



Viviam Cintra de Alencastro Guimarães

**Metodologias e Tecnologias 4.0 para a
Fabricação Sustentável de Componentes
Mecânicos**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador : Ivan Fabio Mota de Menezes
Co–Orientador: Daniel Luiz de Mattos Nascimento

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

Agradecimentos

Primeiramente, sempre, com todo o amor e carinho do mundo, agradeço à minha família, que, desde o início, batalhou por minha felicidade e saúde e para me proporcionar a melhor educação possível.

Agradeço à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, por ter me acrescentado preciosa bagagem de conhecimentos essenciais ao meu desenvolvimento, não só como profissional da Engenharia, mas também como uma cidadã consciente. Agradeço, também, a todos os professores da graduação em Engenharia Mecânica.

Agradeço ao Instituto Tecgraf da PUC-Rio, por ter me concedido a oportunidade de realizar um estágio em 2017, que contribuiu para a minha formação enormemente. Por consequência desse estágio, estabeleci contato com o orientador, com o coorientador deste trabalho e com a MAN Latin America.

Agradeço, especialmente, à MAN Latin America e a Gustavo Borges Amorim. Seu envolvimento foi de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho e agradeço pela viabilidade de realizar estudo sobre um componente mecânico da linha Caminhões e Ônibus Volkswagen da MAN Latin America.

Agradeço ao professor Ivan Fabio Mota de Menezes, que me orientou na realização deste trabalho com muita paciência, atenção e respeito, disponibilizando-se sempre para tirar dúvidas e comprometendo-se com o aprimoramento do trabalho. Agradeço por suas críticas construtivas, transmitidas sempre com sabedoria e humildade.

Agradeço ao coorientador Daniel Luiz de Mattos Nascimento, que supervisionou o estágio realizado no Instituto Tecgraf e foi quem entrou em contato com a MAN Latin America, viabilizando, assim, a concepção deste Trabalho de Conclusão de Curso. Agradeço também por sua disponibilidade e engajamento no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço à Bruna Brito Freitas, professora e Vice-Coordenadora do Curso de Engenharia Metalúrgica no CEFET/RJ, por ter fornecido grande quantidade de conhecimento e material sobre as técnicas metalúrgicas e microfusão.

Resumo

Metodologias e Tecnologias 4.0 para a Fabricação Sustentável de Componentes Mecânicos

Este trabalho propõe uma metodologia para a fabricação de um componente mecânico do sistema de suspensão traseira do e-Delivery, um caminhão Volkswagen, elétrico, leve e de circulação urbana, desenvolvido pela MAN Latin America, em Resende - Rio de Janeiro. O objeto de estudo é um suporte de mola de suspensão composto de ferro fundido nodular GGG-40 e a estratégia de fabricação desenvolvida baseia-se na união de diferentes áreas de pesquisa e tecnologia: reciclagem, manufatura aditiva e microfusão.

Para a realização do trabalho, foram utilizados conhecimentos adquiridos nas disciplinas do ciclo profissional da Engenharia Mecânica, em especial, Processos de Fabricação e Materiais de Engenharia, e estudou-se diversas referências bibliográficas, todas as quais são indicadas ao longo do texto. O trabalho foi elaborado de forma a poder ser adaptado para a fabricação de outros tipos de componentes mecânicos, apoiando-se nos princípios da sustentabilidade e tendo como objetivo a sua possível inserção em um contexto futuro de economia circular.

Palavras-chave

Manufatura aditiva; PMMA; Indústria 4.0; microfusão; reciclagem metálica; sucata; sustentabilidade; processo de fabricação; suporte de mola; suspensão de caminhão; economia circular.

Abstract

Methodologies and 4.0 Technologies for the Sustainable Manufacturing of Mechanical Components

This work suggests a methodology for the manufacturing of a mechanical component, which is part of the rear suspension system of e-Delivery, a light Volkswagen electric truck developed for urban circulation by MAN Latin America, at Resende - Rio de Janeiro. The object of this study is a rear spring bracket made of nodular cast iron and the strategy developed for its manufacturing is based on the combination of different areas of research and technology: recycling, additive manufacturing and investment casting.

For the accomplishment of this work, one used knowledge gathered in various subjects during graduation in Mechanical Engineering, such as Manufacturing Processes and Engineering Materials, and, also, various bibliographic references were studied, all of which are indicated along the text. This work was developed in a way it can be adapted to the manufacturing of other mechanical components, aiming accordance with the concepts of sustainability and a possible future insertion in a context of circular economy.

Keywords

Additive Manufacturing; PMMA; Industry 4.0; Investment casting; metal recycling; waste; sustainability; Manufacturing Process; spring bracket; truck suspension; circular economy.

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivo do Trabalho	11
2	Fundamentos do Trabalho e Revisão Literária	12
2.1	Componente em Foco: O Suporte de Mola de Suspensão da VW	12
2.1.1	Função e Geometria do Suporte de Mola de Suspensão	13
2.1.2	Propriedades Mecânicas, Normas e Tratamentos Térmicos	16
2.1.3	Comportamento Mecânico e Fadiga no Suporte de Mola	20
2.2	A Microfusão como Processo de Fabricação	23
2.2.1	Fundição e Obtenção de Ferro Fundido	24
2.2.2	Descrição do Processo de Microfusão	25
2.2.3	Microfusão de Componentes Mecânicos	30
2.2.4	Microfusão e Reciclagem	33
2.3	Manufatura Aditiva do Modelo de Peça para Microfusão	34
2.3.1	Tipos de Manufatura Aditiva	34
2.3.2	Impressão 3D com PMMA	37
2.4	Reciclagem e Produção de Ferro Fundido Nodular GGG-40	40
2.4.1	Considerações sobre Reciclagem e o e-Delivery da VW	40
2.4.2	Reciclagem Metálica: Obtenção de Ferro e Elementos de Liga para o Ferro Fundido Nodular GGG-40	41
3	A Metodologia de Fabricação Proposta	46
3.1	Da Sucata Metálica para o Suporte de Mola de Suspensão	47
3.2	Manufatura Aditiva do Suporte de Mola e Corpos de Prova	49
3.3	Microfusão para o Suporte de Mola de Suspensão	51
3.4	Os Ensaios Mecânicos para Validação de Método	53
4	Considerações Finais	55
A	APÊNDICE	61

