UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JOÃO GUILHERME DOMINGUES

Anodização dura em pistões de alumínio

Guaratinguetá - SP
2021

João Guilherme Domingues

Anodização dura em pistões de alumínio

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini.

Guaratinguetá - SP
2021

Domingues, João Guilherme
D671a Anodização dura em pistões de alumínio / João Guilherme Domingues – Guaratinguetá, 2021.
39 f : il.
Bibliografia: f. 39

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

1. Resistência de materiais. 2. Teste de materiais. 3. Oxidação.
4. Materiais biocompatíveis. I. Título.

CDU 620.17

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JOÃO GUILHERME DOMINGUES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇAO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/UNESP-FEG

Msc. Emanuele Schneider Callisaya
UNESP-FEG

Prof. Me. Everton Coelho de Medeiros
UNESP-FEG

Fevereiro/2021

RESUMO

O método de Anodização Dura (industrial), consiste em colocar em um tanque de material isolante uma mistura de ácido com água, juntamente com um cátodo ligado a um retificador, que gera uma corrente. Em seguida, a peça é mergulhada no banho e o ácido induz a formação de dendritas no alumínio, sendo que a parte exterior dessas células se torna mais resistente ao ácido e melhora as suas propriedades. O aparecimento de milhares de pontos de ataque é consequência do efeito da dissolução da película pelo eletrólito, produzida no centro das células de alumina e que constitui o começo dos poros. O objetivo desse trabalho é analisar o processo de anodização dura em peças de alumínio, mais especificamente em pistões automotivos. Apresenta-se as funções do pistão, estruturas e materiais utilizados para sua fabricação. A metodologia compreendeu revisão da teoria e fase experimental desenvolvida inteiramente na empresa KSPG. Para este trabalho, foi feito um estudo sobre os efeitos que a anodização dura causa no alumínio e suas aplicações em pistões automotivos. Os resultados do estudo são apresentados em forma de tabelas e gráficos, sendo que os fatores analisados são as durezas e as espessuras das camadas de anodização de amostras de pistões feitos de alumínio. Conclui-se com o estudo, a eficácia que o banho apresenta a cada lote submetido ao tratamento, evidenciando a necessidade do reforço do mesmo para garantir a qualidade do processo, uma vez que as espessuras das camadas de anodização e as durezas das amostras, vão diminuindo, se tomarmos como referência o reforço do banho. Observa-se uma oportunidade de melhoria relacionada ao tempo de exposição da amostra ao banho, porém também fica evidenciado a robustez do processo analisado, sem nenhuma reprova de amostras e lotes. Por fim, fica evidenciado nesse trabalho que a anodização dura é um processo imprescindível em aplicações mais robustas, que precisam de uma resistência maior do que a que o alumínio pode oferecer, modificando assim sua microestrutura e propriedades mecânicas.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência de materiais. Teste de materiais. Oxidação. Materiais biocompatíveis.

ABSTRACT

The Hard Anodization (industrial) method consists of placing a mixture of acid and water in a tank of insulating material, together with a cathode connected to a rectifier, which generates a current. Then, the piece is immersed in the bath and the acid induces the formation of dendrites in the aluminum, and the outer part of these cells becomes more resistant to acid and improves its properties. The appearance of thousands of attack points is a consequence of the effect of the dissolution of the film by the electrolyte, produced in the center of the alumina cells and which constitutes the beginning of the pores. The objective of this work is to analyze the hard anodizing process in aluminum parts, more specifically in automotive pistons. The piston functions, structures and materials used for its manufacture are presented. The methodology included a review of the theory and experimental phase developed entirely at the company KSPG. For this work, a study was made on the effects that hard anodization causes on aluminum and its applications in automotive pistons. The results of the study are presented in the form of tables and graphs, and the factors analyzed are the hardness and thickness of the anodizing layers of piston samples made of aluminum. We conclude with the study, the efficacy that the bath presents to each batch submitted to the treatment, evidencing the need to reinforce it to guarantee the quality of the process, since the thicknesses of the anodizing layers and the hardness of the samples, will decreasing, if we take as a reference the reinforcement of the bath. There is an opportunity for improvement related to the time of exposure of the sample to the bath, but it is also evidenced the robustness of the analyzed process, without any disapproval of samples and batches. Finally, it is evident in this work that hard anodizing is an essential process in more robust applications, which need greater resistance than aluminum can offer, thus modifying its microstructure and mechanical properties.

KEYWORDS: Strength of materials. Materials testing. Oxidation. Biocompatible materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema completo de um automóvel com motor de combustão interna. 10
Figura 2 - Principais partes do pistão. 11
Figura 3 - O topo do pistão transfere as forças dos gases de combustão para o sistema..... 12
Figura 4 - Distribuição típica de temperatura em pistões de motores Diesel, à esquerda da imagem e pistões de motores Otto, à direita. 13
Figura 5 - Comparação da massa com o diâmetro do pistão. 15
Figura 6 - Área de contato e lubrificação no pistão. 15
Figura 7 - Liga de alumínio com fibras de cerâmica. 17
Figura 8 - Sistema utilizado para anodização. 19
Figura 9 - Dendritas. 20
Figura 10 - Começo da formação da camada-barreira em meio de um eletrólito com ação dissolvente. 23
Figura 11 - Região da primeira canaleta anodizada em meio sulfúrico. 26
Figura 12 - Região do topo anodizada em meio sulfúrico. 27
Figura 13 - Amostra para análise de micro dureza e espessura da camada anodizada. 28
Figura 14 - Pode-se observar da esquerda para a direita um refinamento do grão de silício (A), falha no processo de usinagem (B) e anodização perfeita (C). 29
Figura 15 - Médias das espessuras das camadas de anodização em mm. 32
Figura 16 - Média das durezas das amostras em HV. 33
Figura 17 - Desvio Padrão das espessuras das camadas de anodização em mm de 21 turnos. 34
Figura 18 - Desvio Padrão das durezas em HV de 21 turnos. 34
Figura 19 - Distribuição das espessuras das camadas de anodização das amostras em mm. ... 36
Figura 20 - Distribuição das durezas das amostras em HV. 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio, seus principais elementos de liga e aplicações. 18
Tabela 2 - Condições de trabalho para anodização em meio sulfúrico. 24
Tabela 3 - Resultados das espessuras das camadas de anodização em mm das amostras. 31
Tabela 4 - Resultados das durezas das camadas de anodização em HV das amostras. 32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 OBJETIVOS 8
1.2 ESCOPO DO PROJETO 9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 10
2.1 PISTÃO AUTOMOTIVO 10
2.1.1 Requisitos do pistão 12
2.1.2 Materiais, propriedades mecânicas e tratamentos superficiais 16
2.2 ANODIZAÇÃO 18
2.2.1 Estrutura das camadas de óxido e suas propriedades 22
2.2.2 Sistema e montagem 24
2.3 ANODIZAÇÃO EM PISTÕES AUTOMOTIVOS 26
2.3.1 Métodos de controle de qualidade em pistões automotivos 27
3 ESTUDO DE CASO 30
3.1 METODOLOGIA 30
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES 31
4 CONCLUSÕES 37
REFERÊNCIAS 39

1 INTRODUÇÃO

O estudo e a escolha das propriedades mecânicas de um determinado material está presente na atuação de um engenheiro mecânico, a fim de atender aos requisitos de um projeto ou cliente. O tema escolhido possui esse viés, melhorar as propriedades de um material, a fim de atender uma necessidade do cliente ou determinada aplicação.

O mercado muitas vezes necessita de peças com determinadas propriedades mecânicas, porém que atendam exigências para sua aplicação, como ser um material leve, que não conduza eletricidade, não sofra corrosão e ao mesmo tempo aguente elevadas pressões e temperaturas. O alumínio anodizado rígido vem sendo utilizado na indústria de utensílios de cozinha, polias e principalmente na indústria automobilística (ALMEIDA, 1996).

O alumínio tem utilização restrita devido à sua baixa resistência e dureza, porém com a anodização dura, é formada uma camada de óxido sobre a peça de alumínio, que lhe propicia propriedades de resistência ao desgaste e dureza maiores, sendo possível utiliza-la para finalidades que antes do tratamento não seria possível (EHNIS, 2012).

Devido a abrangência da utilização do alumínio em processos fabris atualmente, este estudo será muito útil e ajudará no entendimento e aplicação da anodização dura, podendo trazer ideias de novos produtos possíveis de serem feitos de maneira semelhante a já utilizada, pois cada vez mais os clientes exigem durabilidade dos produtos, bem como melhores propriedades mecânicas voltadas a sua aplicação no mercado, sem um aumento significativo no preço do mesmo (MARCONI; LAKATOS, 2003).

O estudo prático visa saber quando será viável aplicar a anodização dura, afim de chegar a conclusões baseadas em dados obtidos experimentalmente sobre o real impacto que a anodização dura tem, atendendo todas as exigências do cliente, garantindo confiabilidade e qualidade.

1.1 OBJETIVOS

• Conceituar a função de um pistão em um automóvel, sua estrutura, principais requisitos, forças e condições em que é submetido, evidenciando a importância da anodização dura no mesmo, para aguentar tais esforços;

• Definir os materiais utilizados na fabricação de um pistão, a partir de seus requisitos de utilização, suas propriedades mecânicas e tratamentos térmicos. Classificando as principais ligas de alumínio e elementos de liga hoje no mercado, bem como suas aplicações;

• Apresentar o processo de anodização dura aplicada em peças de alumínio, no aspecto macro e micro, com embasamento teórico em todos os fatores primordiais para que o resultado do tratamento térmico tenha uma qualidade elevada;

• Esquematizar em ilustração e teoria, a montagem, componentes e materiais utilizados no processo de anodização dura em peças de alumínio, a fim de evidenciar a importância de cada um;

• Apresentar os principais benefícios que o tratamento superficial tema desse trabalho, traz para as peças de alumínio anodizadas;

• Apresentar o processo de anodização dura em pistões automotivos, com aspectos e detalhes mais práticos, encontrados durante o estudo de caso. Bem como os métodos de controle de qualidade dos mesmos;

• Demonstrar a importância da anodização dura em pistões de alumínio, através de um estudo prático na indústria automotiva, representando dados em tabelas e gráficos, mais especificamente relacionados as durezas das peças e espessuras das camadas de anodização.

1.2 ESCOPO DO PROJETO

Este projeto será compreendido por pesquisa bibliográfica e teste em campo, sendo que a primeira se dará através de normas, artigos e livros, e a segunda com auxílio da empresa Kolbenschmidt, sendo necessário analisar as propriedades mecânicas do pistão de alumínio, comparar os resultados, discutir possíveis utilizações e impactos no funcionamento do produto final.

