionamento. Como as tampas precisam ser cravadas com interferência, tubos com diâmetro interno na faixa mínima de tolerância poderiam contaminar os resultados.

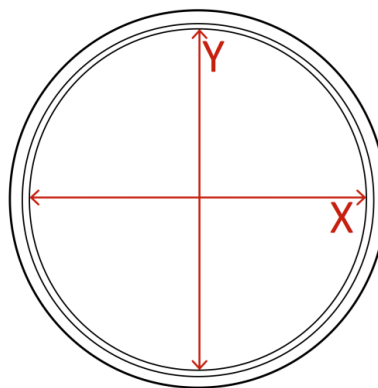
A escolha pela calibração 100% foi realizada após inspeção parcial das peças buscando ovalização do perfil ou outras dimensões fora da especificação. A outra opção seria a inspeção 100% e descarte das amostras não conformes.

2.3.1.1 Ovalização do perfil

Um perfil tubular é considerado oval quando a diferença entre suas dimensões máxima e mínima, medida em qualquer seção transversal, excede os valores tolerados (NBR 8116, 2023).

Por padronização, o controle dimensional realizado nas amostras foi realizado medindo o perfil nas direções X e Y indicadas na Figura 9.

Figura 9 — Medida de ovalização de perfil tubular



Fonte: Autoria Própria (2024).

Como todas as peças produzidas foram calibradas antes do desengraxe, as amostras não poderiam estar ovalizadas. No entanto, essa inspeção é realizada pelos operadores do calibrador para acompanhar a repetibilidade do processo.

2.3.2 Banho de Desengraxe

Sendo o objeto hipótese do estudo, o processo de desengraxe era inicialmente realizado na Hydro pela sucessão de etapas como demonstrado no Figura 10.

Observa-se em (A) que as peças, após processo de calibração, são posicionadas em cesto próprio para desengraxe com capacidade para 330 peças.

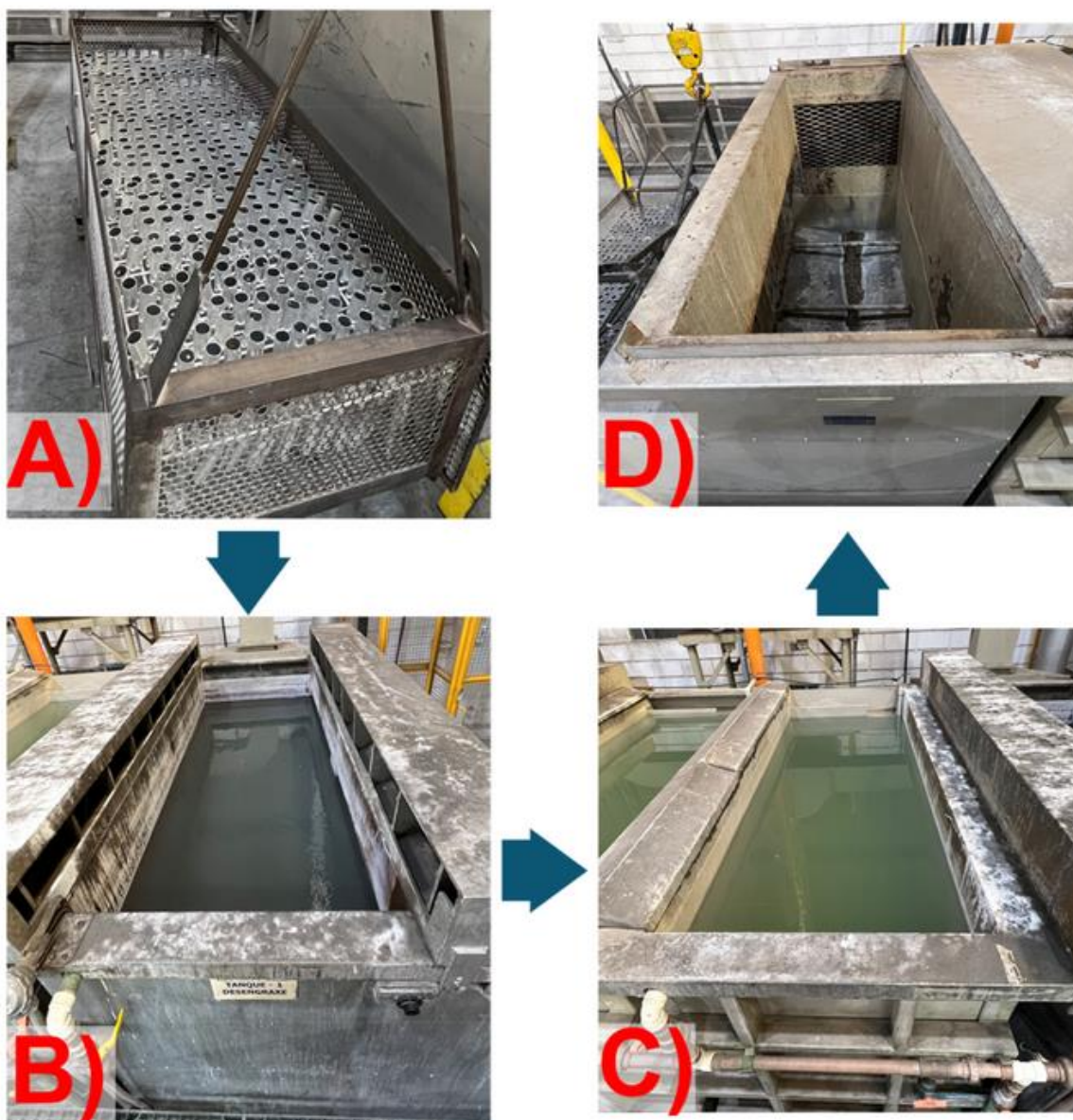
Esse cesto é içado, com ponte rolante, e posicionado acima do tanque de desengraxe (B) onde repousa por alguns minutos com a solução alcalina sendo agitada por turbilhonamento para facilitar a remoção de óleos residuais e cavacos e sujidades remanescentes dos processos anteriores¹.

Terminado o processo de desengraxe, o cesto é içado e transferido para o tanque de enxágue, em (C), para remoção da solução alcalina remanescente nos produtos, esse processo de enxágue também ocorria em turbilhonamento. Após essa etapa, o cesto é transferido para a estufa, em (D), para acelerar o processo de secagem das peças.

A proposta a ser analisada é a alteração do fluxo do processo de desengraxe original, substituindo a etapa de desengraxe em meio alcalino, por aumento no tempo de submersão no tanque de solução neutra, até então denominado, de enxágue.

¹A lavagem por turbilhonamento apresenta maior contato entre as peças e a água, aumentando a eficiência de limpeza. Esta técnica consiste na agitação do tanque de lavagem, seja por agitação mecânica ou manual, recirculação da solução por bomba ou insuflamento de ar (Pedro, 2010).

Figura 10 — Processo de desengraxe



Fonte: Autoria Própria (2023).

2.3.3 Cravamento de Tampa

Devido o fornecimento de peças acima da capacidade de aplicação de força instalada no cliente, motivo do início da investigação, por um o período as tampas foram cravadas na Hydro. Esse processo foi realizado utilizando prensa hidráulica vertical, com capacidade de aplicação de pressão instalada superior a qualquer valor anteriormente ensaiado.

Em seu processo, há uma limitação de carga de 250kgf disponível para cravamento, que não pode ser ultrapassada e que, por requisição do cliente, não deveria ser considerado como limite superior para força de cravamento.

Com o propósito de mensurar o valor mínimo requerido para cravamento e avançar com os estudos de adequação de processos na empresa e que foram cordialmente cedidos para a realização desse trabalho, o cravamento de tampa das amostras foi realizado em uma máquina universal de ensaio configurada para realizar ensaio de compressão.

2.4 ESTUDO DE CAPABILIDADE

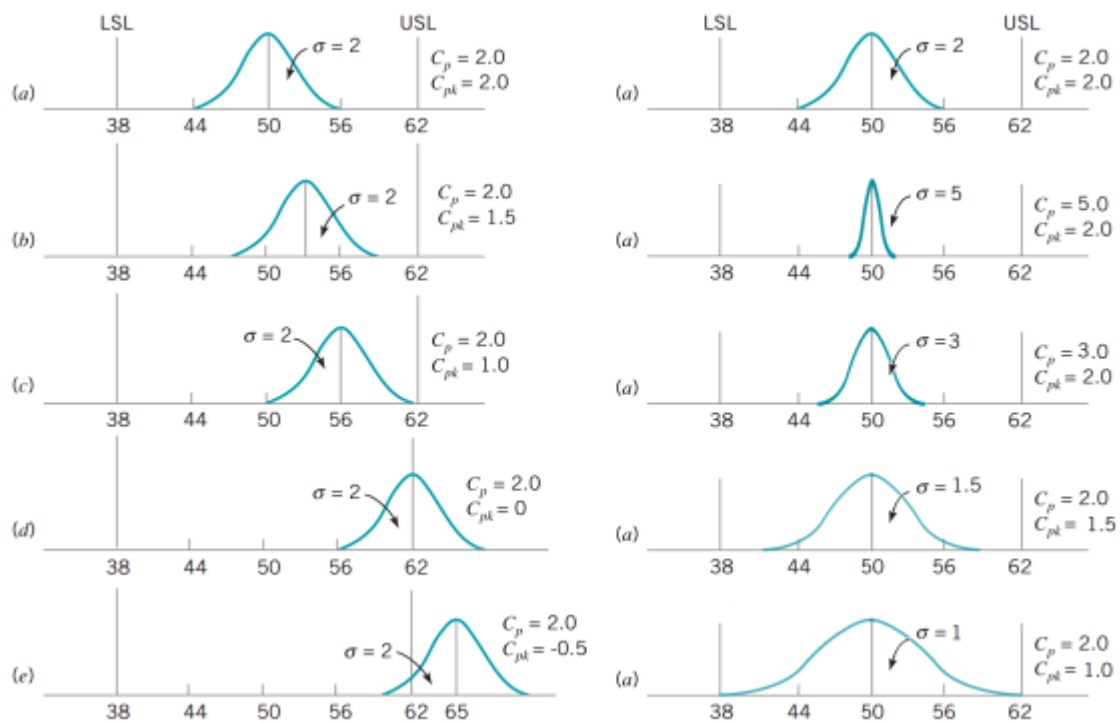
O estudo de capacidade acompanha os resultados obtidos durante a produção para interpretar a capacidade que o processo tem em ser replicável. O parâmetro inicialmente utilizado para essa análise é a razão de processo C_P utilizando os valores de dispersão de processo six-sigma (MONTGOMERY, 2009).