Lista de figuras

2.1	Caminhão da linha Leve e-Delivey da Volkswagen [34].	13
2.2	Suspensão de caminhão da linha Leve da Volkswagen [35].	14
2.3	Esquema de suspensão veicular com feixe de molas [36].	14
2.4	Exemplo de suporte de mola de suspensão em caminhão da Volkswagen [37].	15
2.5	Geometria de suporte de mola de suspensão traseira do e-Delivery, imagem disponibilizada pela MAN Latin America [28].	15
2.6	Categorização de ligas metálicas ferrosas [1].	16
2.7	Metalografia de um ferro fundido cinzento [1].	17
2.8	Capacidades de amortecimento vibracional para aços e ferros fundidos [47].	18
2.9	Fotomicrografia de um ferro fundido cinzento, à esquerda, e de um ferro fundido nodular, à direita [1].	18
2.10	Microestruturas obtidas por meio de taxas de resfriamento diversas dentro de uma mesma faixa de percentuais de carbono [1].	19
2.11	Simulação do suporte de mola e instalação do sensor S53. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].	21
2.12	Simulação do suporte de mola e instalação do sensor S56. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].	22
2.13	Teste veicular do suporte de mola e tensões médias máximas e mínimas relativas ao sensor S53 para diferentes condições de estrada. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].	22
2.14	Teste veicular do suporte de mola e tensões máximas e mínimas relativas ao sensor S56 para diferentes condições de estrada. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].	23
2.15	Exemplo de peças obtidas pelo processo de microfusão [38].	26
2.16	Fundição de estátuas de bronze com cera perdida na Antiguidade [39].	27
2.17	Etapas da microfusão com cera perdida [40].	28
2.18	Despejo de metal fundido dentro de vasos cerâmicos em processo de microfusão [41].	29
2.19	Microfusão com molde em PMMA [42].	30
2.20	Rugosidade superficial para diferentes tecnologias mecânicas [9].	31
2.21	Rugosidade superficial para diferentes tecnologias mecânicas [43].	32
2.22	Protótipo de componente em polímero produzido por impressão 3D [44].	32
2.23	Filamentos de PMMA para impressão 3D [45].	37
2.24	Impressão com PMMA em pó [46].	38
2.25	Dados do insumo de PMMA pulverizado fornecido pela marca Voxeljet de impressoras [29].	39

2.26	Dados de revestimento superficial de cera/epoxy para o modelo em PMMA [29].	39
2.27	Planta de reciclagem metálica com Shredder do Grupo Morita [22].	42
2.28	Planta de reciclagem metálica com Shredder do Grupo Morita em vista superior [22].	43
2.29	Fluxograma de reciclagem de metais da Planta Shredder do Grupo Morita [22].	44
2.30	Caracterização de resíduos de um triturador de sucata [24].	45
3.1	CAD do suporte de mola de suspensão da VW no Solidworks [28].	49
3.2	Vista superior do suporte de mola de suspensão no Solidworks [28].	50
3.3	Geometria e dimensões de corpos de prova para ensaio de tração.	50
3.4	À esquerda: árvore de cera para microfusão de corpos de prova [30]. À direita: exemplo de CAD de árvore a ser impressa para microfusão [31].	51
3.5	Tanque com lama cerâmica para revestimento [33].	52

Lista de tabelas

2.1	Elementos presentes na liga de ferro fundido nodular GGG-40.	18
2.2	Normas Técnicas ferro fundido nodular GGG-40.	19
2.3	Tipos de manufatura aditiva com insumo líquido ou em filamentos [14].	35
2.4	Tipos de manufatura aditiva com insumo em pó ou em lâminas sólidas [14].	36

*"Precisamos entender bem nosso lugar
Nesse mundo tão imenso
Na verdade somos tão pequenos
E queremos carregar tanto peso
Nos ombros e nos bolsos
Somos acumuladores constantes
De bens, de tralhas, de mágoas
Podíamos jogar mais coisa fora
Reciclar o lixo em vida nova
Somos importantes como peças
De uma complexa engrenagem universal
Mas olhando lá de cima
Somos só poeira, mínimos, formiguinhas
Sou importante naquilo que construo
Pro mundo
Naquilo que crio e deixo de legado
Porque todo o resto é perecível
Tudo em mim desaparecerá
Exceto a minha poesia. "*

— Andrea Boaventura, *Poeira Estelar*

1

Introdução

Nas cadeias produtivas atuais, ainda é comum a utilização de diversas tecnologias tradicionais de fabricação mecânica, como a fundição, a conformação e a usinagem. Além disso, a fabricação de peças de geometrias complexas, em diversos casos, tem sido otimizada pela evolução das máquinas de comando numérico computadorizado - CNCs. Somado a isso, atualmente, a manufatura aditiva, cada vez mais, destaca-se como processo de fabricação devido à possibilidade de produção de peças sofisticadas com qualidade superficial e precisão dimensional e, também, devido à eliminação de etapas - e custos associados - inerentes aos processos de fabricação tradicionais.

Visando unir os potenciais da manufatura aditiva com os ideais de sustentabilidade, este trabalho propõe uma metodologia para a fabricação de um componente mecânico, conectando-se a impressão 3D à reciclagem de metais sucataados, por meio das tecnologias já existentes da microfusão, tendo como objetivo principal a garantia das propriedades mecânicas e metrológicas necessárias ao produto final. Os princípios aqui descritos podem ser ampliados para a produção de diferentes peças, no entanto, este trabalho foca na proposta específica de fabricação de um suporte de mola de suspensão traseira pertencente ao projeto de caminhão elétrico e-Delivery, sendo desenvolvido e disponibilizado para estudo pela empresa MAN Latin America.

Neste trabalho são apresentadas, na primeira parte, as características e propriedades mecânicas do suporte de mola estudado e os fundamentos necessários à compreensão da proposta metodológica central deste documento, relativos à manufatura aditiva, à reciclagem de metais e às técnicas de microfusão. Estes três últimos conceitos são pilares que sustentam a segunda parte do trabalho, em que são apresentadas as metodologias e as tecnologias propostas para a fabricação do suporte de mola, que foram elaboradas a partir da pesquisa bibliográfica referenciada.

Considerando-se as características que o suporte de mola deve possuir, são explicitados, então, os testes e ensaios mecânicos necessários à validação da trajetória de produção proposta para o componente mecânico. Por fim, são realizadas algumas considerações sobre as possibilidades de inserção do conteúdo deste trabalho em um contexto de Indústria 4.0 com economia circular e são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

1.1

Motivação

A Indústria 4.0 é um novo conceito de organização industrial que combina as mais modernas tecnologias de informação e comunicação entre máquinas, como a computação em nuvem e a Internet das Coisas, com os conhecimentos, cada vez mais evoluídos, da automação da manufatura e da simulação computacional. Outro conceito de grande importância dentro do contexto da Indústria 4.0 é a manufatura aditiva. Esta é tema de diversas pesquisas e publicações científicas recentes e, juntamente à modelagem 3D de peças, permite grande flexibilidade na criação de produtos. Com a manufatura aditiva, é possível produzir formas relativamente sofisticadas para diferentes tipos de componentes.

Paralelamente aos avanços tecnológicos emergentes da Indústria 4.0, a sustentabilidade das cadeias produtivas torna-se, cada vez mais, uma necessidade econômica real, diante das questões socioambientais atuais e da crescente conscientização ambiental dos consumidores. Sendo assim, mostra-se verdadeira a relevância do desenvolvimento de metodologias e tecnologias de fabricação que combinem os conceitos da Indústria 4.0 com aqueles relativos à sustentabilidade produtiva - reciclagem, reutilização de materiais e redução do consumo irresponsável de recursos naturais.

1.2

Objetivo do Trabalho

O objetivo do trabalho é partir dos conhecimentos adquiridos ao longo das disciplinas da graduação em Engenharia Mecânica e da revisão da literatura para propor uma metodologia de fabricação para um determinado componente mecânico da suspensão traseira de um veículo, unificando-se os conhecimentos de: tecnologias modernas de microfusão; manufatura aditiva e modelagem 3D, associadas à Indústria 4.0; e reciclagem de sucata metálica.

