

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

KATIA FERNANDA DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE PINTURA NA
DUREZA E RESISTÊNCIA MECÂNICA DA LIGA DE ALUMÍNIO A356**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

KATIA FERNANDA DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE PINTURA NA
DUREZA E RESISTÊNCIA MECÂNICA DA LIGA DE ALUMÍNIO A356**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE PINTURA NA DUREZA E RESISTÊNCIA MECÂNICA DA LIGA DE ALUMÍNIO A356

por

KATIA FERNANDA DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 8 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui
Orientador

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos que me deram apoio e tiveram paciência nesta minha longa jornada até a finalização do meu trabalho de conclusão de curso.

A Deus, que me abençoou com todas as graças recebidas durante minha vida e, principalmente, durante meu período acadêmico.

Ao meu professor e orientador Dr. Roger Navarro Verastegui, que sempre se prontificou a me ajudar, mesmo nos momentos de pouca esperança.

Aos professores Dr. Luciano Augusto Lourençato e Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin que, dadas as circunstâncias, aceitaram o meu convite para comporem a banca de defesa.

À minha mãe, Joceli, que nunca duvidou da minha capacidade e sempre me incentivou.

Aos meus amigos, em especial ao Henrique e Gabriel, que ao longo de toda a faculdade estiveram ao meu lado.

À UTFPR, que me acolheu ainda menina e me tornou uma engenheira mecânica.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização e finalização desta pesquisa.

RESUMO

DA SILVA, Katia Fernanda. **Análise da Influência do Processo de Pintura na Dureza e Resistência Mecânica da Liga de Alumínio A356**. 2018. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

As características únicas que o alumínio, metal em maior abundância no mundo, apresenta, é um grande atrativo, principalmente para a indústria automotiva, pois apresenta boa resistência à corrosão, boa condutividade térmica, baixa densidade e alta capacidade de absorção de energia. Assim, o principal objetivo deste trabalho é mostrar a influência do processo de pintura nas ligas de alumínio tratáveis termicamente, através da coleta de uma amostra da liga A356, onde foram realizados experimentos a fim de evidenciar possíveis mudanças nas propriedades após o processo de pintura, verificando a influência do mesmo em suas propriedades mecânicas. Após tal processo constatou-se que houveram alterações em suas propriedades mecânicas, com 30% de acréscimo em sua resistência à tração e 27% de decréscimo em seu alongamento.

Palavras-chave: A356-T6, Pintura Eletrolítica, Dureza, Resistência à Tração, Alumínio.

ABSTRACT

DA SILVA, Katia Fernanda. **Influence Analysis of the Painting Process on Hardness and Mechanical Properties of the Aluminum Alloy A356**. 2018. 32 p. Final Course Study (Graduation in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The unique characteristics that aluminum, the most abundant metal in the world, presents, is a great attractive, especially for the automotive industry, because it presents good resistance to corrosion, great thermal conductivity, low density and high capacity of energy absorption. Thus, the main issue of this work is to show the influence that the painting process can have in the thermal tractable alloys, through the collection of a A356-T6 alloy sample, where experiments were carried out in order to show possible changes in its properties after the painting process, evidencing the influence on its mechanical characteristics. After this process, it was concluded that the process causes changes in its mechanical properties, with 30% of its tensile strength increased and 27% of its elongation decreased.

Keywords: A356-T6. Electrolytic Painting. Hardness, Tensile Strength, Aluminum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais elementos de liga e suas combinações	13
Figura 2 - Desenho esquemático do processo de Fundição a Baixa Pressão	17
Figura 3 - Desenho esquemático do comportamento dos precipitados.....	20
Figura 4 - Interface Homem-Máquina do Processo de Solubilização	22
Figura 5 - Interface Homem-Máquina no Forno de Envelhecimento	23
Figura 6 - Interface homem-máquina no processo de pintura.....	24
Figura 7 - Perfil de dureza antes do Processo de Pintura	28
Figura 8 - Perfil de dureza após o Processo de Pintura	28
Figura 9 - Valores de Dureza Brinell (HB)	29
Quadro 1 - Principais elementos de liga em ligas fundidas e sua nomenclatura.....	14
Quadro 2 - Estimativa de perda de tinta durante a aplicação.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de elemento de liga na liga A356.0	15
Tabela 2 - Porcentagem nominal de impurezas na liga A356.0	15
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga A356.0 sem passar por tratamento térmico controlado e após tratamento térmico T6	16
Tabela 4 - Composição química da amostra	25
Tabela 5 - Impurezas da Liga A356 Amostrada	25
Tabela 6 - Resultados de resistência à tração dos Corpos de Prova ensaiados (N/mm ²)	26
Tabela 7 - Resultados de resistência ao escoamento dos Corpos de Prova ensaiados (N/mm ²)	27
Tabela 8 - Resultados de alongamento dos Corpos de Prova ensaiados (%)	27
Tabela 9 - Valores de Dureza Brinell (HB)	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVO GERAL	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO	11
2.1.1 Liga A356.0	14
2.2 FUNDIÇÃO A BAIXA PRESSÃO	16
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO	17
2.3.1 Endurecimento por Precipitação	19
2.4 PINTURA EM ALUMÍNIO	20
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	25
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	26
4.3 PERFIL DE DUREZA	28
5 CONCLUSÃO	30

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Abal, em 1855, na exposição de Paris, Deville mostrou o primeiro lingote de alumínio, e seu processo de isolamento foi conhecido publicamente, processo este que tornou possível o surgimento da indústria do alumínio. No Brasil, mais especificamente em Ouro Preto (MG), o primeiro lingote de alumínio foi produzido apenas em 1945, na fábrica da Elquisa.

As características únicas que o alumínio e suas ligas apresentam faz com que este seja um dos mais versáteis e atrativos materiais para uma grande gama de aplicação. As ligas de alumínio estão em segundo lugar em uso estrutural, perdendo apenas para o aço, segundo a ABM (Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração).