No entanto esse valor apenas avalia a dispersão, mas sem levar em consideração se o processo atende os valores de limite superior e inferior do processo, sendo considerado como o potencial de capacidade. Para o controle da capacidade real o parâmetro de razão utilizado é o C_{PK} , que determina a centralização entre os limites estabelecidos.

Esses parâmetros, quando analisados em conjunto, suportam a interpretação estatística dos resultados. Na Figura 11 se pode ver as variações esperadas no gráfico para cada um dos valores de C_p e de C_{pk}^2 .

²Os dados são representativos e não implicam em curvas gaussianas reais de C_p ou de C_{pk} .

Figura 11 — Demonstrativo gráfico para a diferença entre C_p e C_{pk} .



Fonte: Adaptado de (MONTGOMERY, 2015).

3 MATERIAIS E METODOS

Para a realização desse trabalho foram utilizadas as instalações e equipamentos disponíveis na empresa Hydro Alumínio. Que, prezando pela segurança dos colaboradores, tem regras e regulamentações para utilização e operação de seus dispositivos. Portanto, a operação dos processos industriais e laboratoriais foram realizadas pelos funcionários e responsáveis pelos respectivos equipamentos.

3.1 AMOSTRAS

As amostras utilizadas para a realização da pesquisa estão divididas em dois diferentes grupos, sendo eles os corpos filtros e as tampas para cravamento. Tendo o processo de cravamento sido realizado pela máquina universal de ensaios.

3.1.1 Tubos

Seguindo o padrão de processo produtivo apresentado na seção 2.3.1, todas as peças são calibradas para a dimensão $D+0,5\text{mm}$ e posteriormente levadas para o processo de desengraxe.

Para as primeiras 90 amostras obtidas, o processo de desengraxe ocorreu por submersão na solução alcalina e com posterior enxágue em água. As últimas 90 amostras, colhidas após variação do processo, foram obtidas sendo submetidas apenas ao banho de desengraxe. No entanto, ocorreu aumento do tempo de submersão no banho em água para garantir a remoção de cavacos e assegurar a remoção de óleos residuais, ambos os processos em turbilhonamento.

Após desengraxadas e secas, o cesto retirado da estufa é deixado em repouso para que as peças resfriem podendo ser manuseadas sem perigo aos operadores. Durante este período que uma amostra é aleatoriamente selecionada para ser cravada. O valor obtido nesta amostra representa todo o lote.

Cada cesto é composto por 330 tubos e foram testadas 180 amostras durante a confecção deste trabalho. Portanto, o espaço amostral do trabalho corresponde a 59400 peças confeccionadas.

O processo de coleta das amostras aconteceu no decorrer de 101 dias corridos, não necessariamente consecutivos, e confeccionadas nos três turnos de operação da Hydro. Todos os processos de operação possuem ficha de processo e todas as

amostras confeccionadas e ensaiadas foram produzidas da mesma maneira, além do processo de desengraxe.

3.1.1.1 Medição manual

Em todas as etapas do processo produtivo, o controle dimensional para liberação dos lotes é realizado por medição manual via paquímetro digital, Figura 12.

Figura 12 — Paquímetro digital – Mitutoyo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Os momentos de medição para inspeção dimensional são, na saída das barras extrudadas, na serra de corte do perfil, dimensão demonstrada acima, no processo de usinagem e após a calibração. Esses dados são coletados pelos operadores e acompanhados pelo time de engenharia de processos, mas não serão apresentados no presente trabalho.

3.1.2 Tampas

As tampas são entregues pelo cliente para cravamento e não possuímos acesso a seu processo de fabricação e nem ao controle de processo. No entanto, durante um período, todas as tampas passaram por inspeção. Todos os exemplares analisados estavam em conformidade com as especificações de desenho. Logo as tampas não foram consideradas variáveis de processo, não interferindo nos resultados. Portanto não serão apresentados os dados no trabalho.

Na Figura 13 temos uma fotografia com o modelo de tampa utilizado no processo de cravamento. No processo as tampas são inseridas por interferência ocupando a região interior do tubo e mantendo a sua posição pela interferência. Na

foto, a tampa da esquerda está nova, foi fotografada antes de ser utilizada no processo de cravamento, ao lado de uma tampa que foi cravada.

Figura 13— Tampas utilizadas para cravamento por interferência



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na tampa que foi utilizada pode se perceber riscos longitudinais na direção do cravamento. A região externa das tampas é revestida com uma camada de material depositado, onde estão os riscos, que será utilizada para processo de solda por brasagem em processo posterior, no cliente.

3.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os ensaios de cravamento foram realizados utilizando a máquina universal de ensaio de tração da Hydro, mostrada na Figura 14, cujas características de trabalho são: capacidade de 100kN, velocidade máxima de 800mm/min e 1255mm de espaço vertical de teste.

Figura 14 — Máquina Universal de Ensaio - AGS-100kNX.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na Figura 15, podemos observar, em destaque, o painel de controle computadorizado que integra a máquina universal de ensaios.

Figura 15 — Painel digital máquina universal de ensaio.

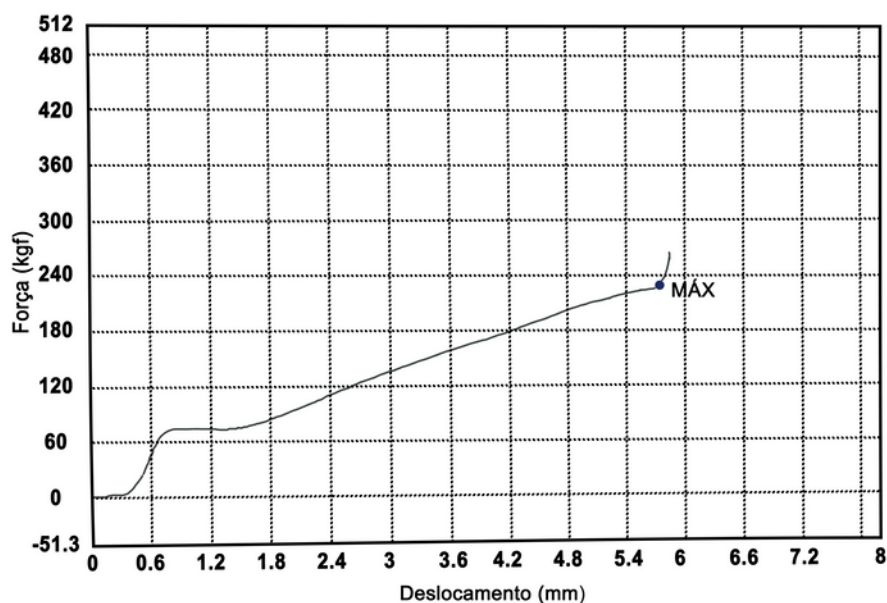


Fonte: Autoria Própria (2024).

O software de controle gera gráficos como o disponível na Figura 14. Esses gráficos eram gerados em tempo real e possíveis de ser acompanhados pelo display acoplado na máquina.

Das informações disponíveis, temos a força de compressão exercida para realizar o cravamento, em kgf, indicada no eixo das coordenadas; o deslocamento vertical realizado pelo prato da máquina, no eixo das abscissas, e a curva foi construída pela progressão de força exercida por milímetro deslocado, estando a máquina configurada para percorrer 4mm/min.

Figura 14 — Gráfico gerado pelo software de controle.



Fonte: Autoria Própria (2024).