O componente mecânico em foco neste trabalho é um modelo de suporte de mola de suspensão elaborado para um caminhão elétrico Volkswagen, ambos desenvolvidos pela MAN Latin America, a maior fabricante de caminhões e segunda maior de ônibus da América do Sul, situada em Resende, no Rio de Janeiro [28]. Um exemplar da peça foi disponibilizado para este estudo pela MAN Latin America, por intermédio do Instituto Tecgraf de Desenvolvimento de Software Técnico-Científico da PUC-Rio (Tecgraf/PUC-Rio).

2

Fundamentos do Trabalho e Revisão Literária

Antes de apresentar a metodologia desenvolvida para a fabricação do suporte de mola de suspensão de caminhão da MAN Latin America, cujas técnicas propostas são apresentadas no capítulo 3, é importante explicitar todos os conceitos, ideias e conhecimentos fundamentais que foram previamente acumulados e que impulsionaram a elaboração deste trabalho. Sendo assim, este capítulo é dividido em quatro partes, que descrevem informações relevantes sobre o suporte de mola estudado, sobre a microfusão como processo de fabricação, sobre a manufatura aditiva e sobre a reciclagem metálica.

Tais assuntos parecem ser, à primeira vista, temas bem distanciados entre si, mas a unificação deles é a essência da metodologia de fabricação aqui proposta. Fica claro, ao longo do trabalho, que a sua elaboração toca diferentes campos de estudo dentro da Engenharia Mecânica. Processos de Fabricação, Tecnologia Mecânica, Ciência e Tecnologia dos Materiais, Materiais de Engenharia, Comportamento Mecânico dos Materiais, Automação da Manufatura, Metrologia Dimensional, entre outras: este trabalho não poderia ter sido desenvolvido sem as instruções técnicas e científicas proporcionadas pelas disciplinas da grade curricular da Mecânica.

Outras disciplinas contribuíram de maneira menos direta para este trabalho, mas certamente não menos significativa, como Vibrações Mecânicas, Dinâmica de Corpos Rígidos, Mecânica dos Sólidos e Projeto de Sistemas Mecânicos. Além disso, a Ética Profissional, a Introdução à Engenharia Ambiental e todas as informações fornecidas, durante os anos de formação universitária na PUC-Rio, em prol da vida digna em sociedade e da preservação do meio ambiente, também foram substanciais para a busca de uma metodologia sustentável de fabricação para componentes mecânicos.

Dessa forma, a seguir, são apresentados os fundamentos do trabalho desenvolvido, as informações que foram fornecidas pela empresa projetista e desenvolvedora do modelo de suporte de mola em foco e as informações adquiridas a partir de pesquisa e revisão da literatura.

2.1

Componente em Foco: O Suporte de Mola de Suspensão da VW

Essa seção tem como função apresentar o componente mecânico estudado neste trabalho, o suporte de mola de suspensão de caminhão. Dessa forma, são apresentados tópicos explicativos referentes à função e à geometria do suporte

de mola, às suas propriedades mecânicas, às normas técnicas que regem sua fabricação e aos tratamentos térmicos envolvidos nesse processo.

2.1.1

Função e Geometria do Suporte de Mola de Suspensão

O suporte de mola estudado é um componente do sistema de suspensão traseira de um caminhão elétrico da MAN Latin America. O veículo, ainda sob testes, deve ser disponibilizado comercialmente até o ano 2020 e chama-se e-Delivery. Este é um caminhão da categoria leve, com massa de até 10 toneladas, cujo objetivo de produção é satisfazer a demanda existente por caminhões de entrega de fácil circulação em meio urbano, com a característica excepcional de apresentar emissão zero de compostos químicos poluentes na atmosfera.



Figura 2.1: Caminhão da linha Leve e-Delivery da Volkswagen [34].

Na Figura 2.1, observa-se o caminhão e-Delivery. Já na Figura 2.2, referente a outro caminhão do tipo Delivery da Volkswagen, é possível observar melhor a configuração do sistema de suspensão traseira escolhido pela empresa para ser utilizado nesses modelos de caminhão: suspensão com feixe de molas. Esse mesmo tipo de configuração de suspensão aparece no projeto do e-Delivery.

De maneira geral, existem vários tipos de sistemas de suspensão e a função principal deles é a manutenção da estabilidade vibracional do chassi do veículo diante de impactos e solavancos resultantes de irregularidades nas pistas. O sistema de suspensão também contribui para a manutenção do contato das rodas do veículo com a rodovia durante a sua circulação: quando uma irregularidade no solo faz o veículo se elevar, o próprio peso do veículo, sustentado pelas molas da suspensão, juntamente à força elástica das molas, tende a empurrar as rodas de volta para o contato com a pista.



Figura 2.2: Suspensão de caminhão da linha Leve da Volkswagen [35].

Dentre os diversos tipos de suspensão, é possível identificar três grandes grupos de acordo com seus elementos de rigidez: aqueles com molas helicoidais, aqueles com barra de torção e aqueles com feixe de molas. A utilização desse último é comum em caminhões devido à sua capacidade de suspender carregamentos pesados, sem que sejam prejudicadas as propriedades dinâmicas do sistema de suspensão por eventuais distorções de estrutura. O feixe de molas consiste de várias lâminas metálicas curvadas, dispostas umas sobre as outras, que são capazes de deslizar entre si e deformar-se quando sofrem variações de carregamento.

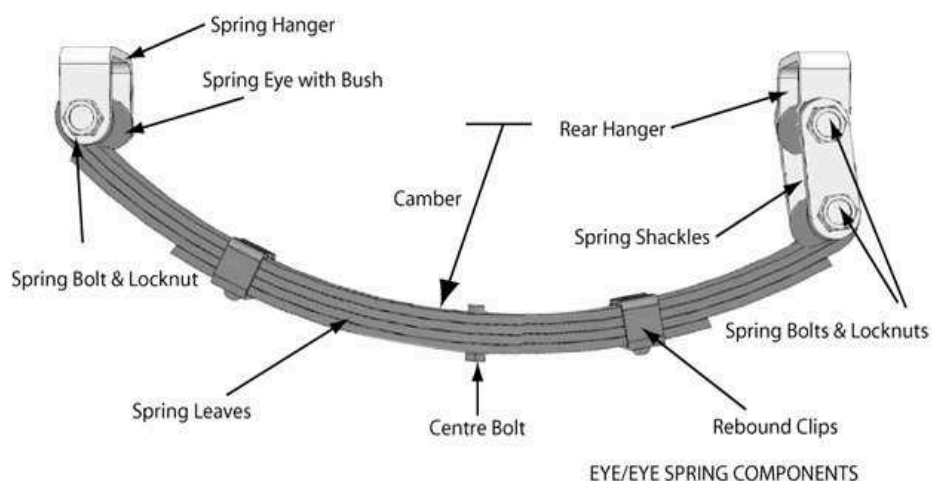


Figura 2.3: Esquema de suspensão veicular com feixe de molas [36].

No caso dos caminhões Delivery da VW, os feixes de molas traseiros fazem parte de sistemas de suspensão independentes. As lâminas de cada feixe são presas umas às outras por meio de braçadeiras. Além disso, as lâminas

são fixadas em seu centro ao eixo das rodas traseiras do veículo de maneira ortogonal e são fixadas em suas extremidades ao chassi por meio de suportes de mola. A Figura 2.3 mostra o esquema de uma configuração de feixes de mola, em que é possível identificar a localização do suporte de mola dentro do contexto do sistema de suspensão, sob o termo em inglês *shackle*.