Pode ser combinado com mais de 100 elementos, ainda deixando de lado elementos raros ou tóxicos, milhões de ligas úteis podem ser combinadas, segundo Hatch et al. (1984).

Algumas destas ligas são tratáveis termicamente, a fim de induzir o endurecimento por precipitação, chamado envelhecimento, segundo Kaufman (2000). Através deste fenômeno pode-se ter propriedades mecânicas diferentes com um mesmo material.

Porém, em processos industriais onde o uso de calor se dá também em outras etapas, como no processo de polimerização da pintura, e não só no tratamento térmico do alumínio, algumas alterações não-desejadas são observadas nas propriedades do material. Assim, se faz importante saber qual a influência dos demais processos, para levá-los em consideração no planejamento da linha de produção (Verran, Batista, 2015).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência do processo de pintura nas propriedades mecânicas da liga de alumínio A356.0.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja alcançado, alguns objetivos específicos foram traçados, a fim de nortear o trabalho. São eles:

- Investigar a influência da temperatura de cura do acabamento superficial nas propriedades mecânicas e microestrutura da liga de alumínio A356, termicamente tratável, através de ensaios destrutivos de tração e dureza.
- Avaliar a composição da liga de alumínio A356 através de Espectrometria Óptica.
- Elaborar um perfil de dureza do material antes e após o processo completo de pintura.
- Identificar as causas e propor métodos para evitar a ocorrência da influência do processo de pintura das propriedades da liga de alumínio A356.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO

Para melhor entendimento na prática, faz-se importante a abordagem teórica do assunto em um primeiro momento, onde serão explicados conceitos e métodos de análise que serão empregados posteriormente.

Segundo Kaufman (2000), entre as características marcantes e desejáveis, de acordo com da aplicação do alumínio, estão:

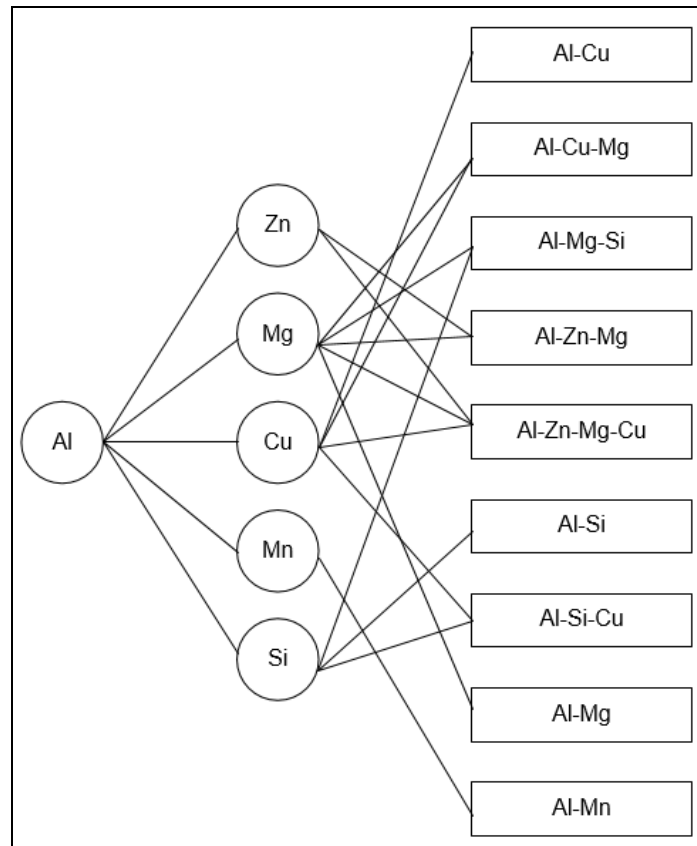
- **Baixa densidade:** o alumínio e suas ligas apresenta densidade relativamente baixa quando comparado a outros metais largamente utilizados na indústria, como o ferro, por exemplo. O alumínio apresenta uma densidade que varia de 2,56g/cm³ quando fundido a 2,70g/cm³ quando laminado, enquanto o ferro, em geral, apresenta densidade 7,87g/cm³, de acordo com a tabela de densidades disponibilizada pela UFU – Universidade Federal de Uberlândia.
- **Resistência à corrosão:** devido à camada de óxido de alumínio que naturalmente ocorre na superfície, as ligas de alumínio, de modo geral, apresentam ótima resistência à corrosão em diferentes atmosferas, sendo utilizadas até mesmo em ocasiões onde mantem contato direto com a água do mar, por exemplo.
- **Condutividade térmica:** apesar de seu baixo ponto de fusão para um metal (aprox. 535°C), o alumínio e suas ligas aguentam exposição ao calor devido à sua boa condutividade térmica.
- **Condutividade elétrica:** O alumínio puro e algumas de suas ligas são excepcionais condutores de eletricidade, perdendo apenas para o cobre quando se trata de metais comuns.
- **Eficiência resistente:** A combinação da baixa densidade com sua resistência mecânica faz com que o alumínio e suas ligas apresente uma ótima eficiência na resistência mecânica, podendo ser um substituto para outros metais mais densos sem perda na capacidade de carregamento de carga.

- Capacidade de absorção de energia: Devido à grande variedade de ligas que pode-se obter com o alumínio, tem-se ligas de alumínio extremamente dúcteis, empregadas em situações de impacto crítico, porém há ligas com elevada dureza, ideais quando a deformação plástica não é desejada na estrutura.
- Trabalhabilidade: O alumínio e suas ligas são aplicáveis em diversos processos de fabricação, com destaque para a extrusão. Algumas ligas apresentam ótimo escoamento em moldes para fundição, tendo também ótima usinabilidade. Com a escolha da técnica certa (TIG/MIG), apresentam também ótima soldabilidade.
- Reciclagem: O alumínio e suas ligas estão entre os materiais com maior facilidade de reciclagem e sem perda de qualidade do material, podendo ser empregada para o mesmo fim que uma liga não-reciclada.