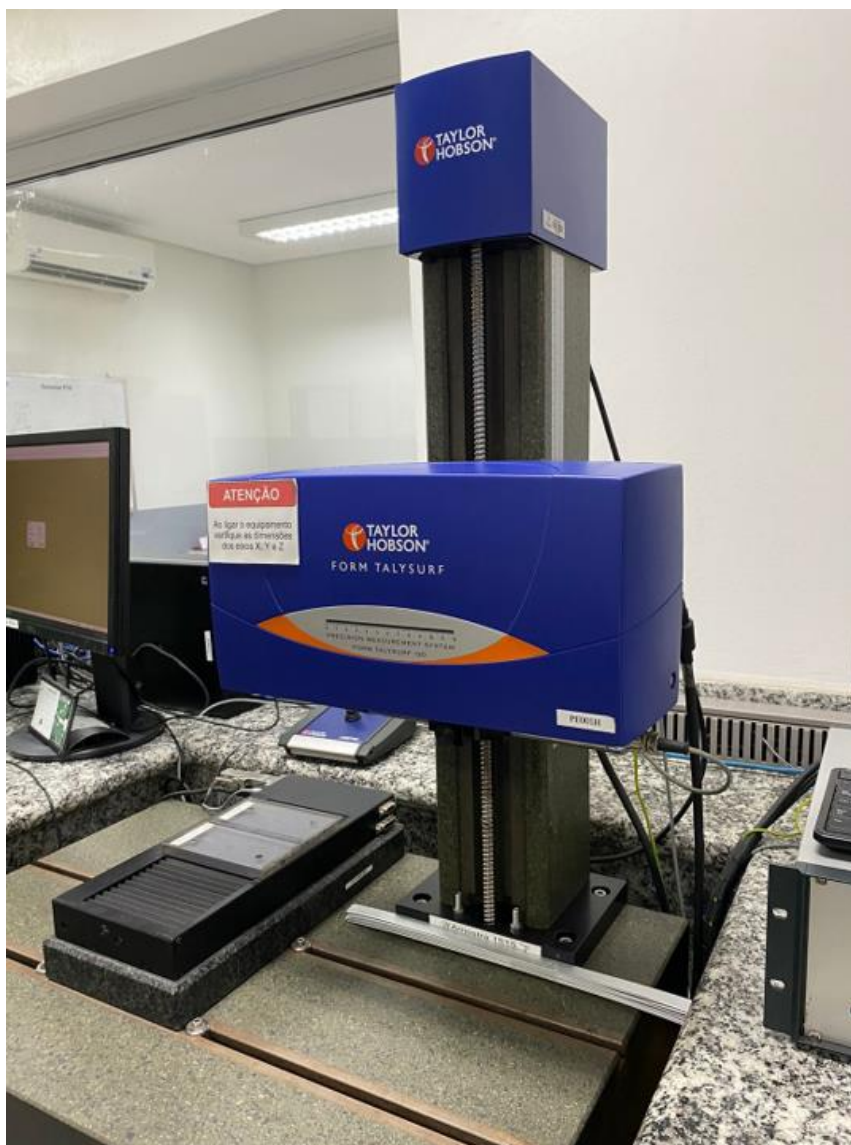
O ensaio era interrompido manualmente sempre que a curva mudava a sua inclinação, indicando que a tampa já estava cravada e que o processo de compressão agora ocorreria diretamente no tubo. O ponto "MÁX" foi adicionado manualmente no ponto de inflexão.

Os resultados da força de cravamento para cada uma das amostras ensaiadas, nas duas condições estudadas, será apresentado mais à frente.

3.3 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Os ensaios de rugosidade foram realizados no rugosímetro da Hydro mostrado na Figura 17.

Figura 17— Rugosímetro - Taylor Hobson Form Talysurf® CNC Series.



Fonte: Raiane Herrera (2023).

Durante o ensaio, o rugosímetro coleta diversos dados apresentando-os na forma dos parâmetros³ abaixo:

Desvio da média aritmética - Ra: Representa a média aritmética da ordenada absoluta Z (x) dentro do comprimento de amostragem.

³As informações descritas abaixo estão disponíveis no site da EVIDENT - soluções em microscopia, de onde foram consultadas.

Altura total - R_t : Representa a soma da altura máxima do pico (Z_p) e a profundidade máxima do vale (Z_v) de um perfil dentro do comprimento da avaliação e não do comprimento de amostragem.

Altura máxima - R_z : Representa a soma da altura máxima do pico (Z_p) e a profundidade máxima do vale (Z_v) de um perfil dentro do comprimento de referência

Altura máxima do pico do perfil - R_p : Representa a altura máxima do pico (Z_p) de um perfil dentro do comprimento de amostragem.

Profundidade máxima do vale do perfil - R_v : Representa a altura máxima do pico (Z_p) de um perfil dentro do comprimento de amostragem.

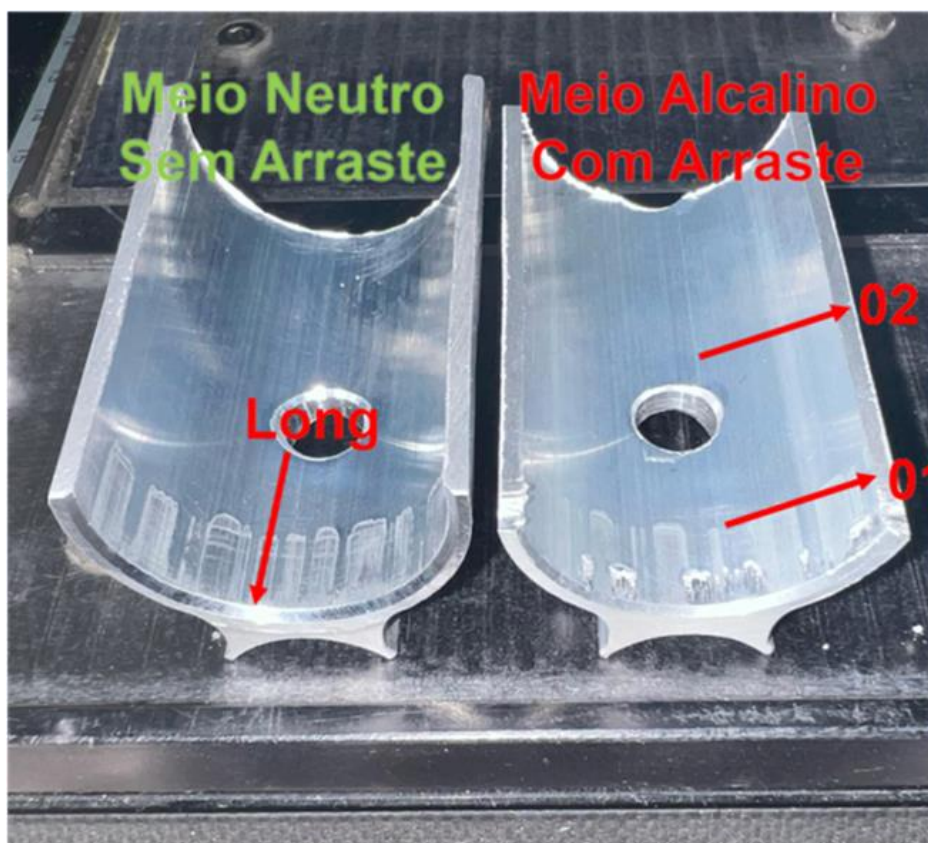
Mais à frente neste trabalho serão comparados apenas os valores R_a , R_t e R_z para a rugosidade das amostras.

Na Figura 16 temos a apresentação das amostras que foram analisadas e a delimitação das regiões avaliadas pelo rugosímetro. A amostra à esquerda foi retirada do grupo de amostras desengraxadas apenas em água, enquanto a da direita foi retirada do grupo desengraxado em meio alcalino.

As amostras foram ensaiadas após o processo de cravamento. Para a obtenção das amostras, as tampas cravadas foram removidas e os tubos foram cortados na direção Y, Figura 9, para possibilitar o acesso da ponta do rugosímetro.

Para a análise foram estabelecidas três regiões de ensaio. Essas regiões estão identificadas na figura 18, sendo a região "01" contendo a área que foi calibrada, na região "02" foi ensaiado uma região que não foi atacada pelo calibrador e a região "Long" refere-se ao avanço longitudinal da ponta do rugosímetro ensaiando a amostra no sentido contrário à entrada do calibrador e do cravamento da tampa.

Figura 18 — Amostras ensaiadas - regiões de interesse.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na Figura 19 vê-se o deslocamento da ponta do rugosímetro durante o ensaio de rugosidade realizado.

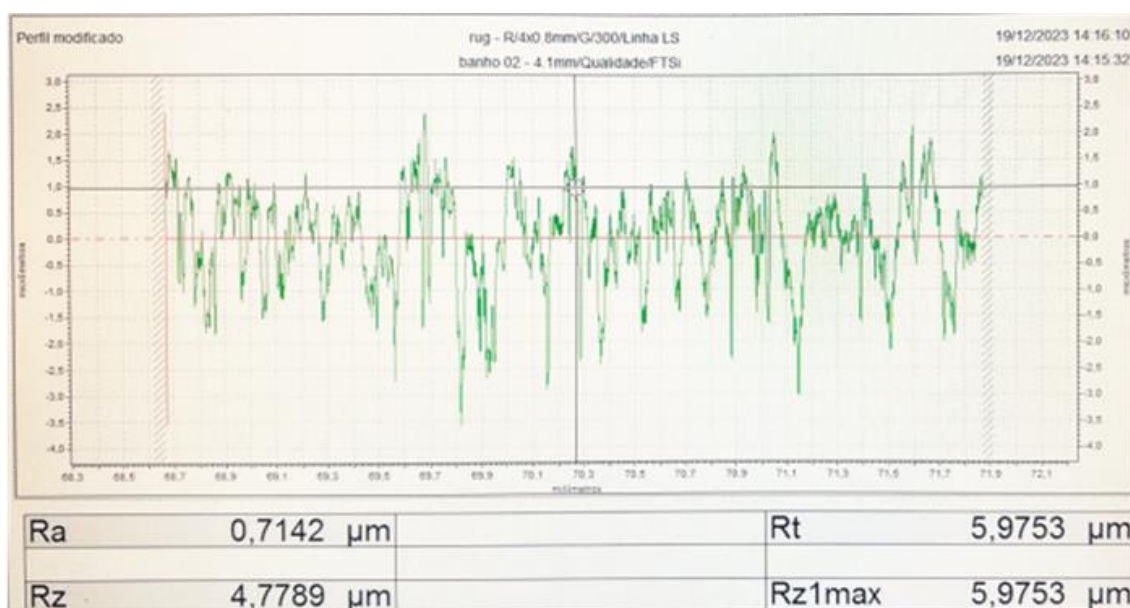
Figura 19 — Amostra sendo ensaiada.