O suporte de mola do sistema de suspensão traseiro de feixes de mola do caminhão e-Delivery deve ficar fixado ao chassi por meio de parafusos, de forma semelhante ao outro modelo de suporte de mola de caminhão Delivery da VW, mostrado na Figura 2.4. A Figura 2.5 refere-se ao projeto de suporte de mola traseiro específico do caminhão elétrico e-Delivery, foco deste trabalho.



Figura 2.4: Exemplo de suporte de mola de suspensão em caminhão da Volkswagen [37].

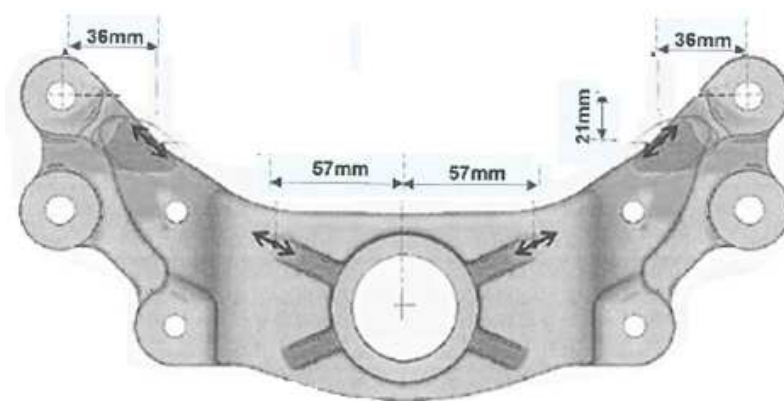


Figura 2.5: Geometria de suporte de mola de suspensão traseira do e-Delivery, imagem disponibilizada pela MAN Latin America [28].

2.1.2

Propriedades Mecânicas, Normas e Tratamentos Térmicos

O suporte de mola traseiro do e-Delivery já desenvolvido é fabricado a partir de ferro fundido cinzento com percentuais de magnésio, silício, enxofre e fósforo e, após tratamento térmico, a liga resultante é um ferro fundido nodular DIN 1693 GGG-40. Em Ciência e Engenharia de Materiais [1] (Callister, 2011), livro adotado na disciplina de Materiais de Engenharia, encontra-se uma série de informações relevantes para este trabalho sobre ferros fundidos, que são apresentadas ao longo desta seção.

A denominação ferro fundido refere-se a uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,14%p¹ que, comumente, apresentam também outros elementos de liga em baixos percentuais em sua constituição. Além disso, os pontos de fusão dos ferros fundidos são, de modo geral, mais baixos que os dos aços, ficando em torno de 1100°C a 1300°C, o que os torna propícios a processos de fundição. Na Figura 2.6, é possível ter uma visão geral da categorização das ligas metálicas e da situação dos ferros fundidos nesse contexto.

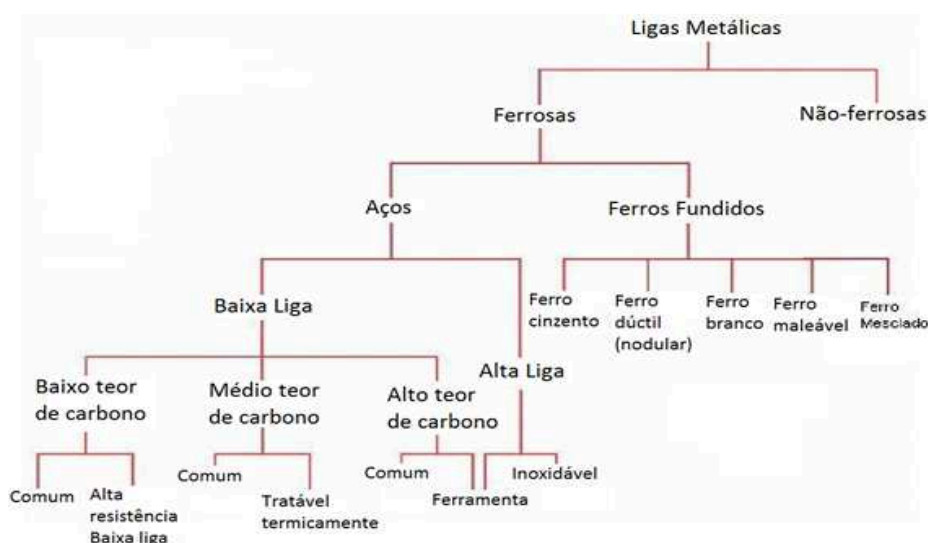


Figura 2.6: Categorização de ligas metálicas ferrosas [1].

Os ferros fundidos cinzentos têm esse nome devido à sua coloração após solidificação, derivada da presença, na sua microestrutura, de grafita: um mineral cinza que cresce dentro da matriz da liga ferrosa durante o processo de solidificação do material e cuja formação pode ser regulada por meio do controle de composição e de taxa de resfriamento da liga fundida.

¹A notação %p significa percentual em peso. Por exemplo, 2,14%p de carbono em uma barra metálica significa que 2,14% do peso total da barra é causado pela presença do elemento carbono.

A microestrutura dos ferros fundidos cinzentos influencia diretamente em suas propriedades mecânicas: a grafita em forma de flocos pontiagudos contribui para a presença de pontos de concentração de tensão que fragilizam o material solidificado e prejudicam sua resistência à tração. Por outro lado, sob compressão, o material se comporta de forma mais dúctil e resistente.

Na Figura 2.7 é possível observar uma fotomicrografia óptica típica de ferro fundido cinzento, em que existem flocos escuros do mineral grafita dispostos numa matriz de grãos de ferrita α - uma configuração cristalina cúbica de corpo centrado constituída de ferro puro.



Figura 2.7: Metalografia de um ferro fundido cinzento [1].

Os ferros fundidos cinzentos apresentam algumas características interessantes como: baixo custo de fabricação comparado a outras ligas metálicas e aços; elevada resistência ao desgaste; elevada fluidez quando em estado líquido, possibilitando a fundição de geometrias complexas ou com paredes finas; e baixa contração térmica após a solidificação do material, o que permite maior concordância entre a forma do ferro fundido obtida e aquela delimitada pelo molde.

Mais ainda, os ferros cinzentos são bons amortecedores de energia vibracional e por isso são utilizados na fabricação de diversos componentes mecânicos e de estruturas de bases de máquinas e equipamentos pesados. A Figura 2.8 apresenta um esquema, apenas para fins de comparação, das capacidades de amortecimento vibracional de diferentes ligas metálicas.

O acréscimo de elementos de liga no ferro fundido cinzento antes de sua solidificação controlada, pode proporcionar propriedades mecânicas diversas em um ferro fundido nodular resultante, de modo que é possível obter um material mais resistente e mais dúctil, não mais apenas sob compressão. Além disso, os elementos de liga relacionam-se com o comportamento de encolhimento do ferro fundido enquanto este se solidifica: os elementos de

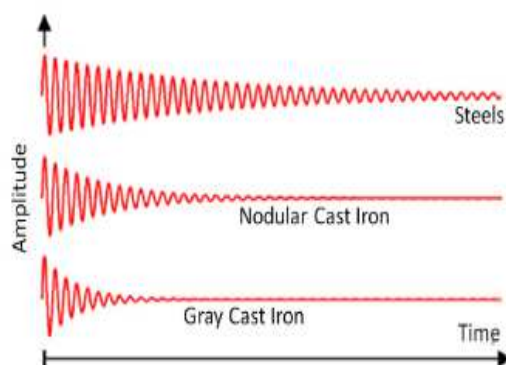


Figura 2.8: Capacidades de amortecimento vibracional para aços e ferros fundidos [47].

liga estabilizam a formação dos chamados "carbeto", que influenciam na formação de nódulos de grafita [23] (Popovski, 2005). O material do suporte de mola traseira do caminhão e-Delivery, liga de ferro fundido nodular GGG-40, apresenta elementos de liga distintos na disposição percentual em peso mostrada na Tabela 2.1.