Ainda segundo Hatch et al. (1984), os elementos de liga são comumente adicionados para aumentar sua resistência mecânica. Para isso, dois métodos são mais comumente utilizados. Um deles se refere às ligas de endurecimento por trabalho a frio, onde elementos de liga são adicionados ao alumínio e o mesmo é submetido ao processo de conformação. O outro, método de endurecimento abordado neste trabalho, é o endurecimento por precipitação, onde os elementos de liga são dispersos em uma solução sólida onde os mesmos formam partículas precipitadas dentro da matriz de alumínio.

A figura 1 mostra algumas das mais comuns combinações de elementos de liga.

Figura 1 - Principais elementos de liga e suas combinações



Fonte: John E. Hatch, 1984. (Adaptado)

Visto as variações existentes entre as ligas de alumínio e sua aplicabilidade, faz-se necessário uma padronização e designação específica de acordo com a composição das mesmas, de forma a facilitar a utilização pelas indústrias de transformação.

De acordo com Kaufman (2000), o sistema de designação para ligas de alumínio forjadas foi adotado em 1955, sendo o sistema de designação para ligas fundidas desenvolvido um pouco depois. Considerando uma abordagem focada ao tema do trabalho, a explanação se aterá apenas a designação para ligas fundidas, utilizada nesse estudo.

A nomenclatura das ligas fundidas se dá com quatro dígitos, o primeiro especificando o maior constituinte da mesma. Diferente das ligas forjadas, onde os quatro dígitos são colocados de maneira contínua, para as fundidas tem-se um ponto entre o terceiro e o quarto dígito, diferenciando assim uma designação da

outra. Na tabela 1 se tem os caracteres utilizados e o que cada um significa quando no primeiro dígito.

Quadro 1 - Principais elementos de liga em ligas fundidas e sua nomenclatura

Liga	Principal elemento de liga
1xx.x	Alumínio puro, 99.00% max
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silício, com cobre e/ou magnésio adicionado
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
7xx.x	Zinco
8xx.x	Titânio
9xx.x	Outros elementos
6xx.x	Série inutilizada

Fonte: Kaufman; 2000. (Traduzido)

Seguindo, os segundo e terceiro dígitos identificam a liga específica, ou, para a liga 1xx.x, sua pureza. Essa especificação se dá pelo elemento de maior porcentagem em sequência

O quarto e último dígito indica a forma do produto: xxx.0 indica fundido e xxx.1 indica lingote, tendo limites de elementos de liga bem próximos àqueles dos fundidos. O quarto dígito xxx.2 pode ser utilizado para indicar que o lingote tem limites de elementos de liga diferentes daqueles do final xxx.1, normalmente sendo limites mais específicos, com menor variação.

A letra que antecede a designação numérica indica uma modificação da liga original ou um limite específico de impureza.

2.1.1 Liga A356.0

Para a liga utilizada nesse estudo, tem-se os seguintes elementos de liga e quantidades, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Porcentagem de elemento de liga na liga A356.0

Liga	Silício	Magnésio
A356.0	7.0%	0.35%

Fonte: Kaufman, J Gilbert; 2000. (Traduzido)

As combinações desses dois elementos de liga com o alumínio fazem com que a liga A356.0 seja uma liga termicamente tratável. Isto porque, em uma solução supersaturada com esses elementos presentes, em ambientes com temperaturas superiores à 150°C, aglomerados de Mg e Si precipitam na matriz de alumínio, formando uma seção quase binária com a fase Mg₂Si, resultando em maior resistência mecânica e excelente resistência a corrosão (Kaufman, 2000).

Esta nomenclatura, com a letra A precedendo os números, indica que a liga original tem alguma modificação ou limite específico de pureza. Neste caso, um dos limites específicos de pureza é o do elemento ferro. Segundo Hatch (1984), um máximo de 0,2% de ferro é estipulado para ligas de Alumínio-Silício-Magnésio onde se procura uma combinação otimizada entre ductilidade e resistência mecânica, visto que o ferro se combina com outros elementos da liga para formar compostos fragilizadores, que acabam por gerar pontos de tensão.

Hatch (1984) traz, no capítulo 8 do livro Aluminum Properties and Physical Metallurgy, os seguintes valores nominais aceitáveis para a composição química da liga A356.0, dispostos na tabela 2, abaixo.

Tabela 2 - Porcentagem nominal de impurezas na liga A356.0

Elemento	Si	Fe	Cu	Mg	Zn
%	7,0	<0,20	<0,20	0,35	<0,10

Fonte: Hatch, John E.; 1984. (Adaptado)

Na tabela 3, pode-se observar a diferença nas propriedades mecânicas da liga A356.0 quando sem tratamento térmico controlado (F) e após tratamento térmico T6, que será explanado adiante.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga A356.0 sem passar por tratamento térmico controlado e após tratamento térmico T6

Processo de Fundição	Liga-Tratamento térmico	Tensão Máxima, N/mm ²	Resistência ao Escoamento, N/mm ²	Alongamento, %	Dureza Brinell, 500kgf/10mm	Módulo de Elasticidade, GPa
Molde Permanente	A356.0-F	179,3	124,1	8	-	72.400
	A356.0-T6	282,7	206,8	12	80	72.400