Fonte: Autoria Própria (2024).

O gráfico gerado pelo software nativo ao rugosímetro está indicado na Figura 20, no eixo das coordenadas temos os valores em μm , representando os picos e valas detectados pela ponta do aparelho. No eixo das abscissas temos os valores em mm, representando o deslocamento realizado pela ponta do rugosímetro.

Figura 20 — Dados do ensaio de rugosidade.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Os parâmetros selecionados pela Hydro para fazer os acompanhamentos de rugosidade dos perfis são Ra, Rt, Rz e Rz1max. Neste estudo apenas o último não será interpretado.

3.4 ESTUDO DE CAPABILIDADE

Os dados foram obtidos e analisados seguindo o conceito de melhoria contínua em conjunto com as ferramentas da qualidade apresentadas durante as disciplinas frequentadas no decorrer da graduação.

Sendo a capacidade do processo a habilidade de se gerar produtos dentro da faixa de especificação definida pela empresa ou cliente (Coutinho, 2020).

As ferramentas que foram utilizadas são:

3.4.1 Controle Estatístico de Processos (CEP)

O controle estatístico do processo (CEP) compreende um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas no monitoramento sistemático dos processos produtivos, a fim de contribuir para a fabricação de produtos ou serviços que atendam aos requisitos dos clientes (CASTAGLIOLA et al., 2008 apud (Mazocco et al., 2014).

3.4.2 Histograma de Capabilidade

O histograma é construído alocando no eixo das abscissas os valores obtidos pela medição, no presente trabalho sendo a força mínima requerida para cravamento medida em kgf, e no eixo das coordenadas é feita a contagem das amostras por faixa de medição. O gráfico mais comum da distribuição de uma variável quantitativa é o histograma (Moore; Notz; Fligner, 2005).

3.4.3 Índices de Capabilidade

São quatro os índices de capabilidade: (Coutinho, 2020).

Capabilidade do processo (Cp), mede a capacidade de maneira simples, para processos centrados, determinando o potencial do processo; Cps, diferença do centro da distribuição e a especificação superior; Cpi, diferença do centro da distribuição e a especificação inferior; Cpk, mede a capacidade de processos que não estão centrados. Na indústria, geralmente o valor exigido para Cp e Cpk é $\geq 1,33$.

Sendo a centralização definida a partir da instituição dos valores de limite inferior LIE e limite superior LSE, referentes a faixa de especificação dada pela empresa ou pelo cliente.

Para este trabalho, o limite a ser controlado é o superior LSE e foi definida a força máxima para cravamento de 150kgf.

3.4.4 Carta Xbarra-S

No caso em que as características da qualidade em estudo referem-se a um tipo de dado contínuo (com variação ao longo do tempo) coletado em subgrupos (amostra do processo para gerar um ponto no gráfico), tradicionalmente, o gráfico é escolhido (MONTGOMERY, 1992; MONTGOMERY, 2004 apud. (Mazocco *et al.*, 2014)). Um dos motivos pela escolha desse tipo de gráfico é o fato de que os subgrupos permitem uma estimativa precisa de variabilidade "local" de modo a captar somente os efeitos decorrentes de causas aleatórias dentro de cada subgrupo, e detectar diferenças entre subgrupos. A eficácia do CEP é afetada por julgamentos errôneos sobre o real estado do processo, e cabe aos instrumentos estatísticos mitigar esses erros. (Mazocco *et al.*, 2014).

Para a confecção dessas cartas, o software MINITAB monta a dispersão para uma faixa de nove a 25 amostras, podendo a análise ser individual ou em conjuntos, para maiores grupos amostrais. Utiliza-se esta carta de controle para monitorar a estabilidade do processo ao longo do tempo para que seja possível identificar e corrigir as instabilidades em um processo (MINITAB®).

Caso as amostras não estejam naturalmente dispostas em grupos, como no caso deste estudo, é possível indicar um fator para agrupamento, para divisão uniforme das amostras dentro dos grupos. Sendo o espaço amostral de 90 peças, o fator escolhido foi nove, para que o cálculo de dispersão ser efetuado para 10 grupos.

3.4.5 MINITAB®

Os dados referentes aos parâmetros introduzidos nos itens anteriores foram calculados e interpretados pelo software MINITAB®, assim como a construção dos gráficos e figuras.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

No Tabela 4, estão todos os resultados obtidos, para as 180 amostras analisadas, divididas nos grupos que elas representam. Sendo da primeira amostra à nonagésima a força de cravamento para as amostras desengraxadas em meio alcalino e da nonagésima primeira à centésima octogésima, as amostras desengraxadas em meio neutro, água.

Tabela 4 — Força mínima requerida para cravamento de tampa em kgf.

Força mínima requerida para cravamento de tampa (kgf)											
Banho de desengraze Alcalino						Banho de desengraze em Água					
1	130.00	31	95.70	61	124.01	91	97.55	121	65.22	151	122.34
2	137.00	32	139.13	62	160.49	92	121.73	122	94.95	152	150.90
3	120.90	33	107.20	63	253.08	93	141.93	123	77.25	153	79.74
4	200.59	34	160.76	64	76.99	94	89.42	124	101.56	154	106.15
5	130.94	35	109.20	65	140.87	95	74.31	125	71.90	155	61.21
6	164.82	36	154.25	66	88.18	96	74.99	126	92.84	156	64.41
7	167.14	37	163.40	67	89.26	97	94.75	127	68.14	157	124.43
8	210.33	38	115.70	68	66.42	98	177.38	128	82.98	158	13.20
9	121.11	39	115.44	69	172.56	99	66.92	129	65.82	159	90.50
10	134.40	40	62.28	70	86.50	100	157.20	130	123.24	160	60.11
11	143.00	41	55.95	71	72.73	101	61.34	131	87.12	161	109.35
12	174.00	42	72.54	72	133.90	102	130.88	132	110.08	162	120.29
13	230.00	43	83.25	73	165.70	103	107.23	133	79.03	163	78.35
14	60.00	44	178.50	74	231.00	104	88.96	134	65.54	164	86.82
15	198.00	45	50.25	75	185.00	105	122.52	135	128.82	165	83.46
16	131.04	46	111.76	76	232.00	106	67.28	136	79.45	166	143.40
17	147.00	47	108.78	77	133.95	107	60.99	137	64.40	167	114.90
18	188.00	48	50.55	78	211.51	108	71.23	138	128.56	168	100.94
19	128.00	49	201.15	79	194.01	109	119.11	139	76.31	169	59.70
20	180.00	50	57.74	80	210.60	110	76.47	140	68.08	170	54.46
21	165.00	51	240.00	81	54.98	111	117.12	141	101.79	171	54.46
22	176.00	52	69.11	82	128.33	112	63.35	142	73.25	172	135.13
23	188.00	53	54.98	83	128.11	113	57.96	143	89.33	173	146.36
24	230.19	54	44.97	84	61.53	114	118.83	144	100.57	174	60.40
25	261.75	55	60.44	85	93.85	115	113.55	145	41.64	175	54.24
26	216.26	56	174.58	86	46.25	116	91.38	146	129.67	176	120.05
27	147.61	57	61.99	87	80.48	117	54.64	147	90.99	177	85.55
28	175.28	58	58.27	88	67.90	118	136.24	148	63.31	178	41.73
29	112.52	59	93.48	89	42.35	119	72.14	149	133.06	179	71.94
30	172.00	60	112.39	90	70.57	120	95.60	150	71.26	180	102.66

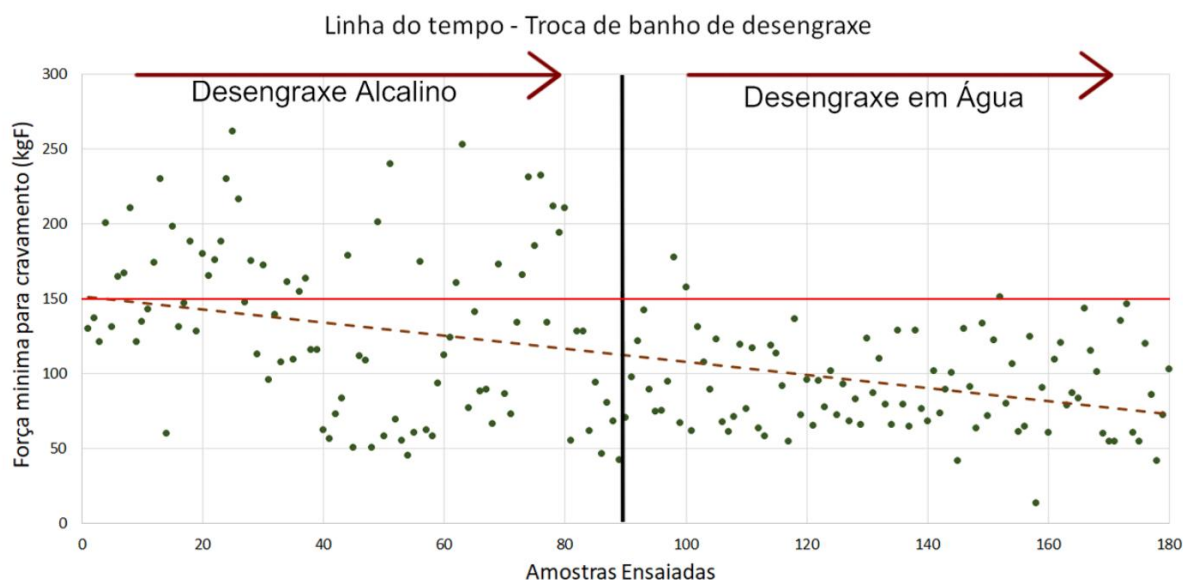
Fonte: Autoria Própria (2024).