Percentual em Peso de Elementos no Ferro Fundido Nodular GGG-40				
C %p	Si %p	Mn %p	P %p	S %p
3.50 - 4.00	2.00 - 2.70	0.30 máx	0.05 máx	0.02 máx

Tabela 2.1: Elementos presentes na liga de ferro fundido nodular GGG-40.

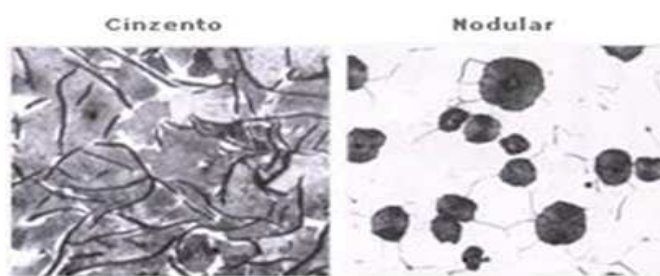


Figura 2.9: Fotomicrografia de um ferro fundido cinzeno, à esquerda, e de um ferro fundido nodular, à direita [1].

Os ferros fundidos nodulares são assim chamados por apresentarem grafita nodular, e essa microestrutura apresenta um efeito concentrador de tensão reduzido em comparação com as grafitas em flocos pontiagudas presentes nos ferros fundidos cinzentos. Os ferros fundidos nodulares também são chamados ferros fundidos dúcteis e uma fotomicrografia óptica típica dessa categoria de ligas é mostrada à direita na Figura 2.9, em que se observa nódulos escuros de grafita dispostos numa matriz de ferrita α .

As propriedades mecânicas desejadas ao GGG-40 são: resistência à tração de 400 MPa, tensão de escoamento de 250 MPa, alongamento de 12% e dureza 201 HB. A fabricação dessa liga e a garantia das suas propriedades mecânicas são procedimentos normalizados e classificados, como é indicado na Tabela 2.2, por meio das designações nos sistemas: International Organization for Standardization - ISO, Japan Industry Standards - JIS, American Society for Testing and Materials - ASTM, Deutsches Institut für Normung - DIN e Australian Standard - AS.

ISO	JIS	ASTM	DIN	AS
1083 400-15.18	G 5502 FCD 400	A536-84 60-40-18	1693 GGG-40	1831 400-12

Tabela 2.2: Normas Técnicas ferro fundido nodular GGG-40.

As propriedades mecânicas mencionadas podem ser obtidas por meio da aplicação de tratamentos térmicos após a solidificação da liga, que permite a obtenção de microestruturas diferentes no produto material final. Por exemplo, o resfriamento moderado ou lento do ferro fundido, que objetiva aliviar tensões internas e aumentar sua ductilidade - ao passo que diminui sua resistência - pode formar, respectivamente, matriz de perlita com nódulos de grafita ou matriz de ferrita com nódulos de grafita, devido à difusão de carbono no segundo caso.

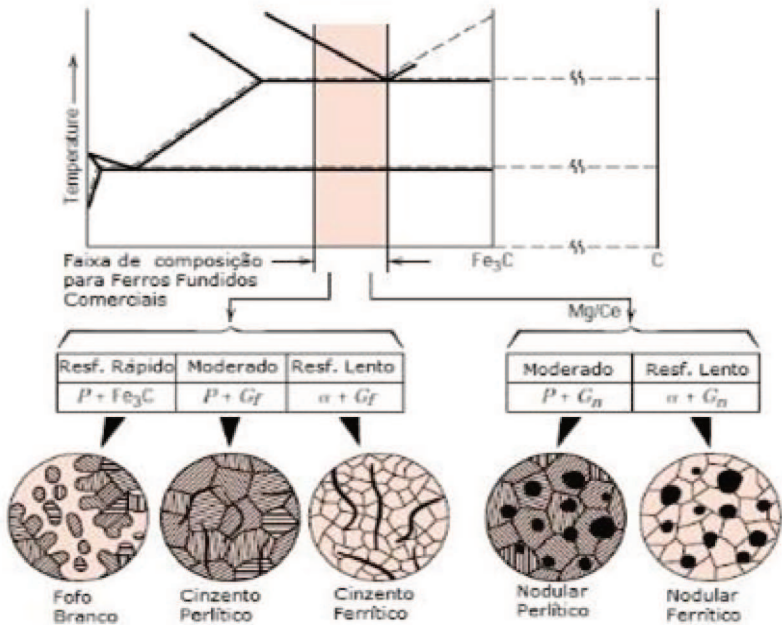


Figura 2.10: Microestruturas obtidas por meio de taxas de resfriamento diversas dentro de uma mesma faixa de percentuais de carbono [1].

Assim, são obtidas microestruturas e propriedades mecânicas distintas a partir de materiais com uma mesma composição química. Na Figura 2.10, é possível observar, de forma representativa, diferentes microestruturas associadas a variações de composição e taxas de resfriamento.

2.1.3

Comportamento Mecânico e Fadiga no Suporte de Mola

O estudo do comportamento mecânico dos materiais é fundamental para a elaboração de qualquer projeto de engenharia e a garantia de sua segurança e funcionamento adequado. Os corpos reais não são rígidos, mas sim deformáveis, uns mais, outros menos, quando sujeitos à aplicação de forças externas ou a variações térmicas. Sendo assim, a realização de ensaios mecânicos para a obtenção das características de cada material torna possível a tomada de decisão sobre quais materiais devem ou não ser utilizados para cada tipo de aplicação.

O ensaio de tração de um material fornece uma série de propriedades, como resistência ao escoamento, resistência ou limite de ruptura, deformação sob carregamento, alongamento máximo do corpo ensaiado e também redução de área de secção em corpos de prova. Por outro lado, o ensaio de compressão fornece uma série de parâmetros análogos aos de tração.

Vale mencionar que nesses ensaios, trabalha-se com carregamentos quase estáticos, aplicados gradualmente sobre o material. Como, normalmente, não se deseja o escoamento do material de um componente durante o serviço, escolhe-se um material cuja resistência ao escoamento está consideravelmente acima da carga máxima de serviço.

Entretanto, o comportamento de uma estrutura não depende apenas das propriedades mecânicas estáticas dos materiais. O tipo - tração, flexão, torção - e a forma do sequenciamento de cargas aplicadas também são fatores determinantes na vida de peças [2] (Geere, 2015). Dessa forma, o fato de se trabalhar com cargas abaixo do limite de resistência de um material não garante que ele não vá escoar e falhar em serviço, mesmo que ele não esteja sofrendo desgaste ou corrosão.