Após estudar o processo e seus resultados, a qualidade da anodização dura em pistões de alumínio dentro da empresa será analisada. O objetivo é demonstrar a confiabilidade do mesmo, para garantir que não existam retrabalhos ou desperdícios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PISTÃO AUTOMOTIVO

O motor de combustão interna, é uma máquina que converte energia química, proveniente da queima de combustíveis, em energia mecânica. A energia química da combustão dos gases é primeiramente convertida em energia térmica, aumentando a temperatura e a pressão dos gases dentro do cilindro do motor, fazendo-os se expandir rapidamente contra os mecanismos do motor, principalmente exercendo pressão no pistão (JUNKER, 2012). O pistão transforma essa energia em mecânica e através de uma biela ligada a um virabrequim, faz o movimento rotativo no eixo, transmitindo às rodas e fazendo o automóvel se mover. Esse sistema pode ser observado na Figura 1.

Figura 1- Sistema completo de um automóvel com motor de combustão interna.

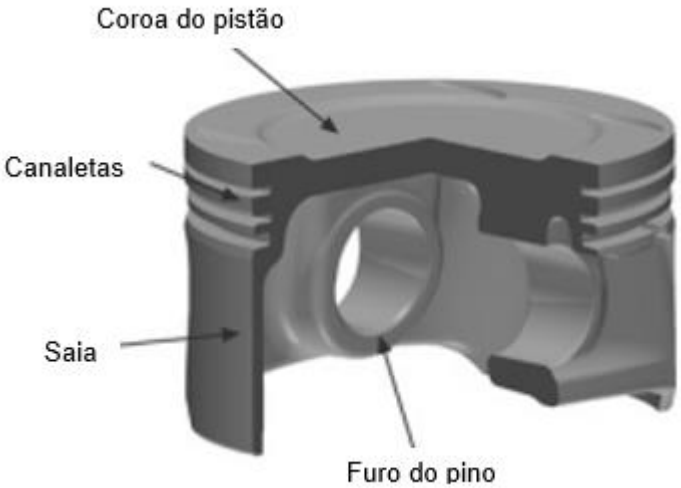
Fonte: Schmitt e Lange (2012).

O pistão é um componente do motor responsável pela transmissão de energia, pois durante o ciclo de combustão dentro do cilindro, a energia do combustível é rapidamente convertida em calor e pressão. O pistão tem a tarefa de converter esse calor e pressão que aumentam rapidamente, em trabalho mecânico (JUNKER, 2012).

A estrutura básica do pistão é um cilindro oco, fechado de um lado, onde o topo é a coroa do pistão, envolta no topo há canaletas onde vão os anéis de segmento, abaixo o furo para o pino e em volta do cilindro oco a saia, como pode-se observar na Figura 2. A coroa do pistão é responsável por aguentar o calor e a pressão resultantes da combustão da mistura ar-

combustível, passando o movimento gerado para o furo do pino e consequentemente ao pino, que por sua vez passa para a biela, chegando ao virabrequim mostrado na Figura 3 (JUNKER, 2012).

Figura 2 - Principais partes do pistão.

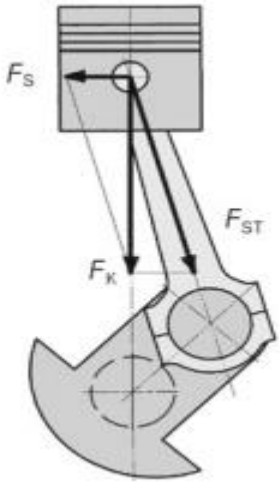


Schmitt e Lange (2012).

A pressão do gás no topo do pistão e as forças inerciais do pistão e da biela, constituem a força aplicada no pistão F_K. Devido a força da biela F_{ST} feita sobre o pistão, o mesmo tende a ser pressionado lateralmente contra o cilindro devido a folga existente entre os dois, ocasionando a força Fs. Durante o ciclo de combustão a força lateral alterna sua direção, pressionando o pistão de um lado para o outro dentro do cilindro (SCHWAB, 2012).

Como o pistão é um componente que se move e transmite a força aplicada sobre ele, o mesmo em conjunto com os anéis de segmento devem selar totalmente a passagem de gás para a parte inferior do motor e também selar a entrada de óleo lubrificante na parte superior, onde ocorre a combustão durante todo seu ciclo. O processo é viabilizado por uma película lubrificante entre o cilindro e a saia do pistão e anéis (SCHWAB, 2012).

Figura 3 - O topo do pistão transfere as forças dos gases de combustão para o sistema.



Fonte: Schmitt e Lange (2012).

.

2.1.1 Requisitos do pistão

Os principais requisitos de um pistão são (JUNKER, 2012):

- Resistência estrutural;
- Adaptabilidade às condições de operação;
- Baixa fricção;
- Baixo desgaste;
- Resistência ao cisalhamento e suavidade de funcionamento simultâneos;
- Baixo peso e estabilidade funcional simultâneos;
- Baixo consumo de óleo;
- Baixa emissão de gases na atmosfera.

Esses requisitos são muitas vezes contraditórios, tanto em termos de *design,* como de material, devendo ser cuidadosamente coordenados para cada tipo de motor e funcionalidade, podendo ter a melhor solução totalmente diferente para cada caso especifico (JUNKER, 2012).

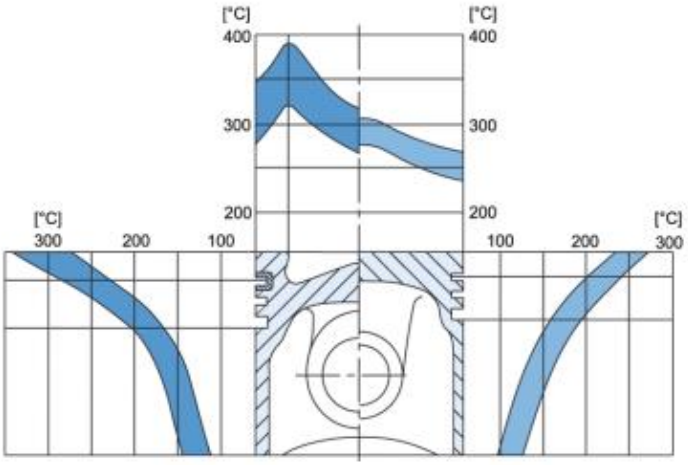
O pistão é sujeito a um equilíbrio das forças do gás de combustão, inércia e forças laterais, somadas às forças exercidas pela biela sobre o pistão. A pressão máxima exercida pelo gás tem significância crítica em termos de cargas mecânicas e depende do processo de combustão (diesel, gasolina, dois tempos ou quatro tempos) e como os gases entram na

câmara de combustão (aspirado normalmente ou turbo aspirado). Por exemplo, num motor a gasolina rodando a velocidade de 6000 RPM (rotações por minuto), a pressão máxima pode chegar a 75 bar na câmara de combustão, supondo que o pistão tenha 90mm de diâmetro, é exercida uma carga de 5 toneladas sobre ele, 50 vezes em 1 segundo (JUNKER, 2012).

Não é somente a pressão máxima que importa para o funcionamento do pistão, mas também a taxa com que ela aumenta, podendo causar grandes tensões no mesmo, até trincar ou quebrar. Essa taxa pode ser influenciada pelo uso de combustíveis inapropriados que chegam a causar até mesmo a quebra do motor, porém, os motores modernos já vêm com um sistema para evitar o rápido aumento da pressão, caso aconteça (JUNKER, 2012).

Outro ponto importante para a operação segura, vida útil do pistão e consequentemente do motor, é a temperatura, podendo chegar em picos de até 400°C para motores diesel e 310°C para motores à gasolina, por alguns milésimos de segundo (SCHMITT; LANGE, 2012). O uso de mecanismos como a galeria de óleo no interior do pistão, ajudam muito no controle da temperatura, portanto o *design* do mesmo, influencia muito na distribuição das temperaturas.

Figura 4 - Distribuição típica de temperatura em pistões de motores Diesel, à esquerda da imagem e pistões de motores Otto, à direita.



Schmitt e Lange (2011).

As propriedades do material utilizado em pistões, particularmente de ligas leves, são muito dependentes da temperatura, determinando o nível e a distribuição das temperaturas e tensões que podem ser suportadas pelo pistão. Cargas térmicas elevadas causam uma redução drástica na resistência à fadiga do material do pistão. Os locais mais requisitados

termicamente em pistões diesel são a borda da câmara, ou coroa, onde passam por tratamentos superficiais como a anodização, para melhorar suas propriedades e resistência a coeficientes térmicos e altas pressões. As temperaturas na primeira canaleta também são cruciais, pois com temperatura excessiva, há um acúmulo excessivo de impurezas que podem até mesmo ocasionar o travamento do anel e do pistão se em alta quantidade (WERKMANN, 2012).

A massa do pistão também é outro requisito para que seja possível otimizar seu desempenho e até mesmo atender o esperado do cliente pra emissões e potência. O pistão, junto com todos seus componentes, como pino, anéis trava e anéis de segmento, representam a massa oscilante. Alguns motores não conseguem compensar bem essa massa, portanto tendem a deixá-la o mais baixo possível, sendo que a maioria dessa massa é o pistão e o pino, portanto qualquer otimização da massa oscilante começa com eles (SCHWAB, 2012).

A altura de compressão de um pistão é toda a área do centro do furo do pino até a última ponta do topo, compreendendo cerca de 80% da massa oscilante, portanto é de extrema importância. A massa do pistão também é comparada com o seu diâmetro exemplificado na Figura 5, porem a altura de compressão ainda deve ser levada em conta.

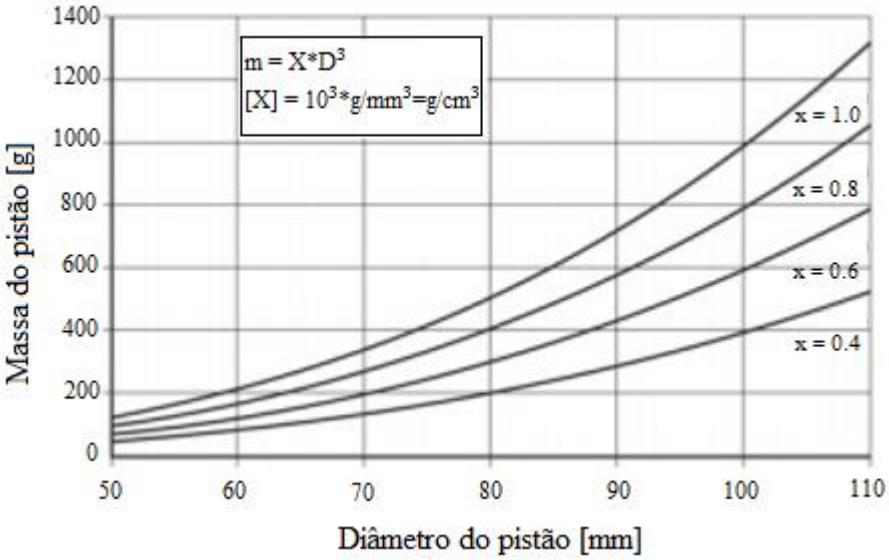
A fricção e o acabamento do pistão e dos cilindros também são imprescindíveis para o bom funcionamento dos mesmos, sendo que o formato, *design* e folga de montagem não são os únicos fatores que garantem isso. As forças de fricção na saia e a lubrificação da mesma, são decisivos para o não enripamento. Alguns valores de rugosidade precisam ser mantidos para que se melhore as características de rodagem e evite-se o desgaste abrasivo (SCHWAB, 2012).