As amostras ensaiadas foram segregadas e identificadas para ensaio de cravamento que funcionaria como liberação do processo de produção. As amostras retiradas aleatoriamente serviam como espaço amostral para o lote de peças desengraxadas naquele ciclo, representando 330 peças. Portanto, as peças estão organizadas de forma cronológica.

Para melhor interpretação dos dados, respeitando a cronologia da coleta, construiu-se o gráfico disponível na Figura 21, dispondo os valores de “Força mínima

para cravamento (kgf)” obtidos durante os ensaios e a sequência que as “Amostras ensaiadas” foram obtidas.

Figura 21 — Progressão da força mínima de cravamento requerida antes e após a troca processo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

No gráfico, reforçou a separação entre as amostras desengraxadas em meio alcalino e em meio neutro e, horizontalmente na imagem, está assinalada a linha de 150kgf, valor estabelecido entre a Hydro e o Cliente como alvo e limite superior para a força de cravamento.

4.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Do ensaio de rugosidade foram extraídos os dados obtidos para cada uma das regiões analisadas e compilados na Tabela 5. Sendo as linhas da tabela os inputs para cada uma das regiões analisadas e as colunas os valores por parâmetro⁵.

⁵A forma como os dados são apresentados consta na Figura 12.

Tabela 5 — Resultado dos ensaios de rugosidade agrupado por parâmetro.

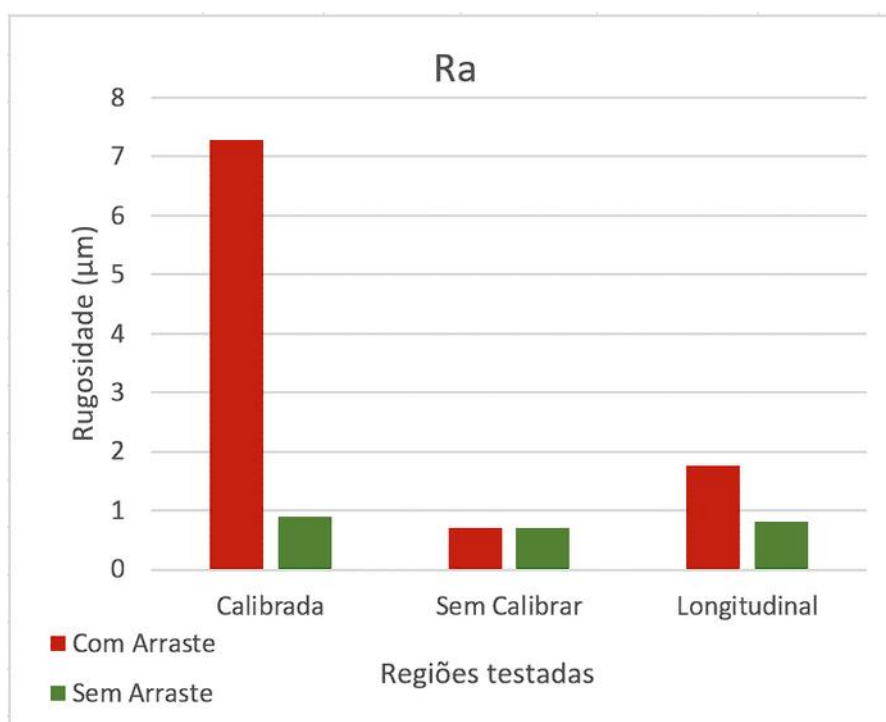
	Banho Alcalino (Com arraste)			Banho em Água (Sem arraste)		
	Ra	Rz	Rt	Ra	Rz	Rt
Calibrada	7.2814	37.8609	50.4375	0.9034	7.4391	9.5606
Sem calibrar	0.7142	4.7789	5.9753	0.7155	4.5026	6.2136
Longitudinal	1.7632	7.7947	58.9112	0.8189	4.9044	14.9096

Fonte: Autoria Própria (2024).

Para melhor visualização dos dados quando comparados entre amostras e possibilitando uma interpretação mais clara foram construídos gráficos em barras para emparelhar os valores de cada uma das regiões isoladas por parâmetro.

Sendo o Figura 22 para os valores do parâmetro Ra

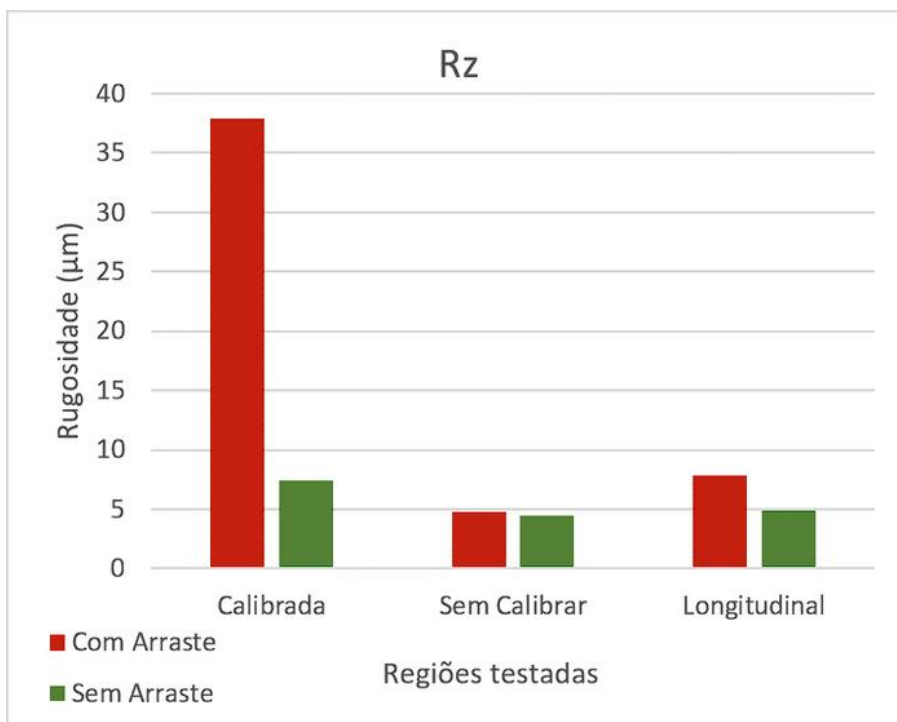
Figura 22 — Dados de rugosidade Ra comutados.



Fonte: Autoria Própria (2024).

O Figura 23 para os valores do parâmetro Rz.

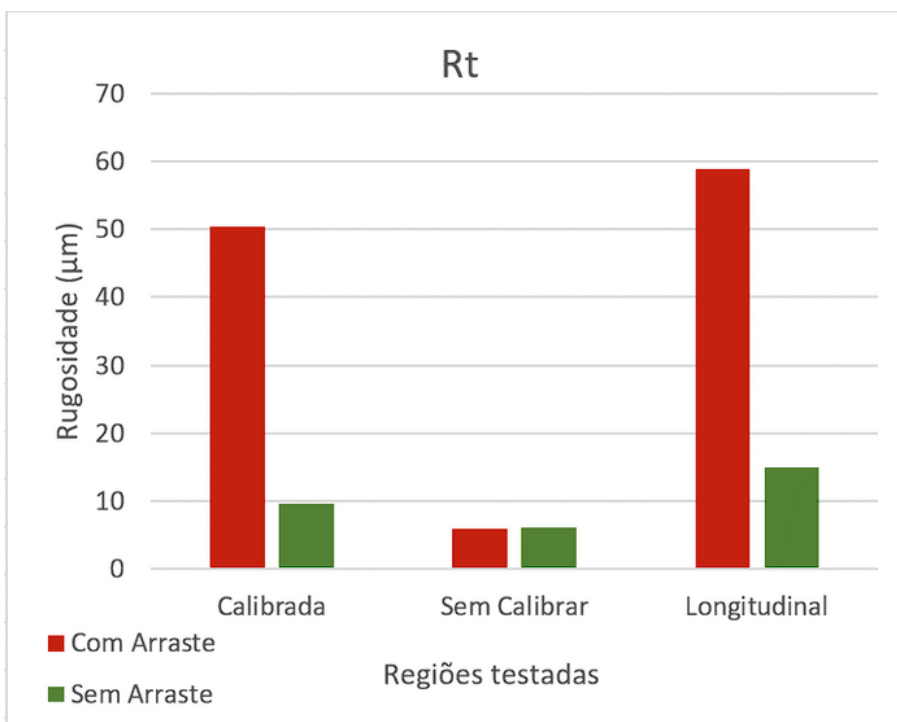
Figura 23 — Dados de rugosidade Rz comutados.



Fonte: Autoria Própria (2024).

E o Figura 24 para os valores do parâmetro Rt.

Figura 24 — Dados de rugosidade Rt comutados.