Frequentemente, as falhas mecânicas ocorrem devido a rupturas ou deformações que foram causadas pela iniciação e propagação de trincas, estas originadas, apenas, da aplicação de cargas cíclicas variáveis sobre o componente [3] (De Castro, 2009). Esse mecanismo de falha chama-se fadiga. A falha por fadiga ocorre, geralmente, devido a fatores concentradores de tensão, muito relacionados com a geometria do componente.

Cantos vivos, por exemplo, favorecem o surgimento de trincas, bem como

reduções bruscas de seções e rasgos de chaveta. Sendo assim, no desenvolvimento de peças, é preciso ter cautela com a presença de pontos críticos, que são as regiões localizadas do componente mais propícias à nucleação e propagação de trincas.

Para o dimensionamento à fadiga, existem, por exemplo, os métodos e ensaios mecânicos vistos na disciplina Comportamento Mecânico dos Materiais: Método SN ou de Wöhler, que relaciona o início do trincamento por fadiga em corpos de prova à vida destes, sob cargas elásticas; Método eN ou de Coffin-Manson, também para corpos de prova adequados, com o reconhecimento de deformações elasto-plásticas; e o Método da dN ou de Paris, utilizado para a prevenção da propagação de trincas e fraturamento por fadiga [3] (De Castro, 2009).

Como o dimensionamento à fadiga pode acabar tornando-se bastante complexo, no caso de componentes de máquinas, que possuem geometrias bastante distintas das de corpos de prova para ensaios, os fabricantes, quando viável, costumam não só ensaiar corpos de prova em laboratório a fim de descobrir o limite de resistência à fadiga do material como, também, submeter uma quantidade de componentes fabricados a testes que simulem condições de fadiga menos controladas e mais próximas da realidade.



Figura 2.11: Simulação do suporte de mola e instalação do sensor S53. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].

Por exemplo, para o caso do suporte de mola de suspensão deste trabalho, o comportamento sob tensões cíclicas variáveis do componente foi analisado com o auxílio de sensores, dispostos em pontos estratégicos da estrutura do componente, identificados previamente por meio da simulação do funcionamento do componente em um software de Elementos Finitos.

Na Figura 2.11, é possível observar, em laranja, as regiões no suporte de mola que sofrem maiores valores de tensões. A identificação "S53" indica que



Figura 2.12: Simulação do suporte de mola e instalação do sensor S56. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].

naquele local deve ser colocado um sensor para o estudo do comportamento do componente nesse ponto durante um teste veicular. À direita, nessa mesma Figura 2.11, tem-se uma fotografia do sensor de deformações já instalado. A Figura 2.12 mostra um procedimento semelhante para outra região crítica do componente, em que se tem a instalação do sensor "S56".

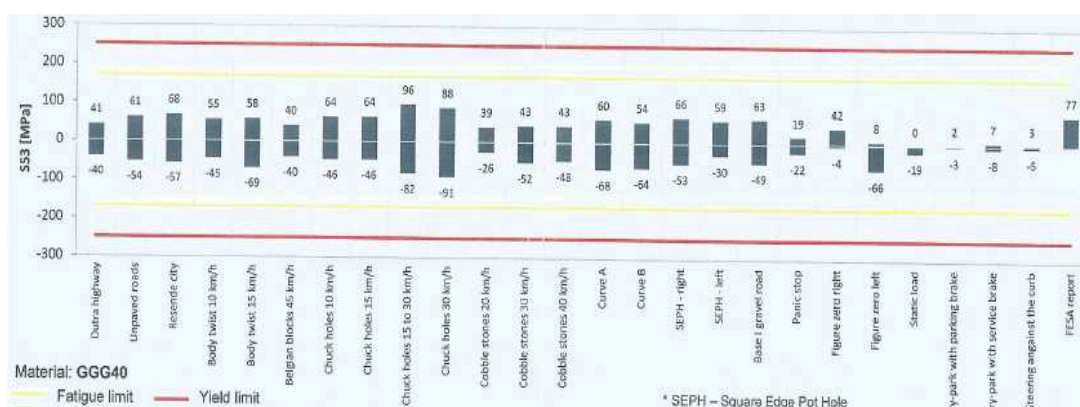


Figura 2.13: Teste veicular do suporte de mola e tensões médias máximas e mínimas relativas ao sensor S53 para diferentes condições de estrada. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].

Nas Figuras 2.13 e 2.14, tem-se os registros de tensões médias máximas e mínimas medidas nas regiões dos sensores S53 e S56, respectivamente, para diferentes condições de estrada simuladas nas pistas reais de ensaio veicular da MAN Latin America. As linhas vermelhas nessas figuras representam as tensões de escoamento sob tração e compressão do material, obtidas por meio de ensaios mecânicos da empresa, e as linhas amarelas, por sua vez, representam os limites de fadiga.

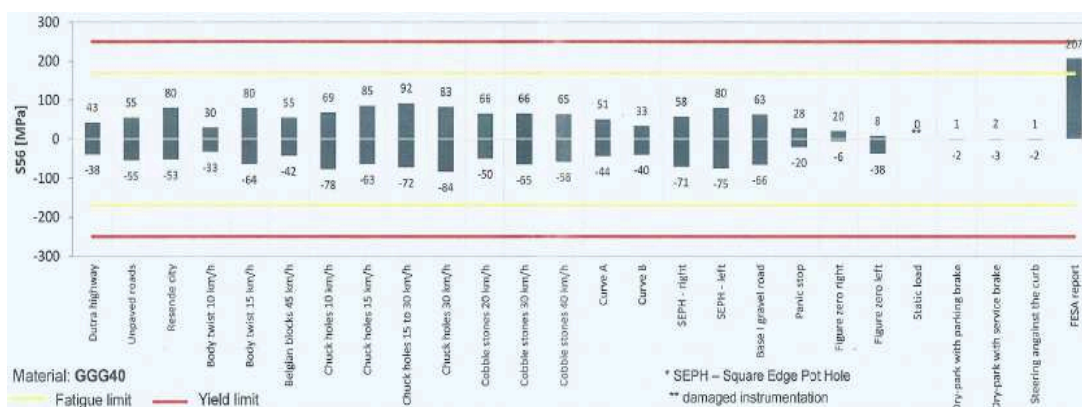


Figura 2.14: Teste veicular do suporte de mola e tensões máximas e mínimas reais sensor S56 para diferentes condições de estrada. Imagem disponibilizada pela MAN Latin America, em versão aumentada no Apêndice A [28].

É possível constatar, portanto, que mesmo nas regiões mais críticas do suporte de mola, o componente apresenta comportamento elástico e tensões médias, máximas e mínimas, que, por estarem relativamente abaixo do limite de fadiga, não devem causar danos por meio desse mecanismo de falha. A condição que mais ameaça a integridade estrutural do suporte de mola, no entanto, é a de rua significativamente emburacada simulada na empresa, com o veículo transportando-se de 15 a 30 km/h - nas Figuras 2.13 e 2.14, sob os termos: *Chuck holes at 15 to 30 km/h*.

Vale mencionar, no entanto, que a estrutura do suporte, como é comum, sofre efeito de acumulação de danos e, por estar exposta ao meio ambiente, também pode reagir com o meio, de forma que vida útil do suporte de mola não é infinita. O cuidado com a fabricação do componente tem, portanto, um papel fundamental no seu desempenho, uma vez que as propriedades do material podem influenciar fortemente o comportamento deste sob as solicitações reais de serviço.