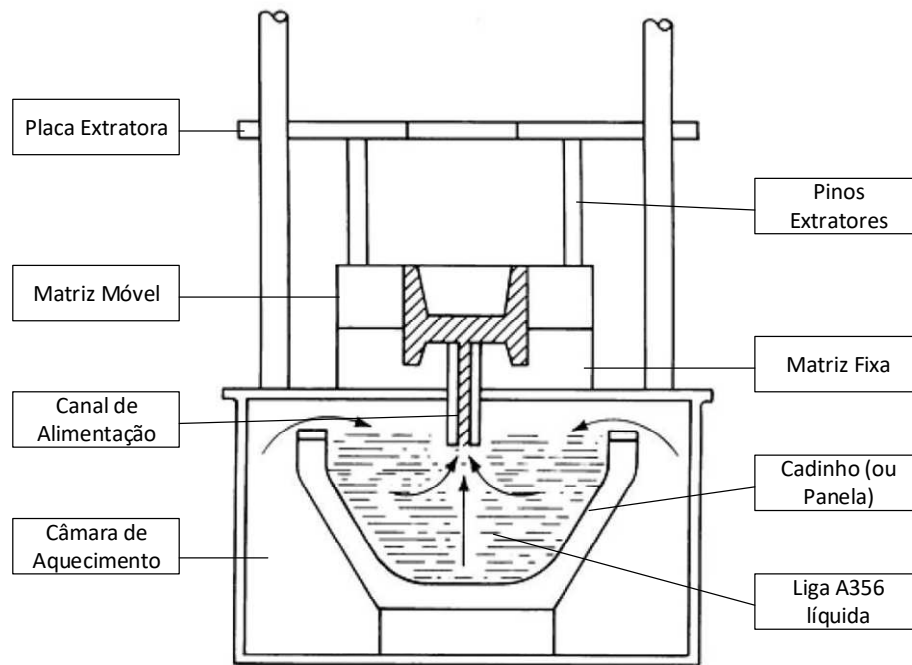
Fonte: Kaufman, J Gilbert; 2000. (Adaptado)

Analisando os dados da tabela acima, é possível observar um aumento significativo na tensão máxima, na dureza e também na resistência ao escoamento com o emprego do tratamento térmico T6. Seguiremos com uma breve explicação dos tratamentos térmicos mais adiante, focando no tratamento T6, aplicado no material estudado. Antes disso, é importante salientar algumas peculiaridades quanto ao modo de obtenção das amostras, que foram fundidas por fundição à baixa pressão.

2.2 FUNDIÇÃO A BAIXA PRESSÃO

Segundo Kaufman (2000), o processo de fundição a baixa pressão é amplamente utilizado principalmente no ramo automotivo, com o emprego de ligas leves de alumínio e magnésio. Essa utilização se dá pelas suas vantagens como, por exemplo, preenchimento uniforme do molde e ótima capacidade de alimentação do sistema. De acordo com a definição do ASM Handbook, no processo de fundição a baixa pressão o molde, permanente ou não, é posicionado acima do reservatório de metal líquido. Um canal se estende do molde até o metal líquido. O preenchimento do molde se dá pela pressurização do líquido fazendo com que o mesmo suba pelo canal e preencha toda a cavidade do molde. Segundo Liu et al. (2015), este processo é facilmente automatizado e apresenta rápidas taxas de solidificação, resultando em fundidos com grãos mais finos e propriedades mecânicas melhoradas. Na figura 2, tem-se o desenho esquemático do processo de fundição descrito.

Figura 2 - Desenho esquemático do processo de Fundição a Baixa Pressão



Fonte: Rooy; 1988. (Adaptado)

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

No caso das ligas tratáveis termicamente, em especial a A356.0, objeto desse trabalho, o material pode se beneficiar significativamente no que diz respeito às suas propriedades mecânicas. Alguns tipos de tratamento térmico são geralmente empregados em ligas fundidas, a seguir será explicado sucintamente cada um e sua designação (Kaufman, 2000).

- **F:** Essa designação é usada para produtos fundidos por qualquer processo de fundição, sem posterior tratamento térmico ou mecânico. Mais comum para ligas fundidas do que forjadas, sendo comum a publicação de suas propriedades mecânicas, considerando que o material foi fundido e esfriado a temperatura ambiente.

- **O:** Essa designação é apropriada quando o material foi apenas recozido (colocado a uma alta temperatura para estabilização ou recristalização para

remover os efeitos de ciclos térmicos durante a fundição ou tratamentos térmicos posteriores) a fim de reduzir sua resistência mecânica e aumentar sua ductilidade. Além disso, provê uma boa estabilidade dimensional à peça.

• T: A designação T é aplicada para ligas que passaram por processo de solubilização, seguido por têmpera e envelhecimento natural ou artificial. O T, quando utilizado, é seguido por um número, que indica os processos específicos que foram aplicados no tratamento. São eles:

- T4, que indica que a liga fundida passou por um processo de solubilização seguida de envelhecimento natural (a temperatura ambiente) até sua condição estável.
- T5 indica que o fundido foi resfriado do processo de fundição e então artificialmente envelhecido (por exemplo, em forno). O envelhecimento artificial consiste em repousar o fundido em uma temperatura ideal e por tempo suficiente (ex: 8h a 175°C) para permitir que os precipitados tomem lugar.
- T6, processo empregado nesse estudo, indica que o fundido foi solubilizado e envelhecido artificialmente a fim de atingir o máximo de precipitados. Isso resulta em alta resistência com ductilidade adequada e estabilidade dimensional e de propriedades.
- T7 indica que o processo foi solubilizado e superenvelhecido artificialmente. Esse tratamento provê alta resistência mecânica com alta ductilidade, além da estabilidade de propriedades e dimensão.

Um ponto muito importante a ser levado em consideração quando se fala de tratamento térmico, é a importância do controle do processo e do produto tratado. Segundo Liu et al. (2015), as especificações devem ser sempre controladas de acordo com o desenho ou documentos de controle, a fim de chegar ao resultado esperado.

Deve a isso a importância e motivação deste trabalho, visto que o tempo e temperatura em que a peça é submetida durante o processo de cura da pintura pode influenciar no controle das propriedades mecânicas.