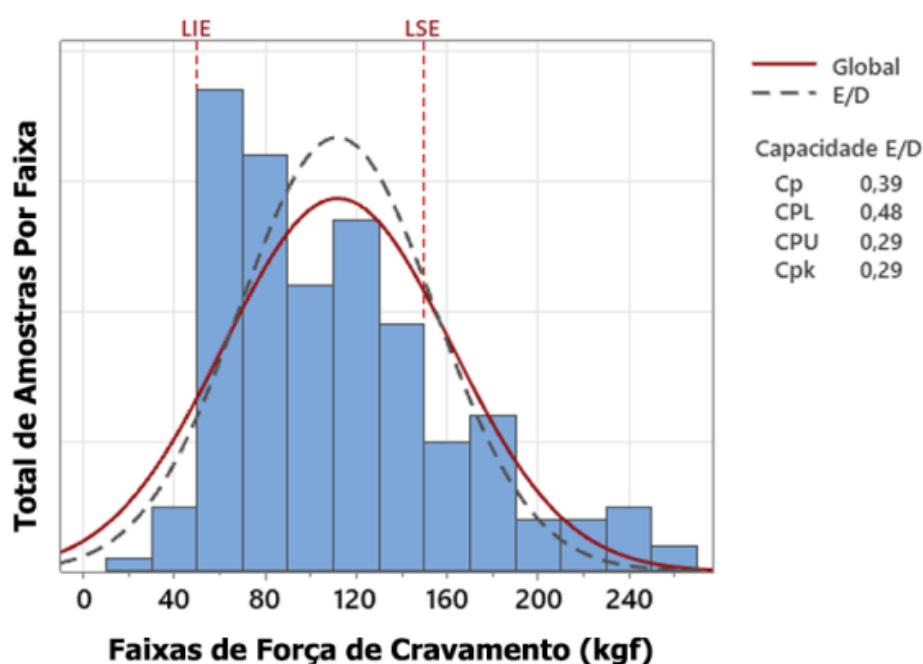
Fonte: Autoria Própria (2024).

4.3 ESTUDO DE CAPABILIDADE

Os dados coletados durante os ensaios de compressão foram inseridos no software MINITAB® para confecção dos estudos de capacidade, seção 3.4, gerando os relatórios de capacidade abaixo.

Na Figura 25, vemos o relatório gerado utilizando todos os resultados obtidos pelos ensaios de compressão

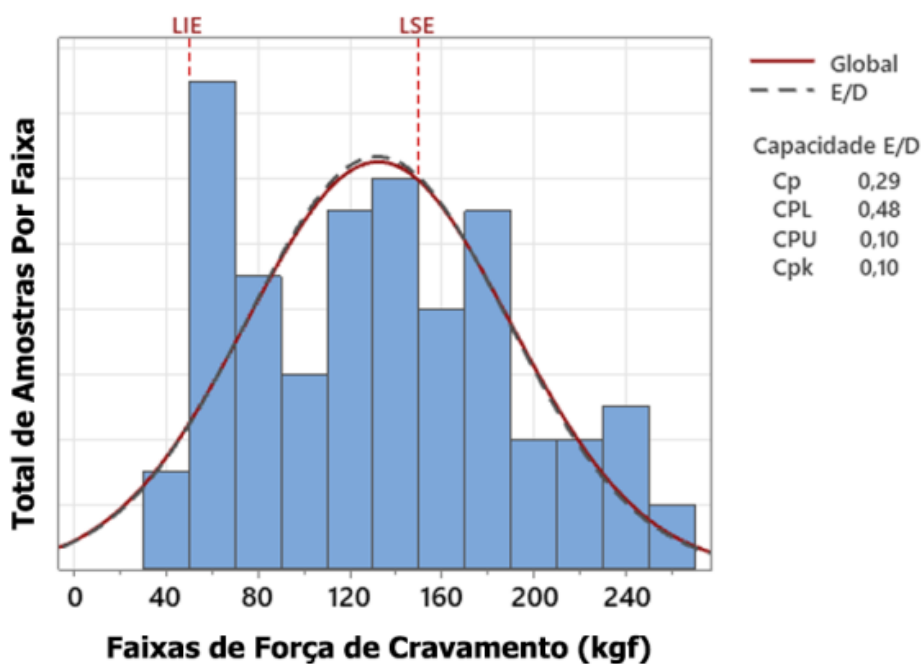
Figura 25 — Relatório de Capacidade para todas as amostras.



Fonte: Autoria Própria (2024) obtido utilizando o software MINITAB®.

Na Figura 26, vemos o relatório gerado utilizando os resultados obtidos pelos ensaios de compressão das amostras desengraxadas em solução alcalina.

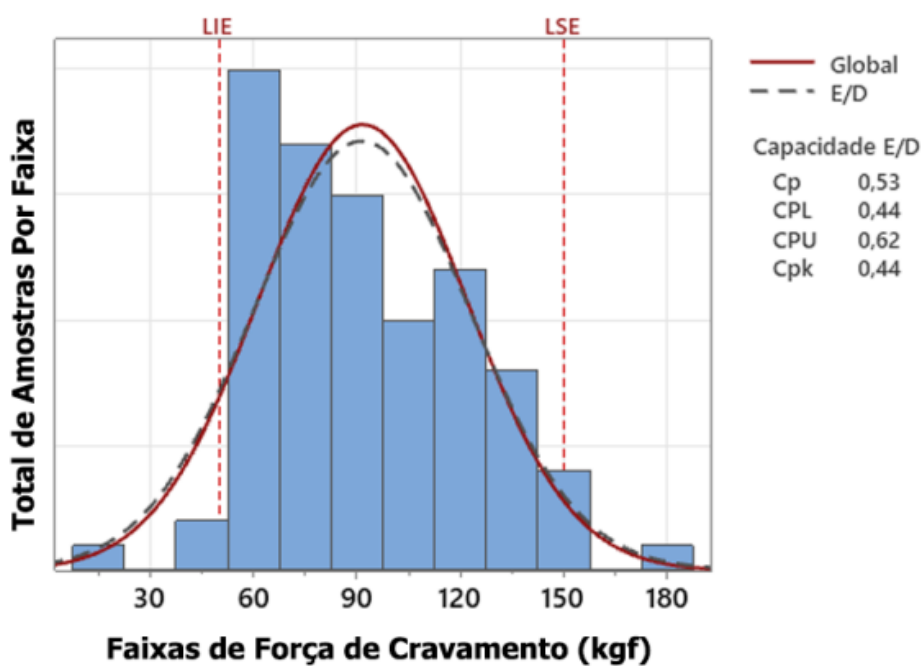
Figura 26 — Relatório de Capabilidade para as amostras desengraxadas em solução alcalina.



Fonte: Autoria Própria (2024) obtido utilizando o software MINITAB®.

Na Figura 27, vemos o relatório gerado utilizando os resultados obtidos pelos ensaios de compressão das amostras desengraxadas em água, solução neutra.

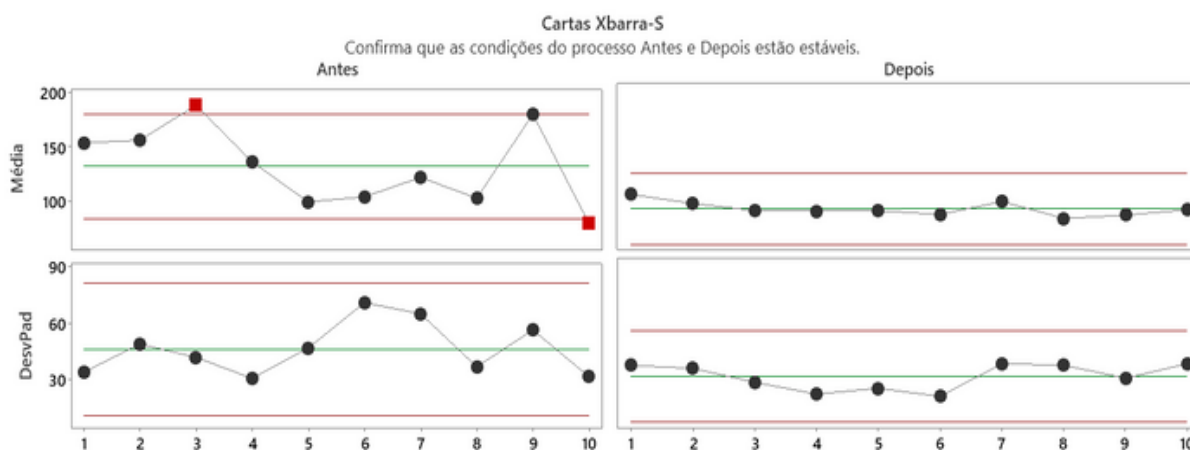
Figura 27 — Relatório de Capabilidade para as amostras desengraxadas em meio neutro.



Fonte: Autoria Própria (2024) obtido utilizando o software MINITAB®.

Na Figura 28, temos a construção das cartas X-barraS para comparar a dispersão de força de cravamento entre as amostras obtidas antes e após a alteração do tipo de banho de desengraxe.

Figura 28 — Carta X-barraS - Comparação dos processos Antes/Depois.



Fonte: Autoria Própria (2024) obtido utilizando o software MINITAB®.

Os valores calculados pelo software para cada uma das quartas cartas apresentadas acima foram:

Carta X-Barra (Média)

Antes: média 132,3kgf com LSC, limite superior calculado, de 180,0kgf e LIC, limite inferior calculado, de 84,6kgf, resultando em uma amplitude de 47,7 pontos;

Depois: média 91,63kgf com LSC de 123,24kgf e LIC de 60,01kgf, resultando em uma amplitude de 31.61 pontos.

Carta S (Desvio Padrão)

Antes: Desvio Padrão 46,27 com LSC de 81,47 e LIC de 11,06, resultando em uma amplitude de 35,2 pontos;

Depois: Desvio Padrão 30,64 com LSC de 53,95 e LIC de 7,33, resultando em uma amplitude de 23,31 pontos.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Os Figura 22, Figura 23 e Figura 24 foram construídos para comutar os dados e poder comparar as regiões ensaiadas a partir dos parâmetros que são avaliados na Hydro nos acompanhamentos de rugosidade para as demais peças produzidas.