Existem alguns requisitos também:

- Formação de um filme lubrificante entre a saia do pistão e o cilindro.
- Impedir que o pistão se agarre, ou seja, se funda ao material do cilindro devido a falta de folga ou óleo lubrificante.
- Normalmente os valores de rugosidade da saia devem ficar entre Ra = 2,5 a 5 μm (SCHMITT; LANGE, 2012).

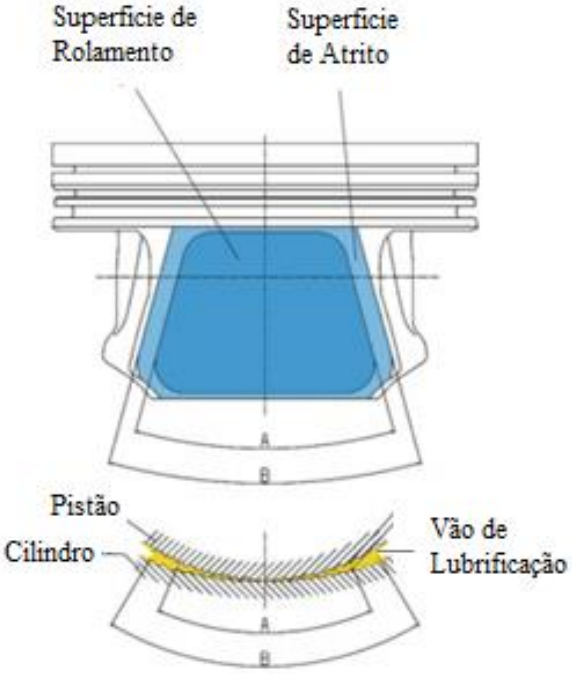
A Figura 6 mostra os locais que sofrem contato do pistão com o cilindro e como é a lubrificação da saia.

Figura 5 - Comparação da massa com o diâmetro do pistão.



Fonte: Adaptado de Schmitt e Lange (2012).

Figura 6 - Área de contato e lubrificação no pistão.



Fonte: Adaptado de Schmitt e Lange (2012).

O último requisito básico para o funcionamento do pistão, mas não menos importante, é o *blow-by*, que consiste em ser a passagem de gases da combustão para o cárter do motor, colocando em risco a lubrificação e contaminando a mesma, podendo ocasionar o travamento e quebra do motor. Valores altos de *blow-by* requerem uma ótima ventilação do cárter. A

selagem é basicamente feita pelo primeiro anel de segmento, que é chamado de anel de compressão, podendo ter no máximo 1% de *blow-by* para motores aspirados normalmente e 1,5% para motores turbo aspirados (SCHWAB, 2012).

2.1.2 Materiais, propriedades mecânicas e tratamentos superficiais

Os materiais e tratamentos utilizados em um pistão devem respeitar alguns requerimentos, como as cargas que agem sobre ele e a sua função (SCHWAB, 2012). Se quiser diminuir seu peso, um material com baixa densidade é preferível e além do *design*, a resistência mecânica do material é decisiva quando se trata de atender a carga exercida. Devido a mudança de carga exercida constantemente, é necessário tanto uma boa resistência estática quanto uma dinâmica, além de uma resistência térmica compatível com o projeto (MAIER, 2012).

A condutividade térmica do material é importante para controlar o nível de temperatura, pois quando se tem uma alta condutividade térmica a temperatura se distribui uniformemente ao longo do pistão. Baixas temperaturas não só permitem maior carregamento do material, mas também têm um efeito benéfico sobre os parâmetros do processo na coroa do pistão, como a eficiência volumétrica e limite de detonação (MAIER, 2012).

Valores de força estática e dinâmica descrevem o comportamento do material sob condições isotérmicas. Os pistões são expostos a mudanças severas na temperatura às vezes. O estresse térmico transitório que surgem provocam cargas cíclicas no material que às vezes pode exceder o limite elástico (MAIER, 2012).

Os materiais também devem ser resistentes a essas tensões. Devido aos movimentos e forças que ocorrem nas superfícies, devem ter alta resistência, baixa fricção e resistência ao desgaste. As condições de lubrificação também são consideradas críticas, sendo muitas vezes necessário aplicar tratamentos especiais ou revestimentos que melhoram as propriedades do material de base (SCHWAB, 2012).

Os requisitos para o comportamento de expansão térmica do material do pistão, dependem dos pares de materiais do cilindro e do pino do pistão. Diferenças nos coeficientes de expansão térmica devem ser mantidas o mais baixo possível, a fim de minimizar as mudanças de folga entre os estados frio e quente (SCHWAB, 2012).

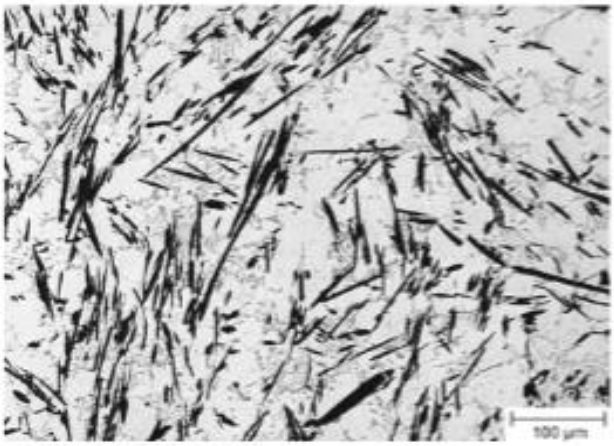
Um material com boas propriedades de usinagem também é importante para uma produção rentável em grandes quantidades e um bom acabamento. Além disso, a fabricação da peça bruta deve estar o mais próximo possível da forma final, e deve contribuir para a alta

qualidade do material. Processos adequados incluem fundição por gravidade e forjamento (SCHWAB, 2012).

As ligas de alumínio são leves, com alta condutividade térmica, sendo um material particularmente predestinado para ser usado como um material de pistão. Quando o alumínio está em seu estado puro, no entanto, sua força e resistência ao desgaste são muito baixos. Com a descoberta do endurecimento por precipitação de Wilm em 1906, as ligas de alumínio tornaram-se adequados para fins técnicos (MULLER, 2012). Os metais usados nas ligas têm uma solubilidade mútua que varia com a temperatura, sendo muito baixa para certos metais, que aumentam consideravelmente as propriedades importantes para o uso da liga de alumínio em pistões.

O alumínio é ligado com metais como níquel, silício, cobre e magnésio, para melhorar suas propriedades, seu resfriamento e solidificação, bem como seus cristais. Além das ligas, também são feitos tratamentos térmicos como envelhecimento, causando estresse em nível atômico e aumentando significativamente a dureza das ligas. Também é possível inserir fibras cerâmicas na liga de alumínio através de processos de moldagem auxiliados por pressão - fibras curtas de Al_2O_3 com diâmetro médio de fibra de 3 a 4 μm e comprimento médio de fibra de 50 a 200 μm, são infiltradas com a liga líquida fundida, como pode-se observar na Figura 7 (MULLER, 2012).

Figura 7 - Liga de alumínio com fibras de cerâmica.



Fonte: Schmitt e Lange (2012).

Essas fibras aumentam significativamente os limites de carga térmica e mecânica dos materiais de alumínio, reduzindo o coeficiente de expansão térmica, porém aumentam um pouco a densidade e diminuem a condutividade térmica, por isso são muito usadas em regiões

muito estressadas do pistão (MULLER, 2012).

Há pistões de materiais ferrosos, quando o alumínio não suporta as cargas aplicadas sobre o pistão, podem ser aplicados somente nas áreas solicitadas ou até mesmo serem inteiros feitos de materiais ferrosos (MULLER, 2012). Os porta anéis podem ser feitos de ferro fundido, dependendo também da pressão exercida sobre a primeira canaleta. Os componentes, por sua vez, são de aço, muitas vezes tratados para suportar as pressões a que são submetidos (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio, seus principais elementos de liga e aplicações.

Série	**Elementos de liga principais**	**Outros elementos de liga**	**Principais aplicações**
1xxx	Alumínio puro	-	Indústrias química e elétrica
2xxx	Cu	Mg, Li	Aeronaves (graças a sua elevada resistência mecânica)
3xxx	Mn	Mg	Aplicações arquitetônicas e produtos de uso geral
4xxx	Si	-	Varetas ou eletrodos de solda e chapas para brasagem
5xxx	Mg	-	Produtos expostos à atmosfera marinha como cascos de barcos
6xxx	Mg, Si	-	Produtos extrudados de uso arquitetônico
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr	Componentes estruturais de aeronaves e outras aplicações que necessitam de elevados requisitos de resistência. Esta liga é a que possui a maior resistência mecânica entre as ligas de alumínio.
8xxx	Sn, Li, Fe, Cu, Mg	-	

Fonte: o autor.

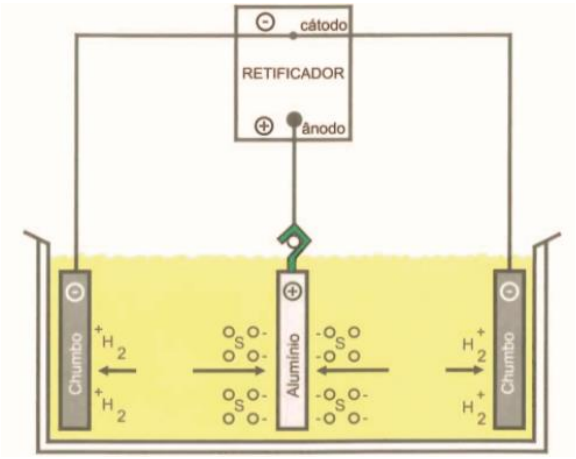
2.2 ANODIZAÇÃO

A anodização, descoberta em 1857 por H. Buff e C. Pollack para fins decorativos, é a tendência do alumínio em recobrir-se de óxido em uma célula de eletrólise, colocando-se o alumínio no ânodo. Com base na nova descoberta, inúmeras pesquisas começaram a ser feitas,

mas somente em 1911, o Français S. Martin desenvolveu os princípios básicos para oxidação eletrolítica em meio sulfúrico e em aproximadamente 1923 foi desenvolvido, na Suíça, o primeiro processo de anodização para fins industriais, utilizando-se ácido oxálico. Logo após, na Rússia e na Inglaterra foi desenvolvido um processo que se utiliza do ácido sulfúrico que é muito aplicado até os dias de hoje, pois é o que apresenta o melhor custo benefício (ALMEIDA, 1996).