2.3.1 Endurecimento por Precipitação

Como o objetivo deste estudo se baseia na influência da temperatura na microestrutura e dureza do alumínio A356, faz-se importante destacar o fenômeno de endurecimento por precipitação, que é o que acontece quando ligas de alumínio tratáveis termicamente são submetidas a temperaturas superiores a 150°C, em geral.

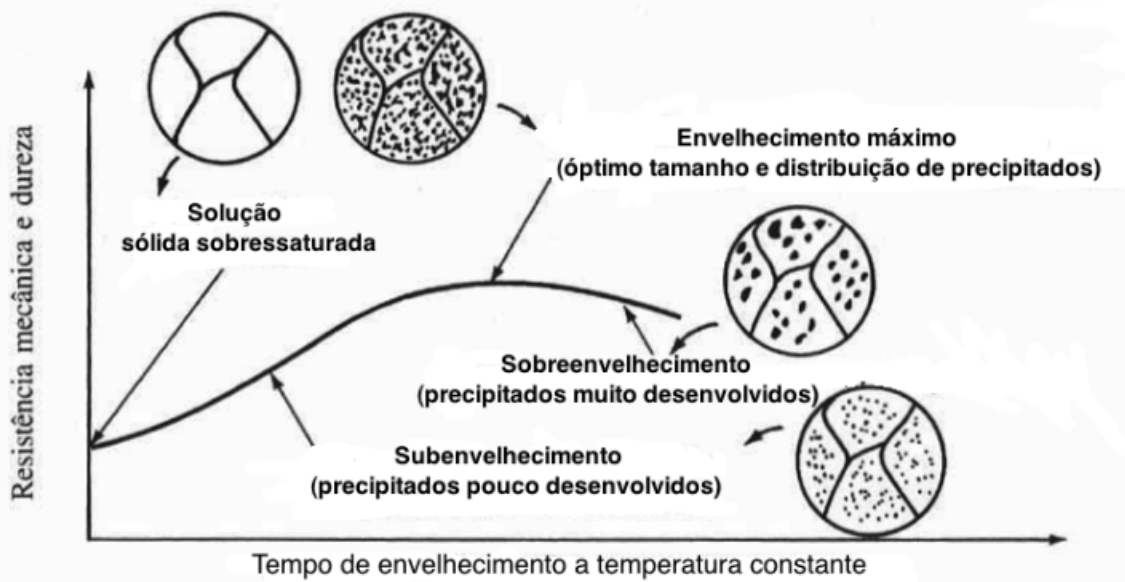
Segundo o ASM Handbook, uma liga termicamente tratável ganha esta terminologia devido à sua composição química ser composta por sistemas quaternários ou ternários, com solutos que formam precipitações quando submetidos à uma temperatura específica. No caso da liga em estudo, tem-se a presença, além do alumínio, do silício e magnésio, que, em atmosfera acima de 150°C, precipitam e formam regiões ricas em Mg_2Si na matriz de alumínio. Estes precipitados, juntamente com o alumínio, formam uma estrutura quase binária com zonas de alumínio e zonas ricas em soluto (Martins, 2008).

Este processo pode ocorrer de maneira natural, sem submissão da liga a temperaturas superiores a 150°C. Este é o chamado envelhecimento natural do alumínio (Maia, 2012).

Em escalas industriais, o envelhecimento natural não se faz aplicável. Para isso, é necessário lançar mão de estratégias que acelerem este processo.

O envelhecimento artificial, precedido pela solubilização, confere à liga A356 maior resistência mecânica e dureza, quando comparada à sua liga não tratada (Kaufman, 2000). A solubilização se faz importante para que a solução sólida a ser precipitada seja homogeneizada, afim de evitar zonas heterogêneas nos produtos (Maia, 2012). Na figura 3, a seguir, pode-se observar, esquematicamente, o comportamento dos solutos na matriz de alumínio durante o processo de envelhecimento.

Figura 3 - Desenho esquemático do comportamento dos precipitados



Fonte: Maia, 2012.

Existem situações onde o emprego de temperaturas superiores a 150°C se faz necessário, apesar de não visar a alteração nas propriedades mecânicas do material. Uma dessas situações, tema deste trabalho, é o processo de cura da pintura em peças automotivas.

2.4 PINTURA EM ALUMÍNIO

Existem dois processos de pintura largamente utilizados quando se fala de alumínio: o processo de pintura pó e o processo de pintura líquida, ambos com aplicação eletrostática e polimerização por adição, ou temperatura. Nas amostras utilizadas para análise nesse estudo, foram aplicados os dois processos, como será melhor explanado no próximo capítulo. Algumas definições do processo se fazem interessantes nesse momento.

Segundo a WEG, no processo de pintura convencional, por aerossol, muitas são as perdas de matéria-prima (tinta) no processo, devido a sua grande dispersão durante a aplicação. No quadro 2, na próxima página, tem-se uma comparação de perdas estimadas de acordo com cada aplicação.

Quadro 2 - Estimativa de perda de tinta durante a aplicação

Método de Aplicação	Perda de Tinta
Convencional	20 a 40%
"Air Less"	10 a 20%
Eletrostático	05 a 15%
Imersão	05 a 08%
Pincel ou Rolo	04 a 08%

Fonte: WEG Tintas; 2013.

Como se pode perceber pelos percentuais de perda de tinta, muito pode ser evitado carregando eletricamente as partículas de tinta com uma corrente inversa à da superfície a ser pintada, fazendo com que a tinta seja atraída pela superfície e se fixe devido a atração eletrostática.

Ainda segundo a fabricante WEG Tintas, além de evitar perdas desnecessárias de tinta, a pintura eletrostática, como é conhecido esse processo, garante uma camada de cobertura mais uniforme, além de evitar escorrimentos de tinta, quando a superfície favorece esse tipo de defeito.

Como se sabe, o alumínio é um bom condutor, fazendo com que esse tipo de pintura seja extremamente favorável e de fácil aplicação.