A forma como a superfície ensaiada é plotada na forma de gráfico foi considerada de difícil comparação, pois não foi possível implementar um padrão de curso para o deslocamento da ponta do rugosímetro e considerando que uma das regiões ensaiadas, longitudinal, está perpendicular as demais, sem calibrar e com calibração.

Portanto, a escolha por analisar por parâmetro e com a construção de gráficos de barra induziu apenas para a comparação numérica.

Os valores obtidos para o parâmetro Ra são mais estáveis, por não serem afetados por arranhões (Evident), essa afirmação pode ser constatada analisando o resultado numérico para o ensaio longitudinal da peça que obteve arraste. O pico resultante do material acumulado durante o cravamento, detectado pelo parâmetro Rt, no Figura 24, foi absorvido na construção da média aritmética.

Os ensaios realizados na região "sem calibrar" apresentaram homogeneidade dos resultados entre as amostras, para os três parâmetros fornecidos pelo rugosímetro.

Este trabalho não cobriu a investigação do porquê o arraste de material ocorre durante o cravamento. Mas foi identificado que as peças que apresentaram maior força mínima para cravamento tinham essa similaridade. Durante o estudo encontrou-se amostras sem arraste com alta força requerida para cravamento, mas nenhuma amostra com arraste e baixa força requerida.

5.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO E ESTUDO DE CAPABILIDADE

5.2.1 **Compilamento Gráfico**

Da interpretação da Figura 21 foi possível visualizar o controle da dispersão amostral quando comparamos o grupo de amostras antes e depois da melhoria. Para

validar essa visualização gráfica foi realizado o estudo estatístico de onde foram extraídas as Figura 25 à Figura 28.

Na Tabela 6, observa-se que 34 amostras, 38%, estavam fora do especificado, pelo LSE, e que após a melhoria somente três amostras, 3%, ficaram acima desse limite. Vale destacar que, das 34 amostras, duas estavam acima do limite 250kgf, esses dois lotes foram reprovados. Das amostras desengraxadas em água não houve nenhum lote reprovado.

Na Tabela 6 abaixo, as amostras estão divididas por quantidade dentro e fora dos limites LSE e LIE definidos pela Hydro, os valores obtidos estão comparados por porcentagem.

Tabela 6 — Amostras dentro e fora das regiões de LSE e LIE.

Antes do tratamento			Depois do tratamento		
90	dados	100%	90	dados	100%
53	dentro	59%	84	dentro	93%
34	acima	38%	3	acima	3%
3	abaixo	3%	3	abaixo	3%

Fonte: Autoria Própria (2024).

5.2.2 Relatórios de Capabilidade

5.2.2.1 Histograma de capabilidade

Tendo limite superior sido acordado entre a Hydro e o cliente (150kgf) e a limitação inferior, para essa aplicação, não trazendo interferência negativa. Definiu-se o valor de 50kgf para esse parâmetro a partir da avaliação visual da Figura 21.

Analisando o histograma para as amostras desengraxadas em banho alcalino nota-se um platô, que ocorre quando suas barras têm praticamente as mesmas alturas. Isto ocorre quando existem várias distribuições juntas com médias diferentes (Siqueira, 2023).

Para a segunda condição, o histograma já se encontra deslocado para a direita, com uma maior concentração de peças conformes, Tabela 6, quando comparado com a condição inicial.

Quando analisados os valores de Cp para ambas as condições, houve um ganho de 83% refletindo na melhoria e na estabilidade do processo. No entanto, comparando esse valor com os 1,33 pontos de Cp comumente praticados na indústria (Coutinho, 2020), o processo ainda está 151% distante.

5.2.2.2 Carta Xbarra e Carta S

Na Figura 28 temos as cartas alinhadas e em mesma escala, para facilitar a comparação dos resultados analisados pelo MINITAB®.

Para a Carta XBarra, duas figuras superiores, nota-se uma redução no valor da média para o conjunto de amostras, um ganho de -30,74%. Os valores referentes aos limites superior e inferior também tiveram reduções proporcionais aos valores obtidos antes do tratamento, como descrito na Tabela 7.

Tabela 7 — Análise da variação da média e do desvio padrão.

carta xbarra				carta S			
Antes do Tratamento	Dados	Depois do Tratamento	%	Antes do tratamento	Dados	Depois do Tratamento	%
180	LSC	123.24	-31.53%	81.47	LSC	53.95	-33.78%
132.3	Média	91.63	-30.74%	46.27	DesvPad	30.64	-33.78%
84.6	LIC	60.01	-29.07%	11.06	LIC	7.33	-33.73%

Fonte: Aatoria Própria (2024).

Quanto a variação entre a média e os limites, antes do tratamento a amplitude era de 47,7 pontos e após o tratamento a amplitude baixou para 31,6 pontos, um ganho de -33,73%.

Para a Carta S, duas figuras inferiores, todas as variações foram constantes, representando ganhos de -33,78%,

6 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho teve como objetivo acompanhar a implementação prática da hipótese levantada por experimentação, de que o banho de desengraxe alcalino seria o responsável pela inconsistência nos resultados de força mínima requerida para o cravamento.

Antes de iniciar a coleta das amostras para este trabalho, estava em teste a implementação da calibração para 100% das peças fabricadas. Entretanto, essa alteração individual não atendeu aos requisitos de força mínima desejados.

Durante a apresentação do tema para o orientador, foi apresentado o estudo de Pourbaix, que prevê a estabilidade das espécies químicas em diferentes condições de eletrólise, variando os parâmetros de potencial elétrico e pH. Analisando o diagrama de Pourbaix para o alumínio, identificou-se a solubilização da alumina em meio alcalino. Essa confirmação corroborou para a manutenção da troca do banho de desengraxe.

Durante o estudo, identificou-se que o diagrama de Pourbaix não prevê a inclusão de elementos de liga na microestrutura do metal, os quais podem facilitar ou dificultar a ocorrência de corrosão (Sukiman, 2012, p. 52). Investigou-se que atualmente as ligas da série 2xxx e 5xxx apresentam maior proteção para corrosão em ambientes insalubres (Abal, 2008).

No decorrer do trabalho, até o processo anterior ao desengraxe, todas as amostras ensaiadas foram confeccionadas seguindo as mesmas fichas de processos, uma para cada operação. A coleta das amostras ocorreu em um período de 101 dias, não consecutivos, e foram confeccionadas em todos os três turnos que a Hydro opera.

Dos ensaios realizados, verificou-se um aumento na estabilidade do processo. Das 90 amostras coletadas antes da implementação da melhoria, apenas 56 amostras atenderam ao requisito de não superar os 150 kgf de força requerida para cravamento, o que equivale a 62% das amostras. Das 90 amostras coletadas após o processo de melhoria, 87 amostras atenderam ao requisito, equivalendo a 97% das amostras.

Para o estudo de capacidade, foi introduzido um limite inferior teórico de 50 kgf, devido à visualização da Figura 15, pois a requisição do cliente para cravamento da tampa por interferência não tem implicação na força de cravamento, mas sim no controle dimensional.

A proposta de melhoria implicou em um ganho de estabilidade do processo, confirmado pelo estudo de capacidade realizado através do software estatístico MINITAB®.

Obteve-se um ganho de -30,74% na média das forças mínimas de cravamento e uma redução de amplitude de 33,73%, ao analisar a carta Xbarra. Interpretando a carta S, o valor médio do desvio padrão reduziu 33,78%, com a amplitude também reduzida em iguais 33,78%.

Os valores referentes aos índices de capacidade Cp e Cpk variaram positivamente, com um aumento de 83% (de 0,29 para 0,53) e 340%, respectivamente. Considerando que, para a indústria, os valores de Cp e Cpk ideais deveriam ser maiores que 1,33 (Coutinho, 2020), tem-se uma possibilidade de melhora de 151% e 202%, respectivamente.

Entende-se que a implementação do processo de melhoria foi satisfatória. Uma vez que as amostras confeccionadas estão atendendo o requisito do cliente para o limite superior da força de cravamento. A realização prática dessa proposta de melhoria era devolver a etapa de cravamento para o cliente, até então realizado na Hydro, devido a limitação de força de cravamento disponível no mesmo. Tendo essa transição já ocorrido. Além de a avaliação teórica corroborar com a estabilidade do processo, ao notar-se um estreitamento na amplitude e na dispersão dos resultados.

Para futuras pesquisas e complementação do presente trabalho, fica a sugestão de: revisar o diagrama de Pourbaix para a liga 3103, entendendo qual o impacto de cada um dos elementos de liga traz de benefício, ou prejuízo, para a estabilidade do alumínio metálico. Como realizado por Sukiman, em seu trabalho, para a liga 5086.

Realizar diferentes ensaios de visualização, destrutivos ou não, para analisar a superfície da camada de alumina formada para o alumínio sem banho de desengraxe, ou submersão em qualquer condição que influencie na corrosão, e comparar com os resultados obtidos para condições de saturação ácida.

Para diferentes condições de saturação alcalina

Para cada uma das condições citadas acima, porém variando os potenciais elétricos.

Para qualquer caminho, ensaiar também o impacto dessas variações superficiais em demais propriedades mecânicas.

Analisar individualmente a camada de revestimento da tampa utilizada para cravamento e compreender se:

O material arrastado do tubo deposita na tampa

O material arrastado da tampa deposita no tubo

Tendo deposição, qual o impacto desse acúmulo na variação das propriedades mecânicas na superfície dos tubos.