A anodização dura é um tratamento superficial realizado para aumentar a dureza e tornar a peça anticorrosiva, através da formação controlada de uma camada de óxido superficial que também é protetora, é obtida colocando-se as peças de alumínio em uma espécie de cuba contendo água e certa quantidade de ácido que deve conter oxigênio no aníon, como os ácidos fosfórico, crômico, oxálico, sulfúrico, etc. No sistema (Figura 8) é adaptado um retificador (gerador de corrente continua), em que o polo positivo (ânodo) são as peças de alumínio a serem anodizadas e o polo negativo (cátodo) deve ser um material resistente ao meio como chumbo (ALMEIDA, 1996).

Figura 8 - Sistema utilizado para anodização.

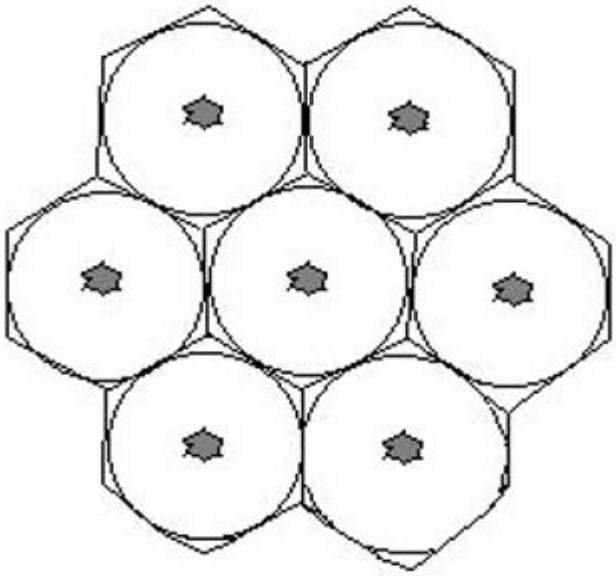


Fonte: KSPG Automotive (2020).

Quando a corrente elétrica passar pelo sistema, ocorrerá a eletrólise do ácido no ânodo (peças a serem anodizadas), liberando o oxigênio do ácido que reage com o alumínio, transformando toda a superfície em contato com o ácido em óxido de alumínio (alumina). Esta camada fina de alumina fornece proteção contra a corrosão, extremamente dura, transparente, anidra, porosa e com espessura aumentada proporcionalmente de acordo com o tempo de exposição no eletrólito. A película de alumina é composta por dendritas, células hexagonais sobrepostas (Figura 9), cujo centro é alumina amorfa, pouco resistente aos ácidos

e a região periférica é formada de alumina cristalina, muito resistente aos ácidos. Aparecem milhares de pontos de ataque consequentes do efeito da dissolução da película pelo eletrólito, produzida no centro das células (alumina amorfa) e que constitui o começo dos poros (ALMEIDA, 1996).

Figura 9 - Dendritas.



Fonte: o autor.

As dendritas começam a se formar na camada mais externa do pistão de alumínio e com a ação do ácido, o material começa a ser "corroído" e a camada anodizada cresce, ocupando o lugar do material que já não está mais ali, crescendo também para fora, ou seja, a peça depois de anodizada fica um pouco maior que antes de passar pelo tratamento (ALMEIDA, 1996).

É necessário que se mantenha a temperatura constante, para que seja possível realizar a anodização, portanto acoplam-se ao sistema trocadores de calor, para absorver o calor liberado e então manter a temperatura constante em 1,5ºC. Para calcular a o calor liberado, utiliza-se a Equação (1).

$$0{,}95 \times A \times V = kcal/h \qquad (1)$$

Para manter a uniformidade da temperatura no eletrólito, faz-se uma agitação do "banho" por injeção de ar.

Existem cinco fatores primordiais para que o processo de anodização apresente um bom

aspecto e qualidade, sendo eles a densidade da corrente, a temperatura, a composição da liga de alumínio, a concentração e a agitação do eletrólito (ALMEIDA, 1996).

A densidade da corrente, é responsável pela velocidade com que o alumínio se oxida, que deve ser sempre maior que a velocidade de dissolução. A camada de alumina se forma do exterior para o interior da peça, passando através dos poros existentes na camada de óxido e chegando até o alumínio (ânodo), formando uma película não-condutora e aderente, dificultando a passagem de corrente elétrica, sendo necessário muitas vezes aumentar a densidade da corrente, afim de aumentar a velocidade de oxidação (ALMEIDA, 1996).

A temperatura empregada depende do tipo de ácido usado para o processo, sendo que nos ácidos inorgânicos a temperatura está intimamente ligada a dissolução da camada de alumínio junto aos poros, reduzindo assim a resistência da peça contra abrasão e corrosão. A temperatura pode acelerar o ataque sobre a película formada, aumentando o tamanho do poro formado e assim, permitindo que o ácido entre em contato com o alumínio (ALMEIDA, 1996).

A concentração e agitação do eletrólito são patentes de cada processo, variando de empresa para empresa e dependendo do ácido e processo utilizados, mas é sabido que o ácido sempre é misturado com água deionizada para criar uma solução acida (20% ácido sulfúrico e 80% água deionizada é o mais comumente utilizado). A agitação do processo se deve ao ar pressurizado, que é disparado nos banhos e faz com que o mesmo se agite, fazendo com que o processo se acelere e o ácido consiga oxidar de maneira mais eficiente o alumínio, entrando nos poros (muitas vezes as gancheiras com as peças de alumínio, também balançam para agitar ainda mais).

O processo de anodização é a transformação do alumínio em óxido de alumínio superficialmente, como foi observado até aqui, e não pela deposição de um outro material como na maioria dos processos galvânicos (ALMEIDA, 1996). Dito isto, é necessário analisar os elementos de liga presentes no alumínio durante o processo em meio sulfúrico, pois este é o mais utilizado.

Quando o alumínio é puro, obtém-se uma camada de alumina transparente, mesmo que ela seja mais grossa (>20μm); o magnésio presente na liga de alumínio se oxida junto com o mesmo, facilitando o desenvolvimento da película e tornando-a cinza claro, que fica mais acentuado no decorrer do seu crescimento; o cromo também se oxida juntamente com o alumínio, mas faz com que a película adquira um tom amarelado que se acentua com o crescimento da mesma (ALMEIDA, 1996).

Existem certos elementos de liga que são ruins para o processo de anodização, sendo

eles o silício, que por sua vez permanece no seu estado molecular, dificultando o crescimento da película e tornando a mesma cinza escura ou negra, dependendo da quantidade do elemento mencionado na liga; e o cobre, que se dissolve na alumina, provocando lacunas, dificultando o crescimento da película e diminuindo sua resistência contra a corrosão e abrasão (ALMEIDA, 1996).

2.2.1 Estrutura das camadas de óxido e suas propriedades

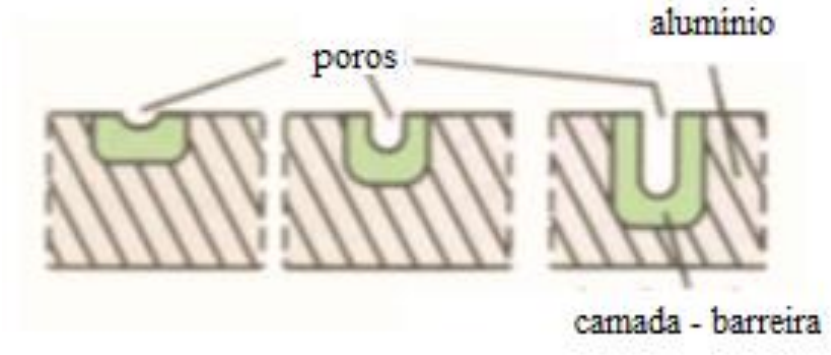
É necessário sempre oxidar o alumínio em um eletrólito que tenha uma ação dissolvente sobre a alumina, pois se isso não acontecer, observa-se que a intensidade da corrente para uma determinada tensão, decai rapidamente até tornar-se nula. Se o sentido da corrente é invertido, então a mesma retoma a seu valor inicial e permanece constante, fazendo com que a alumina formada funcione como um retificador de corrente (EHNIS, 2012).

É formada uma camada de alumina continua e compacta, chamada de camada-barreira, que impede a passagem de corrente, sendo que a espessura da mesma representa a distância que o íon metálico pode alcançar através do seu próprio óxido (EHNIS, 2012). Caso a corrente consiga passar após a formação dessa camada, pode-se considerar que existe uma impureza contida na liga.

Quando se oxida o alumínio em um eletrólito que tenha ação dissolvente sobre a camada de alumina, observa-se que a intensidade da corrente para uma tensão determinada também decai rapidamente, porém se estabiliza antes de chegar a nula, ou seja, a um nível mais elevado. Isso acontece devido a formação das camadas porosas, pois como já explicado anteriormente, as células da alumina têm o centro de alumina amorfa, que é pouco resistente aos ácidos, fazendo com que os poros se iniciem nesse centro (EHNIS, 2012).

Cada um desses pontos pode ser considerado um ponto de ataque e uma fonte de corrente, onde os íons que se apresentam na interface óxido-eletrólito, fornecem o oxigênio que transforma em óxido a porção metálica desse ponto, simultaneamente, o eletrólito continua a dissolver a base dos poros, fazendo-os alongar e facilitando sua ação, ao mesmo tempo que a camada se desenvolve e cresce, ocorrendo a liberação de calor, que também tende a favorecer a dissolução. Na figura 21 pode-se observar como começa a camada porosa (EHNIS, 2012).

Figura 10 - Começo da formação da camada-barreira em meio de um eletrólito com ação dissolvente.



Fonte: KSPG Automotive (2020).

Isso pode ser confirmado ao se olhar em um microscópio eletrônico, onde é possível ver claramente a estrutura hexagonal da célula e formação de poros em seu centro. O tamanho das células são proporcionais as tensões aplicadas, ou seja, quanto maior a voltagem de uma tensão aplicada no sistema, menor seu tamanho.