Para polimerização por temperatura, como é o caso deste estudo, a fabricante de tintas WEG indica os seguintes tempos e temperaturas:

- Primer: primeira camada, à base de resina epóxi-poliéster, com propriedade protetiva, deve ser polimerizada à 180°C por 10 min.
- Base Coat: segunda camada, com propriedade decorativa, à base de resina poliéster, melamina e pigmentos de alumínio. Polimerização à 150°C por 15 min.
- Verniz: Terceira camada, a base de resina poliéster, aplicação em pó, visa proteger contra radiação UV e intempéries. Condição de polimerização: 200°C por 10 min.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para o experimento, foi acompanhado o processo de fabricação em uma empresa do ramo automotivo, localizada em Vinhedo/SP.

A obtenção da amostra, por fundição à baixa pressão, se deu sob controles padronizados de produção, com acompanhamento da autora.

Após a fundição, a mesma foi submetida ao processo de solubilização, para dissolução de fases e homogeneização dos solutos ao longo da matriz de alumínio.

Para isso, a amostra foi submetida a uma temperatura de 535°C por 288 minutos, seguido de um período de resfriamento de 2 minutos em água a 74°C (temperatura nominal: 80°C ± 15°C). Na figura 4, pode-se observar a interface homem-máquina para controle dos parâmetros de processo de solubilização, onde se pode controlar o tempo de processo no forno, tempo entre forno e tanque de resfriamento e tempo de imersão em água, além de contar com comandos de recirculação da água do tanque e exaustor de ar do forno, a fim de controlar a temperatura dos mesmos.

Figura 4 - Interface Homem-Máquina do Processo de Solubilização



Fonte: Autoria Própria; 2018.

Depois de solubilizada, a amostra é transferida para o forno de envelhecimento artificial, onde permanece por 154 minutos à temperatura de 160°C. A temperatura é monitorada por termopares independentes e também pelo sistema de controle do processo, que pode ser visto na figura 5.

Figura 5 - Interface Homem-Máquina no Forno de Envelhecimento



Fonte: Autoria Própria; 2018.

Após o processo de envelhecimento artificial, partes da amostra foram retiradas para a análise pré processo de pintura, enquanto o restante da amostra seguiu para o próximo e último processo de produção, aplicação e polimerização de tinta para acabamento superficial.

Neste processo, apesar das múltiplas variáveis que o compõe, como características do banho de limpeza, composição de primer, tinta e verniz, entre outros, é justificável que, neste momento, seja válido discorrer apenas sobre o que diz respeito à adição de temperatura na amostra, visto que este é o objeto de pesquisa do trabalho.

Na tabela 3, disposta abaixo, tem-se as temperaturas e tempo de exposição para cada etapa do processo de pintura.

Tabela 3 - Temperaturas e Tempos de Exposição Durante o Processo de Pintura

Etapa	Lavagem/ Secagem	Primer Pó	Base Coat	Verniz
Temperatura (°C)	180	230	200	190
Tempo (min)	10	15	15	12

Fonte: Autoria Própria, 2018.

As temperaturas indicadas na tabela 3 foram obtidas através da interface homem-máquina para controle do processo, indicada na figura 6.

Figura 6 - Interface homem-máquina no processo de pintura



Fonte: Autoria Própria; 2018.

Finalizado o processo de pintura, novas partes foram retiradas da amostra e deu-se início à análise das propriedades.

Para isso:

- Uma parte da amostra foi retirada antes da pintura e preparada para análise da composição química com o auxílio do espectrômetro Bruker Q4 TASMEN;
- Perfis da amostra foram retirados para análise de dureza Brinell (antes e após o processo de pintura), através do Durômetro Universal DT;
- Corpos de prova cilíndricos com dimensão normalizada, segundo ABNT E8M, de 6mm de diâmetro por 30mm de comprimento útil foram usinados com o auxílio de um torno CNC e ensaiados pela Máquina Instron de Tração série 2300 (antes e após a pintura), cuja carga, tensão e deformação serão evidenciados posteriormente, nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos corpos de provas e análises descritas no capítulo anterior, obteve-se os seguintes resultados.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A tabela 4, a seguir, expõe a composição química da amostra coletada:

Tabela 4 - Composição química da amostra

Elementos	Valor encontrado (%)
Si	6.7200
Mg	0.2260
Ti	0.1300
Mn	0.0020
Sr	0.0077
AL	92.6400

Fonte: Autoria Própria, 2018.

No processo de fundição algumas impurezas são permitidas no material, como especificado anteriormente por Kaufman (2000). Na tabela 5, a seguir, tem-se as porcentagens de impurezas encontradas na análise de composição química da amostra.

Tabela 5 - Impurezas da Liga A356 Amostrada

Elementos	Valor encontrado (%)
Cu	0.0060
Fe	0.1640
Zn	0.0290
Ca	0.0007
Outros Individual	0.0201
Outros total	0.0545

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Analisando a composição química da amostra, vê-se que, apesar das impurezas existirem de modo significativo, como a presença do elemento Fe em 0,16%, ainda assim sua composição está dentro do aceitável pois, segundo Hatch et al. (1984), o ferro, combinando-se com outros elementos de liga, forma precipitados fragilizantes na matriz de alumínio, aumentando os pontos de tensão e diminuindo a ductilidade do material. Porém, apesar deste ser um ponto crítico no experimento, o que deve ser destacada é a presença dos elementos Si e Mg que, em altas temperaturas, formam precipitados que também fragilizam e aumentam a resistência mecânica da liga.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Usinados os corpos de prova retirados antes e após o processo de pintura, deu-se seguimento aos ensaios de tração, ensaio este que consiste em aplicar carga uniaxial no material, com acréscimos, até o momento de seu escoamento e posterior fratura.

Visto que, a partir deste ensaio, várias informações puderam ser coletadas, será disposto separadamente nas tabelas 6, 7 e 8 a seguir, a influência do processo de pintura em cada característica.