REFERÊNCIAS

- PROCESSOS DE FABRICAÇÃO: CONFORMAÇÃO MECÂNICA II.** FLORIANÓPOLIS, f. 18, 2006. 35 p. (Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas). Disponível em: https://pavanati.com.br/doc/pfb_conformacaoii.pdf. Acesso em: 9 jan. 2024.
- ABAL. **Estatísticas: Nacionais: Transformados:** Consumo doméstico por segmento. ABAL. 2021. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/transformados/consumo-domestico-por-setor/>. Acesso em: 11 jan. 2024.
- ABAL. **Guia técnico do alumínio:** extrusão. 4 ed. São Paulo: ABAL, v. 4, f. 122, 2008. 244 p.
- ASTRO MACHINE WORKS. **Key Differences Between Billet, Cast, & Forged Manufacturing.** Astro Machine Works. 2021. Disponível em: <https://astromachineworks.com/billet-cast-forged-manufacturing-differences/#:~:text=Billets%20are%20solid%20lengths%20of,casting%20or%20hot%20rolling%20methods>. Acesso em: 2 jan. 2024.
- CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering:** An Introduction 7th Edition with Wiley Plus Set. 8 ed. 2012.
- CORRÊA, Renan David. **INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DO TEMPO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO CONTÍNUA NA MICROESTRUTURA E QUALIDADE METALÚRGICA DE TARUGOS DE ALUMÍNIO, LIGA 6063 E DIÂMETRO DE 6”.** São Carlos, f. 69, 2014. 138 p Dissertação (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7350/DissRDC.pdf?sequence=1&isAllow>. Acesso em: 13 jan. 2024.
- COUTINHO, Thiago. **Aprenda a atender às expectativas do cliente sabendo a Capabilidade do Processo!**. Voitto. 2020. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/capabilidade-do-processo>. Acesso em: 14 jan. 2024.
- DAVIS, Joseph R. **Aluminum and Aluminum Alloys.** ASM International, v. 1, f. 401, 1993. 802 p.
- EVIDENT. **Medição da rugosidade de superfícies:** Parâmetros do método de perfil. OLYMPUS. Disponível em: <https://www.olympus->

ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/. Acesso em: 14 jan. 2024.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro - RJ: Editora LTC, f. 173, 2007. 345 p.

INTELIGÊNCIA Artificial para criação de imagens a partir de texto descritivo. Runway. Disponível em: <https://runwayml.com/ai-magic-tools/text-to-image/>. Acesso em: 19 jan. 2024.

LEE, D. H.; PARK, J. H.; NAM, Soo Woo. **Materials Science and Technology**: Enhancement of mechanical properties of Al–Mg–Si alloys by means of manganese dispersoids. 4 ed, v. 15, f. 4. 1999, p. 450-455.

MAZOCCO, Flavio Luiz *et al.* COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO ENTRE OS GRÁFICOS DE CONTROLE X-BARRA E T - STUDENT VARIANDO O NÚMERO E O TAMANHO DAS AMOSTRAS. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, n. XXXVI. 2014, Curitiba, PR, 2014. 18 p. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37028632/TN_STO_196_109_25044-libre.pdf?1426744638=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCOMPARACAO_DO_DESEMPENHO_ENTRE_OS_GRAFIC.pdf&Expires=1705232100&Signature=XYhCvle6SBDpPchmGiaalZdhgwS2uzxJzz0P1Z08XEsqdTWPpCewcYJwxCw6~6rbtpT2xocEuTkt5zOdnUs6ljhHIDZzyilnkLqtK02YEqCzBb7toZUPcqnT9quv4vw4ynIK2CVTI33KCutrNiKPCgCq1CcjSfFrDjUk1K0NDPRgmLMFcuDenggzhk72HceWyVleKiGtbTehKi7xt8c7HrO~rQPtjfEMvaRxUBAQ8fOyDql6dHb-uRVlPbBAjPyPxC0tX95Ci~SUJq8yzqZhMw6O5-yjWixlQQc-V1uyJJX8Mo-f-lq~tWetrJ4UnHf2VWBGlzqocml921DO0xYA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 14 jan. 2024.

MESQUITA, Rafael Agnelli *et al.* **AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE COM BAIXO TEOR DE SILÍCIO: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES**. 3 ed. tecnologiamm, v. 1, f. 3, 2013, p. 7-12.

METALTHAGA. **7 grupos de ligas de alumínio da metalthaga**. Metalthaga. Novo Hamburgo - RS, 2017. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/artigos/conheca-as-ligas-de-aluminio-da-metalthaga/>. Acesso em: 7 jan. 2024.

MINITAB®. **Visão geral de Carta Xbarra-S**. Suporte ao Minitab® 20. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/how-to/variables-charts-for-subgroups/xbar-s-chart/before-you-start/overview/>. Acesso em: 14 jan. 2024.

MOORE, David S.; NOTZ, William I.; FLIGNER, Michael A. **A estatística básica e sua prática**. Tradução Cristiana Filizola Carneiro Pessoa. 3 ed. New York: W.H. Freeman and Co., 2005.

NBR 8116. **ALUMÍNIO E SUAS LIGAS**: Produtos Extrudados - Tolerâncias Dimensionais. 5 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

PEDRO, JOÃO PAULO BORGES. **MEDIDAS DE PRODUÇÃO MAIS LIMPA E OTIMIZAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EM INDÚSTRIAS GALVÂNICAS DA REGIÃO METROPOLITANA DE FLORIANÓPOLIS**.

FLORIANÓPOLIS, f. 61, 2010. 121 p Dissertação (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, FLORIANÓPOLIS, 2010.

POLMEAR, I. J. **Light Alloys**: From Traditional Alloys to Nanocrystals. Butterworth-Heinemann, f. 211, 2005. 421 p.

POURBAIX, Marcel. **Atlas d'équilibres électrochimiques**. Gauthier-Villars et cie, f. 329, 1962. 658 p.

REVISTA ALUMÍNIO. **CBN Amazônia entrevista presidente-executiva da ABAL**. Revista Alumínio. 2023. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/cbn-amazonia-entrevista-presidente-executiva-da-abal/>. Acesso em: 7 jan. 2024.

NEUSA ALONSO-FALLEIROS, **DIAGRAMAS DE POURBAIX ou DIAGRAMAS E vs pH**. Edisciplinas.usp. 2023, Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7806258/mod_resource/content/1/Aula_4_Pourbaix_2023.pdf , Acesso em: 7 jan. 2024

SAINT-GOBAIN. **PERFORMANCE CERAMICS & REFRACTORIES**: Óxido de alumínio. SAINT-GOBAIN. Disponível em: [https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/pt/materiais/alumina-al2o3#:~:text=%C3%93xido%20de%20Alum%C3%ADnio%20\(AI2,populares%20em%20todo%20o%20mundo](https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/pt/materiais/alumina-al2o3#:~:text=%C3%93xido%20de%20Alum%C3%ADnio%20(AI2,populares%20em%20todo%20o%20mundo). Acesso em: 7 jan. 2024.

SHIMADZU. **Precision Universal / Tensile Tester**: Especificações Técnicas. SHIMADZU. Disponível em: <https://www.shimadzu.com.br/analitica/products/materials-testing/uni-ttm/autograph-ags-x-series/spec.html>. Acesso em: 13 jan. 2024.

SIQUEIRA, Daniel. **Histograma: O que é, Exemplos, Gráficos e Tipos**. ALURA. 2023. Disponível em: <https://www.alura.com.br/artigos/o-que-e-um-histograma>. Acesso em: 14 jan. 2024.

SMITH, William Fortune. **Principles of Materials Science and Engineering**. Ingram, f. 443, 1990. 886 p.

SUKIMAN, N. L. **Durability and corrosion of aluminium and its alloys: overview, property space, techniques and developments**: Aluminium Alloys-New Trends in Fabrication and Applications, v. 5. 2012, p. 47-97.

TAYLOR HOBSON. **Surface Profilers: OVERVIEW**. TAYLOR HOBSON. Disponível em: <https://www.taylor-hobson.com/products/surface-profilers/i-series-pro-range/talysurf-pro>. Acesso em: 13 jan. 2024.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control**. John wiley & sons, 2019.

UNIVERSIDADE OSWALDO CRUZ. **PROCESSO DE CORROSÃO E PASSIVAÇÃO DO ALUMÍNIO**. Revista Acadêmica Centro de Pós-Graduação Oswaldo Cruz. São Paulo, [2019]?. Disponível em: https://oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao30_Elias_Junior_de_Freitas.pdf. Acesso em: 7 jan. 2024.

VOESTALPINE. **Extrusão de Metal**: Melhore seu fluxo de produção. VOESTALPINE. Disponível em: <https://www.uddeholm.com/brazil/pt-br/applications/extrusao-de-metal/>. Acesso em: 8 jan. 2024.

XAVIER, Clésio Lourenço. Indústria do Alumínio. *In*: EBC - NÚCLEO DE ESTUDOS DE ECONOMIA DE BAIXO CARBONO. **ECONOMIA DE BAIXO CARBONO**: Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira. São Paulo - Ribeirão Preto: FUNPEC, f. 86, 2014. 172 p. cap. 4, p. 127-151.

ZAJAC, S. *et al.* **Materials Science and Technology**: Microstructure control and extrudability of Al–Mg–Si alloys microalloyed with manganese. Finspang, Sweden.: Swedish Institute for Metal Research, v. 10, f. 6, 1994, p. 323-333.