A alumina formada é extremamente dura, sendo tão dura quanto o quartzo e o topázio, variando inversamente a sua porosidade, atingindo 7 e 8 na escala de dureza Mohs. A sua resistência elétrica é sem igual, sendo superior ao da porcelana, por exemplo (EHNIS, 2012).

O meio sulfúrico é o mais utilizado por ter um custo baixo e ser facilmente comercializado, podendo ter em 1cm² da alumina formada por esse método quase 50 mil poros, se utilizada uma tensão de 20V, além da qualidade da camada formada ser muito superior à de outros solventes, conseguindo camadas extremamente duras utilizadas para fins técnicos (EHNIS, 2012). As condições de trabalho variam um pouco dependendo do resultado esperado, mas pode-se conferir algumas delas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de trabalho para anodização em meio sulfúrico.

Condições de trabalho	**H_2SO_4 (g/L)**	**Tensão (V)**	**Temperatura (°C)**	**Dens. De corrente (A/dm²)**	**Alumínio dissolvido (g/L)**	**Camada pretendida (µ/m)**
Fins decorativos	100 a 130	12 a 15	20 a 24	1,2 a 1,5	15 máx.	3 a 8
Arquitetura	180 a 220	15 a 20	17 a 24	1,5 a 2,0	15 máx.	15 a 25
Fins técnicos (dura)	100 a 180	20 a 80	-2 a 2	2,5 a 4,0	15 máx.	50 a 100

Fonte: Almeida (1996).

Pode-se adicionar ácidos orgânicos ao ácido sulfúrico, afim de inibir um pouco o ataque a camada de óxido formada, possibilitando a formação de camadas mais duras ou o trabalho em temperaturas alguns poucos graus mais altas.

2.2.2 Sistema e montagem

As peças de alumínio são encaixadas em gancheiras de diversos tamanhos, dependendo do tamanho do tanque e agitação do banho, e também são feitas de alumínio ABNT 6063 e 6101. Como elas são feitas de alumínio assim como as peças, elas também sofrem oxidação, por isso é necessário que depois de cada processo, elas sejam decapadas em uma solução de soda cáustica antes de ser reutilizadas. Podendo também ser encapadas em plástico ou material resistente a solução, ficando somente o apoio da peça sem essa proteção, afim de evitar desgaste prematuro das gancheiras. Existe ainda a possibilidade de serem feitas de titânio, porém, esse último não pode ser usado em peças maiores ou para camadas elevadas devido a sua baixa condutibilidade elétrica (FREIER, 2012).

Os cátodos utilizados são normalmente de chumbo, devendo sua área ser pelo menos o dobro da área do alumínio a ser anodizado (FREIER, 2012). O próprio alumínio também pode ser utilizado como cátodo, porém deve-se utilizar da mistura de ácidos orgânicos na solução sulfúrica na intenção de diminuir a sua agressividade, possibilitando uma economia de energia, pois o alumínio utilizado é seis vezes mais condutor de energia elétrica que o chumbo mencionado anteriormente.

Os tanques utilizados para o banho devem ser de material resistente aos ácidos, sendo os

mais utilizado o polipropileno, ferro revestido de PVC, borracha ou *fiberglass*.

Os retificadores de correntes pulsantes, podem ser utilizados até o limite de densidade da corrente aplicada, sem a desvantagem da geração de calor excessiva, que danifica a película e consequentemente diminui a sua resistência a corrosão, dureza e abrasão. Este tipo de corrente ainda fornece uma economia de tempo de até 25% quando comparado aos retificadores de corrente continua, mas se torna menos poroso, sendo necessário tirar a amplitude do impulso nos últimos 5 minutos para que os poros se reabram (FREIER, 2012).

O retificador de corrente vem sendo usado na galvânica em geral há muitos anos, porém, as principais características de um retificador voltado a oxidação do alumínio, são um pouco diferentes dos voltados para outros processos galvânicos.

O ensaio para comparação entre o processo utilizando-se de retificadores de corrente pulsante e corrente continua, está na norma ISO 3210 que corresponde a ABNT NBR 9243, tratando-se de um ensaio de qualidade de selagem por perda de massa. Neste ensaio, se imerge uma peça anodizada numa solução fosfórica-crômica durante 15 minutos, e depois se avalia a quantidade de massa que foi perdida, quanto menos massa perdida, melhor a selagem e a qualidade do óxido formado (FREIER, 2012).

Através desse ensaio, foi possível observar que a peça anodizada por processo de corrente pulsante, tem menor perda de massa quando comparada a uma peça anodizada que passou por um processo de corrente continua nas mesmas condições, pois a corrente pulsante facilita a troca térmica do banho junto aos grãos que estão se formando, diminuindo assim a agressividade do mesmo (FREIER, 2012).

Para a anodização com fins técnicos, é necessário também que não seja utilizada toda a corrente de trabalho logo no começo, ou seja, a entrada deve ser gradativa, sendo que em retificadores de corrente pulsante, esse aumento de corrente pode se ocorrer em um tempo menor, resultando em maior produtividade e menor tempo necessário para se realizar o processo (FREIER, 2012).

Algumas ligas de alumínio que enfrentam maiores dificuldades para oxidarem, também encontram maior facilidade ao se utilizar o retificador de corrente pulsante, por isso é o mais utilizado, salvo em casos especiais. Eles ainda podem ser programados com controle computadorizado, para automatizar o controle da corrente, bem como para possibilitar sua entrada gradativa e demais fatores que influenciam num bom resultado. Para fins técnicos, no meio sulfúrico, muitas vezes nem necessidade de uma selagem, por isso é o mais utilizado juntamente com a corrente pulsante (FREIER, 2012).

2.3 ANODIZAÇÃO EM PISTÕES AUTOMOTIVOS

A região mais solicitada em um pistão é o seu topo e as canaletas (Figuras 11 e 12), onde normalmente passam pelo processo de anodização; a maioria dos pistões diesel sofrem anodização em seu topo, devido à alta pressão sofrida no momento de compressão e ignição dos combustíveis. Pistões para carros flex são anodizados no topo, na primeira e algumas vezes na segunda canaleta, devido à alta resistência a corrosão, pois a reação do álcool no motor libera água, que pode danificar os pistões com o tempo na região onde essa reação atinge, ou seja, topo e canaletas (MULLER, 2012).

Uma mesma região do pistão sem passar pela anodização técnica, pode ter até 3,5 vezes menor dureza do que uma região que passou pelo tratamento, sendo um requisito fundamental para o mesmo aguentar todas as solicitações as quais é exposto. Exemplo:

Pistão sem anodização: 110 a 125 HV;

Pistão com anodização: 360 a 420 HV.

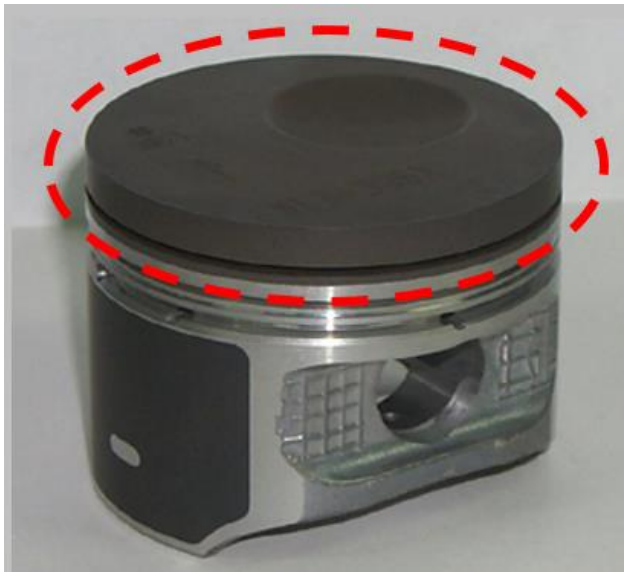
Figura 11 - Região da primeira canaleta anodizada em meio sulfúrico.

Fonte: o autor.

Na empresa onde foi realizado o estudo de caso, utiliza-se o eletrólito mais usado nas industrias atualmente, o ácido sulfúrico, devido as suas vantagens e facilidades quando comparado aos outros eletrólitos. Os pistões são envolvidos em capas protetoras, feitas de um material resistente ao banho, que deve cobrir somente as áreas que não devem sofrer oxidação, ou seja, deixando as áreas do topo ou das canaletas livres para entrar em contato

com o eletrólito (MULLER, 2012).

Figura 12 - Região do topo anodizada em meio sulfúrico.



Fonte: o autor.

Os pistões devidamente encapados são colocados em gancheiras e mergulhados no banho. Pode-se observar que os cátodos utilizados são de titânio, ligados diretamente no retificador, e o ânodo ligado diretamente nas gancheiras, que estão em contato com os pistões que devem sofrer a oxidação. Também é possível observar que no fundo dos tanques existem tubulações para saída de ar comprimido, ajudando a movimentar o banho e auxiliar no processo de anodização (MULLER, 2012).

Assim que a solução acida composta de aproximadamente 20% de ácido sulfúrico e 80% de água deionizada é depositada nos tanques, é ligado o ar comprimido para manter o banho em constante agitação (MULLER, 2012).

Os milhares de pontos de ataque aparecem na área que está em contato com o banho e as dendritas começam a se formar até atingirem a espessura de aproximadamente 20 micrometros, para então os pistões serem retirados do banho e lavados com água deionizada (MULLER, 2012).

2.3.1 Métodos de controle de qualidade em pistões automotivos

A dureza da camada anodizada e a espessura da mesma, são os fatores que devem sempre ser controlados para se ter certeza de que a anodização foi efetiva e irá cumprir seu

papel em aguentar a oxidação e a pressão quando o pistão estiver exercendo seu papel no motor. Sempre que pistões são anodizados, uma pequena parcela chamada de amostra (Figura 13) é retirada do lote e analisada em laboratório (ALMEIDA, 1996).