A tensões à tração encontradas em diferentes áreas da amostra podem ser observadas na tabela 6, a seguir.

Tabela 6 - Resultados de resistência à tração dos Corpos de Prova ensaiados (N/mm²)

Região	Aleta 1	Aleta 2	Média Aleta	Borda Ext. 1	Borda Ext. 2	Média Bordas Ext.	Borda Int. 1	Borda Int.2	Média Bordas Int.
Antes da Pintura	223.76	228.65	226.21	243.52	246.52	245.02	255.39	248.55	251.97
Após a Pintura	241.51	241.86	241.69	263.45	263.29	263.37	243.67	263.91	253.79
Acréscimo	8%	6%	7%	8%	7%	7%	-5%	6%	1%

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Quanto à tensão de escoamento, seus valores e acréscimo percentual antes e após o processo de pintura pode ser observado na tabela 7, a seguir.

Tabela 7 - Resultados de resistência ao escoamento dos Corpos de Prova ensaiados (N/mm²)

Região	Aleta 1	Aleta 2	Média Aleta	Borda Ext. 1	Borda Ext. 2	Média Bordas Ext.	Borda Int. 1	Borda Int.2	Média Bordas Int.
Antes da Pintura	147.3	152.78	150.04	159.56	158.25	158.91	159.57	160.4	159.99
Após a Pintura	187.53	187.47	187.5	206.09	201.7	203.9	204.07	201	202.54
Acréscimo	27%	23%	25%	29%	27%	28%	28%	25%	27%

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Pode-se observar na tabela 8 os resultados de alongamento.

Tabela 8 - Resultados de alongamento dos Corpos de Prova ensaiados (%)

Região	Aleta 1	Aleta 2	Média Aleta	Borda Ext. 1	Borda Ext. 2	Média Bordas Ext.	Borda Int. 1	Borda Int.2	Média Bordas Int.
Antes da Pintura	6.39	7.71	7.05	10.73	11.73	11.23	13.57	11.07	12.32
Após a Pintura	4.82	4.67	4.75	7.04	9.39	8.22	8.7	8.13	8.42
Acréscimo	-25%	-39%	-32%	-34%	-20%	-27%	-36%	-27%	-31%

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Analisando os dados obtidos, com foco na comparação de cada propriedade antes e após o processo em estudo, os resultados mostram que, de fato, a temperatura de cura das camadas de tinta protetiva e decorativa causam alterações nas propriedades mecânicas da amostra, visto que seu alongamento caiu em média 30% após o processo de pintura, enquanto sua resistência à tração e escoamento aumentou em média 5% e 27%, respectivamente.

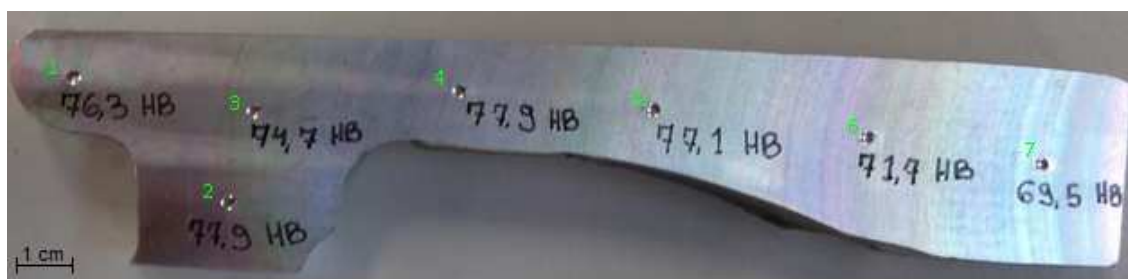
As ligas com endurecimento por precipitação crescem sua resistência mecânica e, conseqüentemente, sofrem uma queda na sua ductilidade, à medida que são impostas à ambientes que propiciam processo de envelhecimento. Visto que a temperatura das estufas de secagem de banho e polimerização das tintas protetivas são de temperatura similar à temperatura de envelhecimento da liga, supõe-se que a amostra evoluiu seu processo de envelhecimento durante o processo em questão.

4.3 PERFIL DE DUREZA

Para finalizar as análises, foram também coletados dados em um perfil de dureza Brinell antes do processo de pintura e outro após o mesmo.

Nas figuras 7 e 8 pode-se ler os valores de dureza encontrados através do durômetro.

Figura 7 - Perfil de dureza antes do Processo de Pintura



Fonte: Autoria Própria, 2018.

Figura 8 - Perfil de dureza após o Processo de Pintura



Fonte: Autoria Própria, 2018.

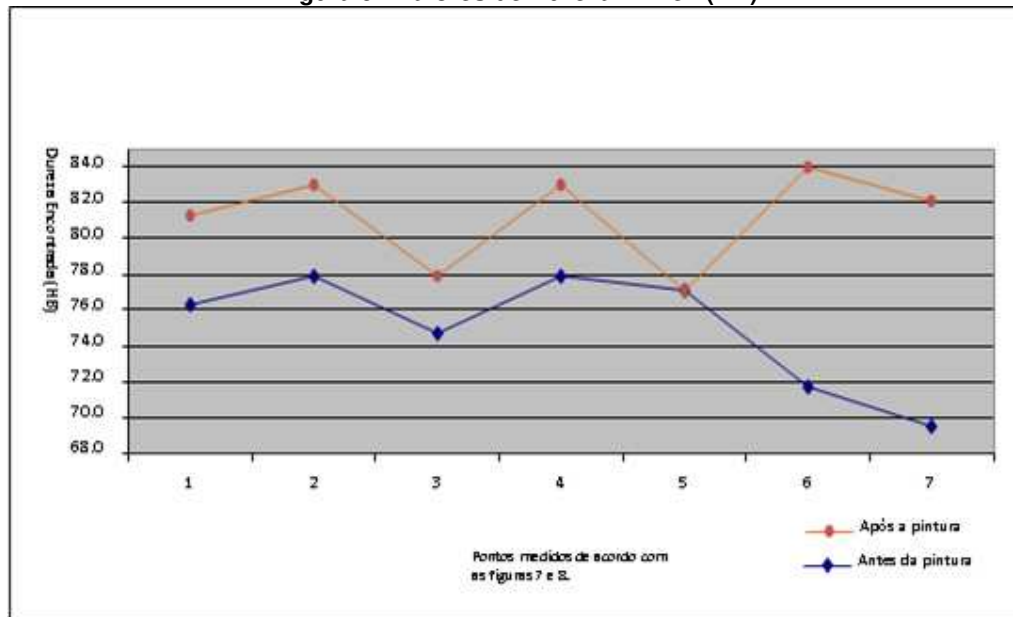
Com os valores encontrados, dispostos na tabela 9, o gráfico 1 foi plotado, a fim de melhor visualização dos dados.