2.2

A Microfusão como Processo de Fabricação

Esta seção tem como objetivo apresentar o processo de microfusão de peças, passando, primeiramente, pelo tema da fundição tradicional de componentes. Em seguida, a microfusão é descrita - suas etapas são apresentadas - e descreve-se sobre a utilização desse processo na fabricação de componentes mecânicos. Por fim, aborda-se a atraente relação entre as áreas da microfusão e da reciclagem de materiais.

2.2.1

Fundição e Obtenção de Ferro Fundido

A história do homem é tão profundamente afetada pelas descobertas de técnicas metalúrgicas que os historiadores não encontraram outra maneira para melhor nomear os períodos de tempo depois da Idade da Pedra que: Idade do Cobre, Idade do Bronze e Idade do Ferro. Isso quer dizer que, antes mesmo de inventar a escrita, o homem já trabalhava ligas metálicas.

Assim, a fundição de peças é uma tecnologia que está em desenvolvimento há mais de 5000 anos e as técnicas associadas ao processo de fundição e à criação de ligas evoluíram substancialmente nesse tempo, possibilitando a produção de grande volume de peças de geometrias e dimensões bastante diversificadas, com massas que valem desde gramas até toneladas.

Simplificadamente, a fundição consiste da deposição de uma liga metálica líquida em um molde, que contém uma cavidade com determinada geometria. Em seguida, o líquido resfria dentro da cavidade até solidificar-se com a forma desejada. Como foi estudado na disciplina de Processos de Fabricação e em Automação da Manufatura, hoje em dia, já existem muitos conhecimentos, níveis de automação e controles envolvidos no processo de fundição de ligas, que tornam o processo significativamente mais complexo, reprodutível e preciso.

Além disso, a metalurgia e a siderurgia são áreas muito ricas em técnicas e setores especializados. Ainda assim, é possível compreender, sem extenso aprofundamento, os conceitos principais envolvidos nos processos de fundição.

Em Processos de Fabricação [4] (Moro, 2007), é descrito o processo tradicional de fundição de aços, que são, basicamente, ligas ferrosas com teor de carbono inferior a 1%p. A produção dos chamados ferros fundidos, material constituinte do suporte de mola estudado neste trabalho, difere-se daquela dos aços devido às concentrações de elementos de liga com as quais se trabalha, mas os princípios envolvidos são os mesmos. Sendo assim, para o processo de fundição de aços ou ferros fundidos, existem três componentes básicos: minério de ferro, coque e calcário. Resumidamente, é possível entender o processo de fundição como explicado adiante.

O coque é um resíduo sólido obtido a partir do aquecimento de carvão na câmara de coqueificação da siderúrgica, em que compostos orgânicos voláteis são retirados da massa de carvão por evaporação. No processo de fundição da liga ferrosa de interesse, o coque age como combustível para elevar a temperatura do alto forno: o carbono do coque reage com oxigênio, gerando calor e monóxido de carbono. Este último, por sua vez, reage com o oxigênio do minério de ferro para se obter matéria rica em ferro e livre de oxigênio, mas que ainda apresenta grande quantidade de impurezas. Tal reação resulta em

gás carbônico.

As impurezas remanescentes são átomos ou compostos químicos variados que estavam presentes no minério extraído original, como manganês e enxofre. Como a presença não controlada desses elementos de liga prejudica a qualidade, ou seja, as propriedades microestruturais e mecânicas do produto fundido, utiliza-se o calcário no processo de fundição para a diminuição da quantidade de impurezas.

Uma vez aquecido, o calcário decompõe-se, gerando cal, que reage com as impurezas e, por possuir ponto de fusão mais baixo que o do ferro, bem como densidade mais baixa ao fundir-se, a escória líquida do minério eleva-se e concentra-se na parte superior da matéria rica em ferro. Desse modo, a escória pode ser removida ou separada.

A liga ferrosa resultante dos processos descritos, após a separação da escória, continua a apresentar elevada quantidade de impurezas e chama-se ferro gusa. Este precisa ainda passar por reações químicas para transformar-se em um ferro fundido de qualidade ou em um aço mais refinado, o que geralmente é feito dentro de um conversor ou forno elétrico. Nesses equipamentos, ocorrem sopros de oxigênio sobre o ferro gusa e, com base no gerenciamento da quantidade de oxigênio que reage com as impurezas da liga ferrosa, obtém-se um aço com porcentagem mássica menor e controlada de elementos de liga.

Por fim, o aço ou ferro fundido é entornado em moldes, geralmente, de areia ou metal com a forma já do produto final ou originando lingotes de diversos tamanhos, que são encaminhados para outras indústrias, nas quais sofrem mais processos mecânicos e tratamentos térmicos para que suportem esforços futuros.

2.2.2

Descrição do Processo de Microfusão

A microfusão, como o nome sugere, está relacionada com as tecnologias de fundição de peças discutidas na seção anterior. No entanto, diferentemente das técnicas de fundição tradicionais, a microfusão como processo de fabricação apresenta uma série de características e sofisticções próprias. Desse modo, a microfusão não pode ser definida, simples e superficialmente, como um processo de fundição de peças de menores dimensões.

Diferentemente da fundição em areia, em que os modelos são reaproveitados e os moldes são destruídos, por exemplo, na microfusão, tanto os modelos como os moldes são destruídos. Além disso, existem diversas variações do processo de microfusão por núcleo perdido em uso atualmente, não apenas para a prototipagem rápida, como os processos de fundição por cera perdida e fundi-



Figura 2.16: Fundição de estátuas de bronze com cera perdida na Antiguidade [39].

auxílio de matrizes que podem ser de diferentes materiais, como de metal ou de madeira. Depois que se tem os modelos em cera solidificados com a geometria desejada, são removidas as eventuais rebarbas presentes nos modelos, para que estes fiquem os mais fiéis possível às peças projetadas.

Então, os modelos de cera bem acabados devem ser arranjados em uma estrutura de hastes de cera, formando uma árvore, de modo que cada galho possua um único modelo de cera ou um cacho de modelos, dependendo de diversos fatores, como por exemplo, o tamanho do forno com o qual se pode trabalhar ou o tamanho das peças que se deseja produzir.

Em um próximo momento, a árvore de cera inteira sofre, num ambiente com umidade e temperatura controladas, um banho de lama cerâmica, seguido do acréscimo de uma camada de areia refratária, e esse procedimento pode ser reproduzido mais de uma vez para a obtenção de uma parede de cerâmica mais espessa ao redor da árvore. Esse procedimento chama-se revestimento.

Em seguida, a estrutura toda é aquecida sob pressão alta e ar úmido na autoclave e a cera é removida do interior do recipiente cerâmico - processo de deceragem. O resultado é uma casca cerâmica com um espaço interno vazio na forma antiga da árvore de cera.

Depois, o recipiente cerâmico sofre um processo de queima, chamado calcinação: o material é submetido a elevadas temperaturas em um forno, de



Figura 2.17: Etapas da microfusão com cera perdida [40].

maneira controlada, e o resultado é a obtenção de uma parede cerâmica com elevada resistência a choques térmicos. A casca cerâmica produzida deve ser capaz de suportar o contato, em seu interior, com o metal líquido extremamente quente.