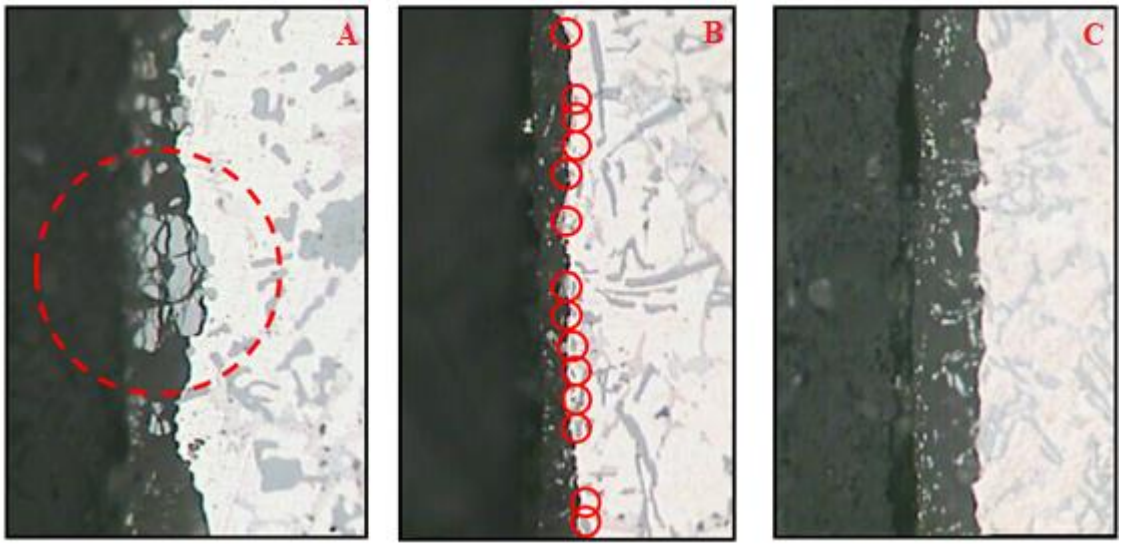
A dureza é controlada através de um micro durômetro, devendo obedecer a tolerâncias e estar entre 360HV e 420HV para que o lote seja liberado, caso contrário, todo o lote deve ser descartado e o banho trocado (ALMEIDA, 1996).

Figura 13 - Amostra para análise de micro dureza e espessura da camada anodizada.

Fonte: o autor.

Para análise da espessura e qualidade da camada anodizada, utiliza-se o corte mostrado e com a utilização de um microscópio é observado exatamente onde ocorre a divisão entre o alumínio e a camada de óxido. A especificação nominal dada em desenho é de 0,015 ± 0,005 mm para a espessura. Não se deve observar nenhum corpo estranho dentro da camada e nem refinamento do grão de silício, pois os mesmos podem fazer com que nessa região ocorra a concentração de tensões, podendo vir a trincar o pistão ou arrancar pedaço do óxido, levando a falha e quebra do motor, gerando um custo elevado (ALMEIDA, 1996). Pode-se ver esses defeitos na Figura 14.

Figura 14 - Pode-se observar da esquerda para a direita um refinamento do grão de silício (A), falha no processo de usinagem (B) e anodização perfeita (C).



Fonte: o autor.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 METODOLOGIA

O estudo foi realizado na empresa *Kolbenschmidt,* uma divisão da KSPG Automotive, responsável pela fabricação de pistões para motores *otto* e diesel para veículos de passageiros, comerciais e utilitários, motores dois tempos, compressores, motores estacionários, entre outros, sendo a divisão mais renomada do grupo. O estudo para a obtenção de novos recursos de redução de consumo e emissões, bem como o aumento de potência, são alguns dos fatores mais importantes que motivam e impulsionam o desenvolvimento de novas tecnologias de pistões.

Com auxílio do engenheiro responsável pela galvânica, durante uma semana, foi feito o acompanhamento do processo de anodização da peça mais produzida no Brasil, um pistão Renault, cuja primeira canaleta é inteiramente anodizada. Os dados coletados foram a espessura da camada de anodização, a dureza e a quantidade de peças descartadas devido a esse processo.

O banho foi observado e o nível de ácido medido a cada lote, sendo que, seguindo a norma KS HN este controle deve acontecer no máximo a cada doze horas. O controle do banho é realizado em todas as trocas de turnos, para que o nível do ácido sulfúrico e de todos os outros componentes do banho voltem ao nível requerido e a anodização aconteça dentro do especificado. O fundo do tanque é limpo e todos os contaminantes, no caso do próprio alumínio, que se depositaram ali, são filtrados e colocados em um tonel, para que sejam descartados em um lugar apropriado. É adicionado ácido sulfúrico e água, até que seja atingido o padrão especificado por norma, assim podendo retomar a produção.

As trocas de turnos acontecem às 6:27, 14:27 e 22:27, ou seja, o controle dos banhos sempre acontece antes das doze horas máximas previstas na norma.

A espessura e a dureza da camada de anodização foram controladas através de três amostras por turno, ou seja, depois de limpar e normalizar o nível dos componentes do banho, uma amostra é retirada do primeiro lote produzido e levada para o laboratório físico onde ocorrerá a análise. Na metade do tempo da troca do banho, outra amostra deve ser levada para o laboratório. Por fim, antes de trocar o banho, retira-se uma amostra do último lote produzido no turno e a análise indicará se as condições da peça atendem ao especificado.

Caso a amostra enviada ao laboratório esteja abaixo da dimensão nominal definida em desenho ou abaixo dos limites de dureza, outra amostra é analisada para contraprova, se for

admitida, o lote é aprovado e a primeira amostra reprovada é algo pontual. Na situação da segunda amostra também não ser aprovada, o lote todo deverá ser refugado.

Para o controle acontecer, a sala deve estar climatizada, no relatório emitido, as temperaturas e a umidade do ar são relatadas, pois a anodização pode ser influenciada por ambas. Caso o lote seja reprovado, pode ser uma das justificativas para tal reprova.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Acompanhando por uma semana, foi possível coletar as espessuras e durezas de 63 amostras em 63 lotes diferentes, assim sendo, foram coletados os dados de 21 trocas de banhos em 21 turnos. A especificação nominal dada em desenho é de 0,015±0,005mm para a espessura e dureza maior ou igual à 300HV. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 3 e 4. O primeiro valor é referente a amostra retirada do primeiro lote, no primeiro turno, o quarto valor refere-se ao primeiro lote do segundo turno, e assim sucessivamente.

Tabela 3 - Resultados das espessuras das camadas de anodização em mm das amostras.

Dias	**Lote 1.1**	**Lote 2.1**	**Lote 3.1**	**Lote 1.2**	**Lote 2.2**	**Lote 3.2**	**Lote 1.3**	**Lote 2.3**	**Lote 3.3**
15/10/2020	0,019	0,019	0,017	0,018	0,018	0,017	0,019	0,018	0,016
16/10/2020	0,018	0,018	0,015	0,019	0,018	0,017	0,018	0,018	0,017
17/10/2020	0,017	0,015	0,014	0,018	0,018	0,016	0,019	0,019	0,016
18/10/2020	0,016	0,018	0,015	0,019	0,018	0,015	0,020	0,019	0,018
19/10/2020	0,018	0,018	0,017	0,015	0,014	0,013	0,018	0,019	0,018
20/10/2020	0,019	0,019	0,019	0,018	0,018	0,016	0,018	0,017	0,015
21/10/2020	0,018	0,018	0,017	0,018	0,016	0,015	0,017	0,014	0,014

Fonte: o autor.

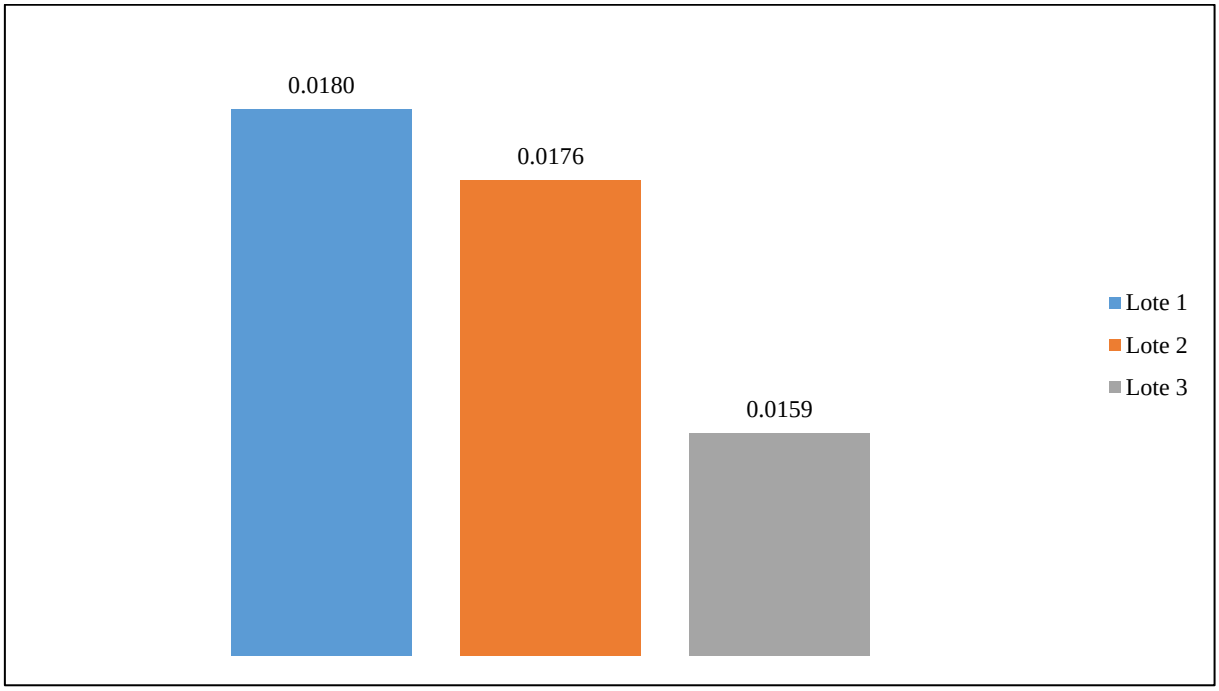
Tabela 4 - Resultados das durezas das camadas de anodização em HV das amostras.

Dias	**Lote 1.1**	**Lote 2.1**	**Lote 3.1**	**Lote 1.2**	**Lote 2.2**	**Lote 3.2**	**Lote 1.3**	**Lote 2.3**	**Lote 3.3**
15/10/2020	404	390	382	400	384	376	409	400	392
16/010/2020	405	400	388	410	391	375	390	382	367
17/10/2020	402	394	390	407	389	378	401	392	381
18/10/2020	411	400	393	402	396	386	400	387	383
19/10/2020	406	386	371	400	385	381	404	394	386
20/10/2020	408	399	397	400	405	392	401	397	394
21/10/2020	387	384	369	394	382	388	386	354	369

Fonte: o autor.