Tabela 9 - Valores de Dureza Brinell (HB)

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	Média	
Dureza (HB)	Antes	76.3	77.9	74.7	77.9	77.1	71.7	69.5	75
	Após	81.3	83	77.9	83	77.1	84	82.1	81.2
Acréscimo	6.60%	6.50%	4.30%	6.50%	0.00%	17.20%	18.10%	8.50%	

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Figura 9 - Valores de Dureza Brinell (HB)



Fonte: Autoria Própria, 2018.

Como esperado, a dureza também sofreu um acréscimo após o processo de pintura, acréscimo este de 8,50% em média, por motivos análogos ao acréscimo na resistência à tração e escoamento e ao decréscimo na ductilidade da liga A356. Todos esses fenômenos se dão pela existência de mais precipitados de Mg_2Si à medida que a amostra foi sendo submetida a temperaturas propícias ao processo de endurecimento por precipitação.

5 CONCLUSÃO

Com a realização deste estudo visando a análise da influência do processo de pintura na dureza e resistência mecânica da liga de alumínio A356, pode-se chegar nas seguintes conclusões:

- O processo de envelhecimento empregado neste sistema de produção entrega, como resultado, peças subenvelhecidas, com precipitados de Mg_2Si subdesenvolvidos.
- O processo de polimerização por temperatura empregado na linha de pintura altera, de maneira não-desejada, as propriedades mecânicas da liga de alumínio A356, principalmente no que diz respeito à sua ductilidade, pois houve um decréscimo de 30%, em média, e à sua resistência ao escoamento, que cresceu em 27%, em média. Isto se dá devido ao fato de as temperaturas de polimerização das tintas de acabamento serem muito próximas à temperatura de envelhecimento do material.
- A dureza da liga A356 cresceu em 8,50% em média após o processo de pintura.
- Sugere-se, para fins experimentais, o emprego do acabamento com polimerização por adição, indicado como uma alternativa à cura por temperatura, a fim de verificar se é possível alcançar a mesma qualidade de acabamento, seja no aspecto protetivo como decorativo, sem prejudicar as características funcionais do produto.
- Sugere-se também para fins experimentais, um estudo específico para redução no tempo de envelhecimento propriamente dito, a fim de compensar a precipitação induzida pela estufa de polimerização da pintura.

REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **História do Alumínio**. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA MATERIAIS E MINERAÇÃO. **O Ferro e os Metais da Indústria**. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/quem-somos/historico/o-ferro-e-os-metais-da-industria/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- BOUGUILA, N.; COELHO, R.; NAVARRE, D.. **Electrostatic painting of insulating surfaces**. IEEE Transactions On Industry Applications, v. 29, n. 4, p.798-801, 1993. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi/10.1109/28.231997.
- HATCH, John E. **Aluminum Properties ad Physical Metallurgy**. Materials Park: ASM International, 1984. Cap. 6, p. 200-241.
- HATCH, John E. **Aluminum Properties ad Physical Metallurgy**. Materials Park: ASM International, 1984. Cap. 8, p. 320-350.
- KAUFMAN, J. G. **Introduction to Aluminum Alloys and Tempers**. Materials Park: Asm International, 2000. Cap. 1. p. 1-8.
- KAUFMAN, J. G. **Introduction to Aluminum Alloys and Tempers**. Materials Park: Asm International, 2000. Cap. 3. p. 23-37.
- KAUFMAN, J. G. **Introduction to Aluminum Alloys and Tempers**. Materials Park: Asm International, 2000. Cap. 4. p. 39-76.
- LIU, Shan-guang et al. **Characteristics of mold filling and entrainment of oxide film in low pressure casting of A356 alloy**. Materials Science And Engineering: A, v. 626, p.159-164, fev. 2015. doi/10.1016/j.msea.2014.12.058.

MAIA, A. M. P. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Porto, Outubro de 2012.

MARTINS, Margarida M. M. **Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais, Aveiro, 2008.

ROOY, Elwin L. **ASM Handbook: Vol 15 – Casting**. The Materials Information Company, 1988. Aluminum and Aluminum Alloys. p. 1622-1696.

SEGUNDO, E. H.; VERRAN, G. O.; BATISTA, G. M. Análise dos Efeitos dos Tratamento Térmicos de Solubilização e Envelhecimento Artificial Sobre a Microestrutura da Liga de Alumínio A356. **Revista Matéria**. Joinville (SC). v.20, n.04, p. 936-945, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Tabela de Densidade dos Materiais**. Disponível em: <<ftp://ftp.feq.ufu.br/claudio/densidade2.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

WEG, Tintas. **Pintura Industrial com Tintas Líquidas: Informações Técnicas Sobre Tintas Líquidas, Pintura Industrial e Manutenção Anticorrosiva**. 3. ed. Guaramirim: Weg Indústrias S.a. - Tintas, 2009. 111 p.