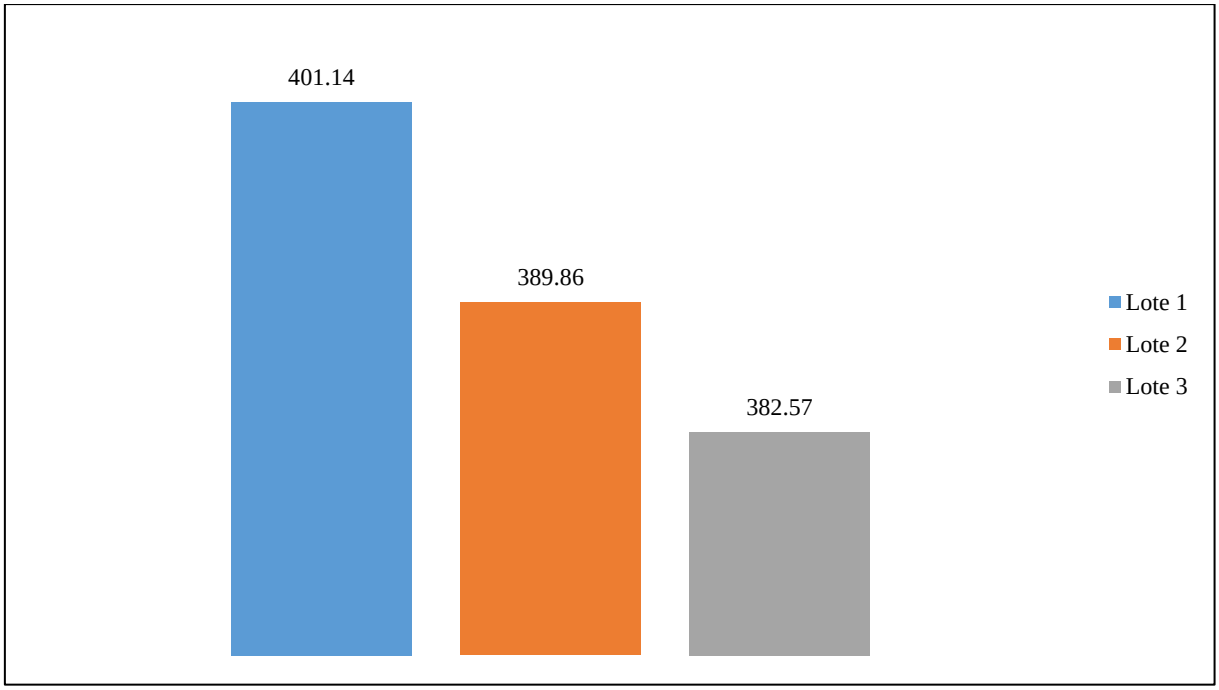
Os Gráficos das Figuras 15 e 16, apresentam respectivamente, as médias simples das espessuras e durezas das amostras analisadas, em cada lote.

Figura 15 - Médias das espessuras das camadas de anodização em mm.



Fonte: o autor.

Figura 16 - Média das durezas das amostras em HV.

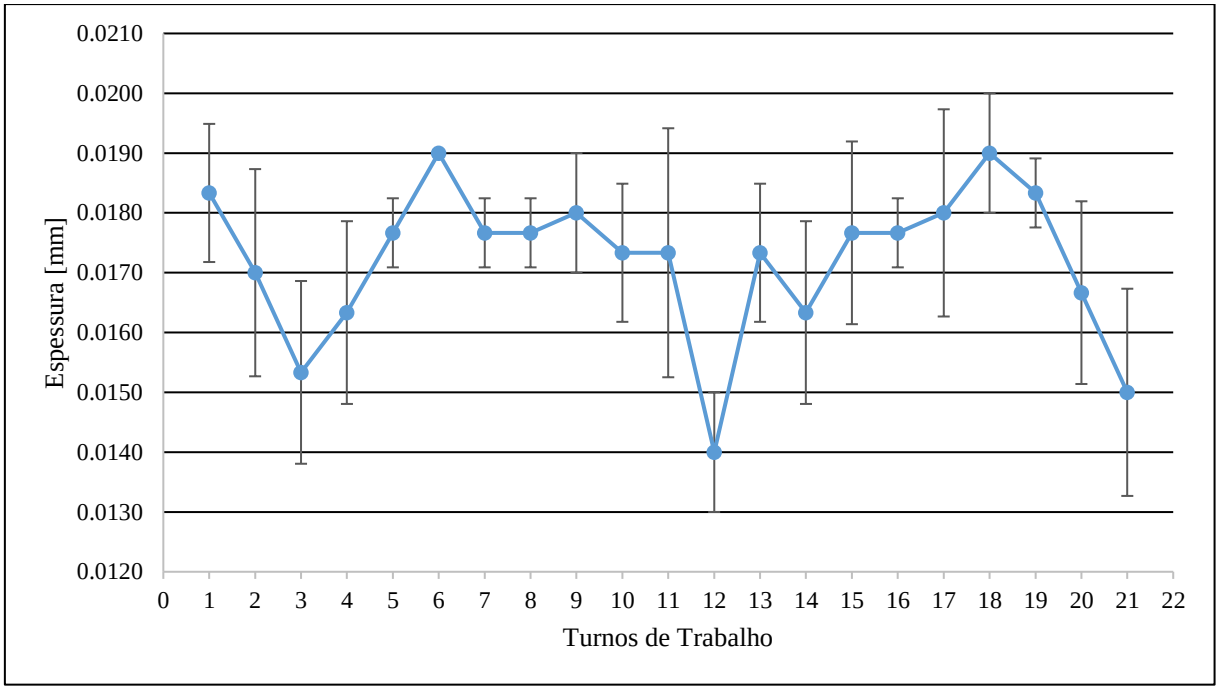


Fonte: o autor.

Observa-se que tanto as espessuras quanto as durezas ficam menores, analisando do primeiro ao último lote, respectivamente. Uma vez que o primeiro lote representa o início do banho, o segundo, o meio e o terceiro, o final. Evidenciando o efeito negativo dos resíduos de alumínio, que vão se depositando no fundo do tanque e afetando a qualidade do tratamento, mas sem exceder as tolerâncias pré-estabelecidas.

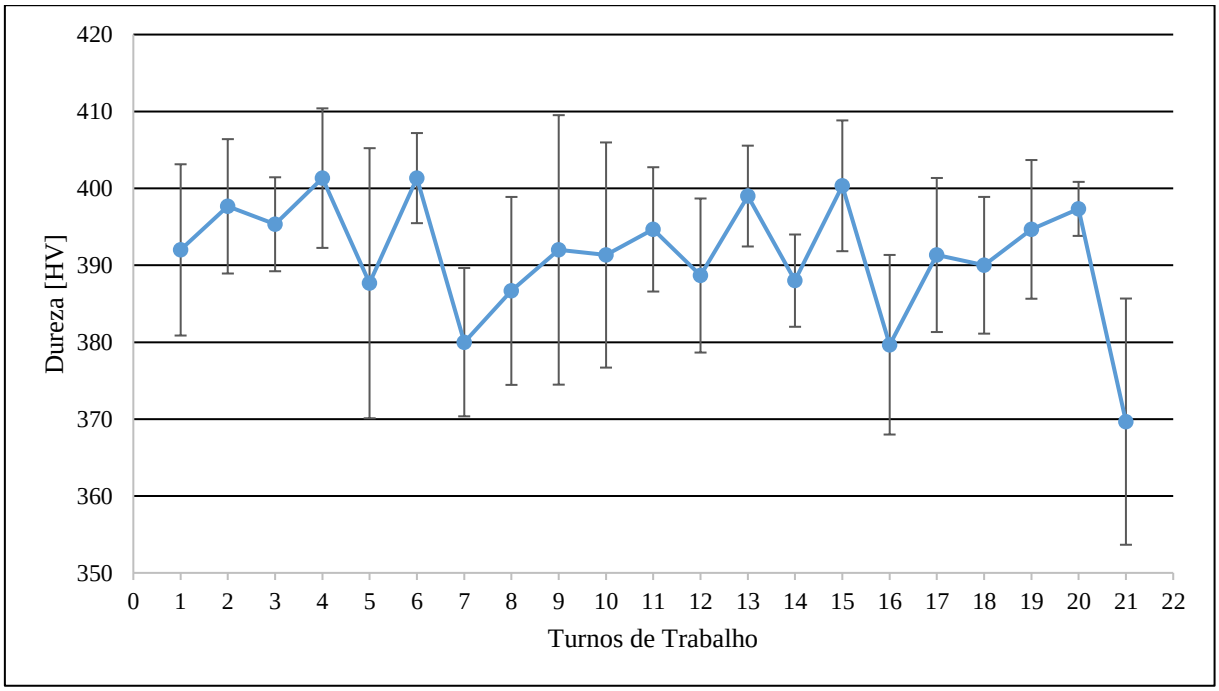
Os Gráficos das Figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, os Desvios Padrão das espessuras e durezas das amostras analisadas, em cada turno de trabalho.

Figura 17 - – Desvio Padrão das espessuras das camadas de anodização em mm de 21 turnos.



Fonte: o autor.

Figura 18 - Desvio Padrão das durezas em HV de 21 turnos.



Fonte: o autor.

É possível dizer que nenhuma peça foi refugada na semana da coleta de dados, pois todas se encontram dentro das tolerâncias, que vai de 0,01 mm até 0,02 mm para as espessuras, e acima de 300 HV para as durezas. Isso se deve ao fato de que a troca e controle

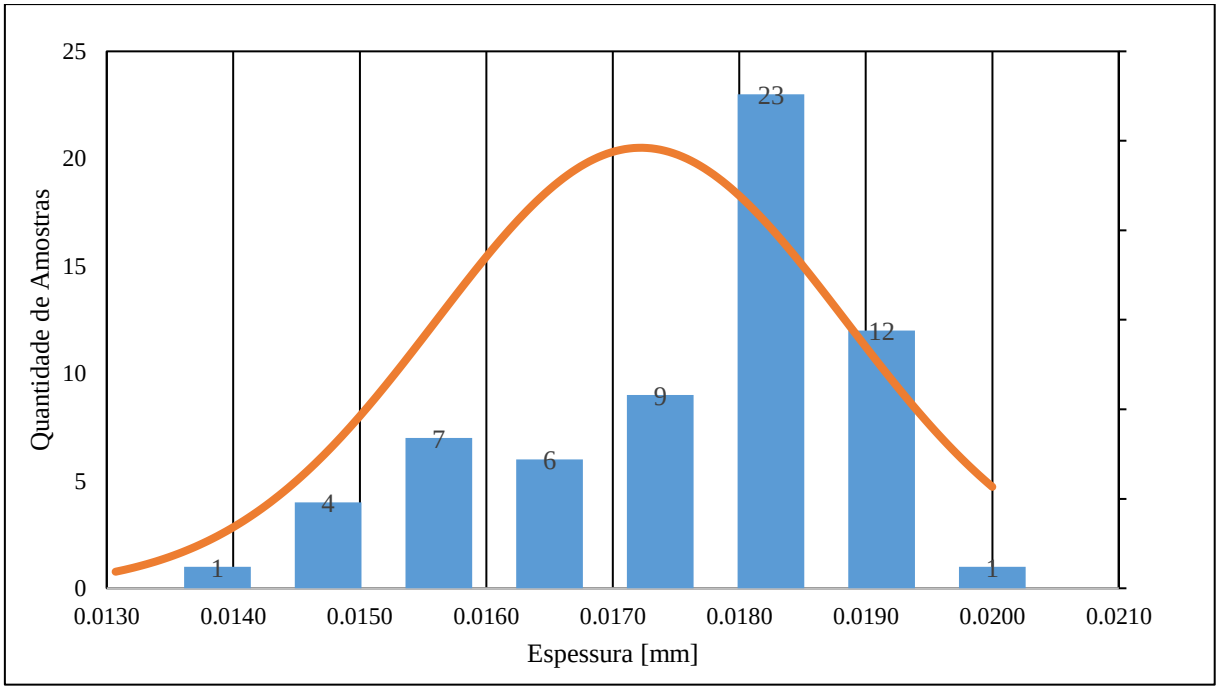
do banho é rigorosa e feita algumas horas antes do tempo máximo definido em normas.

A anodização é um dos últimos processos realizados nos pistões, ou seja, caso um lote tenha que ser refugado, serão perdidas muitas horas de trabalho e muito dinheiro investido na produção das mesmas, por isso o controle e a preocupação com a qualidade da anodização deve ser imprescindível.

O Histograma do gráfico da Figura 19, apresenta a distribuição das espessuras das camadas de anodização das amostras analisadas. Nota-se que, o intervalo com mais ocorrências está entre 0,016 mm e 0,019 mm, tendo o seu pico no intervalo entre 0,018 mm e 0,0185 mm, com 23 ocorrências. Os valores mais próximos das tolerâncias de 0,01 mm e 0,02 mm, para as camadas de anodização, são de 0,013 mm para o limite inferior, e de 0,02 mm para o limite superior, com apenas 1 ocorrência em cada.

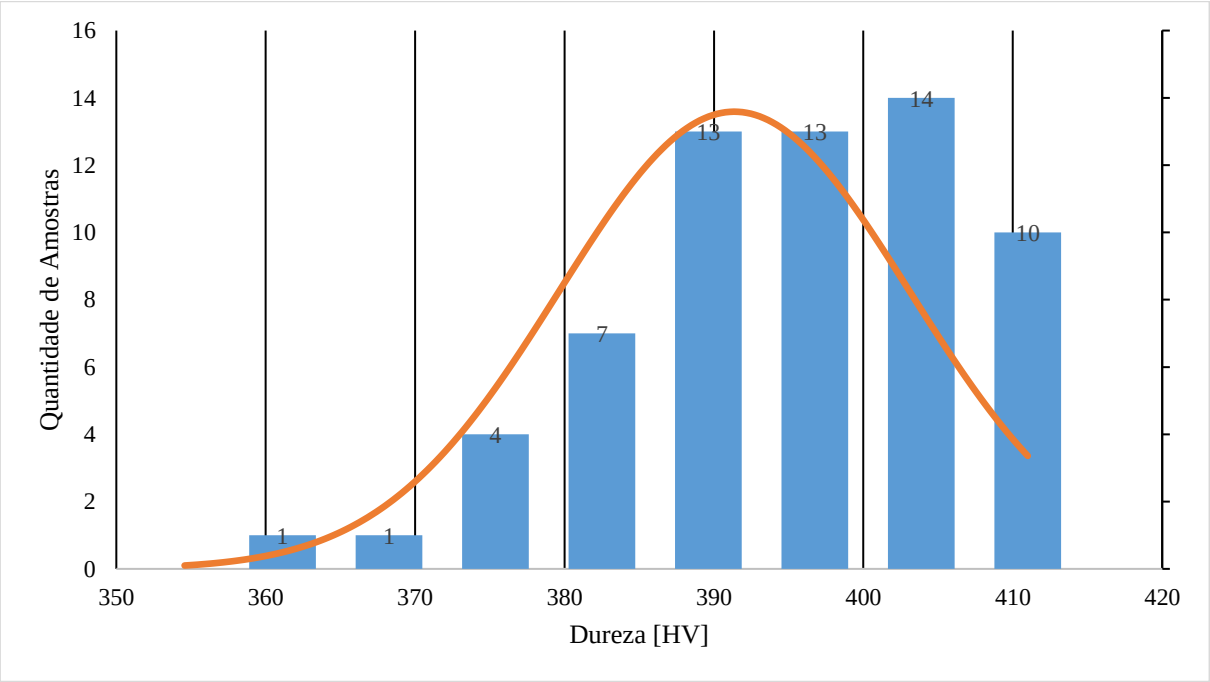
O Histograma do gráfico da Figura 20, apresenta a distribuição das durezas das amostras analisadas. Nota-se que, o intervalo com mais ocorrências está entre 380 HV e 405 HV. Os valores mais próximos da tolerância mínima de 300 HV, para as camadas de anodização, é de 354 HV, com 1 ocorrência.

Figura 19 - Distribuição das espessuras das camadas de anodização das amostras em mm.



Fonte: o autor.

Figura 20 - Distribuição das durezas das amostras em HV.



Fonte: o autor.

4 CONCLUSÕES

É possível concluir ao final das pesquisas bibliográficas e estudo prático, que os pontos levantados como objetivo desse trabalho, foram contemplados com sucesso.

Fica evidente a importância da anodização dura em pistões de alumínio. A presença de uma somatória de forças exercidas sobre o mesmo quando está em atividade, somando-se aos requisitos básicos para o bom funcionamento de um pistão, além da variação de pressão e temperatura em que são submetidos, tornam-se imprescindível a aplicação desse tratamento superficial. A fim de aumentar sua resistência ao desgaste, reduzindo o atrito e viabilizando seu trabalho em temperaturas maiores.

Em relação aos materiais utilizados para a fabricação dos pistões, as ligas de alumínio são apontadas como o melhor material disponível no mercado hoje para essa finalidade, uma vez que são leves e possuem uma condutividade térmica alta. Os principais metais para compor os elementos de liga são níquel, silício, cobre e magnésio.

O processo de anodização dura aplicado em peças de alumínio, encontra-se detalhado nesse trabalho. No aspecto macroscópico, explica-se a importância dos elementos envolvidos no processo, com ilustração. Desde o retificador que gera corrente contínua no sistema, ao pistão de alumínio, que atua como ânodo, recobrindo-se de óxido em uma célula de eletrólise, até as peças de chumbo que atuam como cátodo (no estudo prático, são de titânio). Finalmente, o banho contido na cuba, que é composto por água e ácido, é explicitado.

No aspecto microscópico, a película de alumina formada tem a sua composição explicada, com ilustração elaborada pelo autor das dendritas, que se formam na camada mais externa da peça anodizada, corroendo o material e dando espaço para a camada anodizada crescer, atribuindo uma dimensão maior para a peça do que tinha originalmente. Algumas conclusões são evidenciadas na teoria, como a necessidade de se manter a temperatura constante, pra isso o uso dos trocadores de calor, e da agitação do banho com injeção de ar; a dureza da alumina formada, comparando-se ao quartzo e topázio, atingindo 7 e 8 na escala de dureza Mohs; a altíssima resistência elétrica alcançada, superior ao da porcelana, por exemplo; e a comprovação do porquê o meio sulfúrico é o mais utilizado no processo.

Do estudo realizado na empresa *Kolbenschmidt,* uma divisão da KSPG Automotive, são evidenciadas com fotos as regiões de um pistão de alumínio que passaram pelo tratamento térmico de anodização, que é o seu topo e as canaletas, sendo as mais solicitadas. Mostrando-se aspectos mais práticos do processo, como as capas protetoras que envolvem a peça, afim de cobrir as áreas que não devem sofrer oxidação. Os métodos de controle de qualidade, da onde

surgiram a base de dados analisadas nesse trabalho, são as durezas das camadas anodizadas em amostras dos pistões, medidas pelo método Vickers, e as espessuras das mesmas, com o auxílio de um microscópio. São apresentadas imagens da amostra para análise de micro dureza e espessura da camada anodizada, bem como a representação microscópica de uma anodização bem feita e de outras com defeitos (refinamento do grão de silício e falha no processo de usinagem).

Concluiu-se que o processo realizado na empresa é robusto, sendo aproveitado ao máximo e mantendo a excelência na qualidade, pois nenhuma das 63 amostras analisadas durante o decorrer da semana estudada, estava fora do especificado em desenho, conforme gráficos 3 e 4. A redução das durezas e espessuras das camadas de anodização das amostras por lote, observadas nos gráficos 1 e 2, são provenientes das contaminações do banho, porém, as tolerâncias de 0,015 ± 0,005 mm para a espessura e dureza superior ou igual à 300HV, são respeitadas.

O quinto gráfico, evidencia que a exposição das amostras aos banhos, está proporcionando espessuras das camadas de anodização elevadas, mais próximas da tolerância máxima de 0,02 mm, do que da tolerância mínima de 0,01 mm. Isso indica que o tempo de exposição da amostra ao banho poderia ser um pouco menor, uma vez que isso traria uma confiabilidade maior ao processo, fixando a maioria dos intervalos longe das tolerâncias. Essa redução do tempo de exposição, não afetaria a dureza das amostras, pois fica evidente no gráfico 6, que os valores estão bem acima da tolerância exigida em norma, de 300 HV ou mais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M. **Guia técnico do alumínio.** São Paulo: ABAL, 1996. v. 3.

EHNIS, H. Pistols materials. *In*: SCHIMITT, E.; LANGE, E (ed.). **Pistons and engine testing**. Stuttgart: MAHLE GmBH, 2012. p. 59-82.

FREIER, R. Component testing. *In*: SCHIMITT, E.; LANGE, E (ed.). **Pistons and engine testing**. Stuttgart: MAHLE GmBH, 2012. p. 107-113.

KSPG Automotive Brazil. **Motorservice.** 2020. Disponível em: https://www.rheinmetall-automotive.com/en/brands/motorservice/. Acesso em 23 jun. 2020.

MAIER, K. Engine testing. *In*: SCHIMITT, E.; LANGE, E (ed.). **Pistons and engine testing**. Stuttgart: MAHLE GmBH, 2012. p. 115-268.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

SCHIMITT, E.; LANGE, E. **Pistons and engine testing.** Stuttgart: MAHLE GmBH, 2012.

SCHWAB, W. Piston cooling. *In*: SCHIMITT, E.; LANGE, E (ed.). **Pistons and engine testing**. Stuttgart: MAHLE GmBH, 2012. p. 83-105.

WERKMANN, M. Simulation of piston operational fatigue strength FEA. *In*: SCHIMITT, E.; LANGE, E (ed.). **Pistons and engine testing**. Stuttgart: MAHLE GmBH, 2012. p. 37-53.