Assim, depois da etapa de vazamento de metal fundido, do resfriamento do recipiente e da solidificação da liga, parte-se para o momento de remoção da casca cerâmica. Isso pode ocorrer de diferentes maneiras, como por meio de jateamento de areia ou de excitação vibracional da estrutura como um todo, de modo que as camadas de revestimento tendem a se desfazer.

Após o revestimento ser removido, obtém-se a árvore de metal solidificado. Como as peças desejadas estão presas aos cachos, é necessário usiná-las, de modo a separá-las umas das outras e da estrutura da árvore. Por fim, as peças são submetidas a possíveis etapas de remoção de rebarbas, de tratamentos superficiais e térmicos, e é feita a inspeção metrológica das peças. Estas, então, podem ser fornecidas a clientes ou montadas em equipamentos [6] (Giuliano, 2008).

No processo de microfusão com núcleo perdido e modelo de peça em polimetil-metacrilato, ou PMMA, em vez de ser fabricada uma matriz modeladora para a injeção de polímero, como era o caso da cera, é possível aproveitar-se da tecnologia da impressão 3D para produzir, com precisão, um modelo da peça em PMMA com consideráveis complexidades geométricas. Assim, utiliza-se algum software do tipo CAD - Computer Aided Design - para a modelagem da peça e utiliza-se esse arquivo de desenho como *input* para a impressora 3D.

Em seguida, uma vez impressos os modelos, similarmente à microfusão com cera perdida, os modelos em PMMA são dispostos em uma estrutura de árvore. Esta pode ser feita de cera, pois os canais para o futuro vazamento de



Figura 2.18: Despejo de metal fundido dentro de vasos cerâmicos em processo de microfusão [41].

metal fundido não necessitam de tanta precisão dimensional quanto os modelos das peças e existem os fatores de custo de compra do PMMA e da cera, que influenciam na escolha do material consituente para a árvore.

Então, a árvore de cera com os cachos de peças em PMMA passa pelo procedimento de revestimento cerâmico, novamente, como no caso da cera perdida, e deceragem dos canais. O PMMA, ao ser aquecido, evapora e também é removido. Vale mencionar que, tanto a cera como o PMMA, podem passar, posteriormente, por processos de reciclagem. Esse tema é abordado na seção 2.2.4.

Depois que a estrutura cerâmica oca é obtida, a liga fundida é depositada dentro da cerâmica. Acontece, então, o resfriamento do conjunto e a solidificação do metal, a casca cerâmica é removida e as peças devem ser separadas da estrutura. Finalmente, estas seguem para a etapa de acabamentos, quando necessário, e tratamentos térmicos.

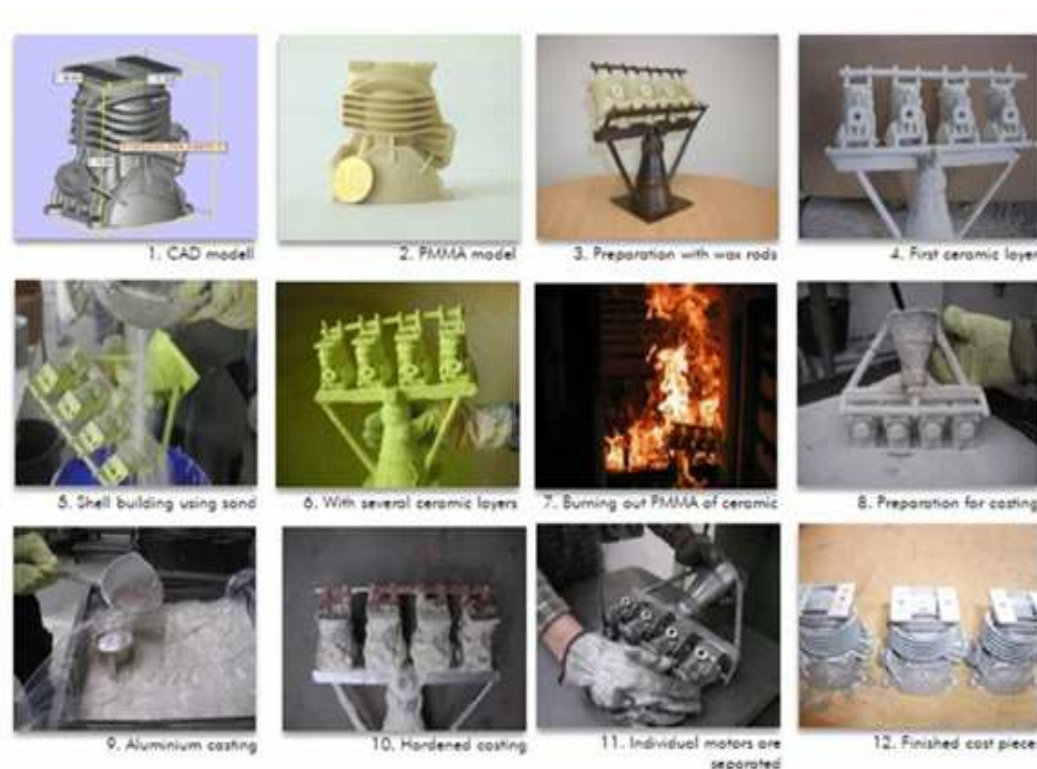


Figura 2.19: Microfusão com molde em PMMA [42].

2.2.3

Microfusão de Componentes Mecânicos

A fundição por núcleo perdido, como foi visto em seções anteriores, não é uma invenção tecnológica recente. Entretanto, apenas no século XX, mais precisamente, a partir da Segunda Guerra Mundial, é que a microfusão foi incorporada como processo de fabricação de peças em escala industrial, especialmente, para a criação de componentes de mísseis e de motores de propulsão a jato.

Essas peças, em geral, tinham formas geométricas não muito fáceis de serem usinadas e havia a necessidade de que tais componentes fossem constituídos de materiais muito resistentes e com altos pontos de fusão. Assim, as técnicas de microfusão conhecidas na época podiam ser colocadas em prática [7] (Black, 2008).

Atualmente, no Brasil existem mais de 30 empresas que atuam com microfusão. Essa tecnologia é aplicada para a produção de componentes para várias indústrias: automobilística, aeronáutica, têxtil, alimentícia, agrícola, petroquímica, médica, odontológica e esportiva [8] (Machado, 2012).

A microfusão, no entanto, como qualquer outro processo de fabricação, apresenta seu conjunto de vantagens e desvantagens. A grande vantagem é que

praticamente não há limites quanto às formas que podem ser produzidas e pode-se aplicar o processo a diversos tipos de materiais, como, por exemplo, aços, ferros fundidos e outras ligas, como de alumínio, cobre e níquel.

Além disso, é possível trabalhar com peças de 0.5 a milhares de quilogramas. Também, é possível obter, no caso de fundição com espuma perdida, acabamentos superficiais após a microfusão de 2.5 a 25 micrometros e tolerâncias dimensionais menores que 0.003 cm/cm.

A microfusão com espuma perdida e moldes, permite, portanto, que sejam dispensadas, em vários casos, usinagens posteriores à fabricação das peças [7] (Black, 2008). As Figuras 2.20 e 2.21 mostram os acabamentos alcançados por diferentes processos estudados na disciplina Tecnologia Mecânica e Projeto de Sistemas Mecânicos, para uma melhor referência sobre a grandeza de tais valores.

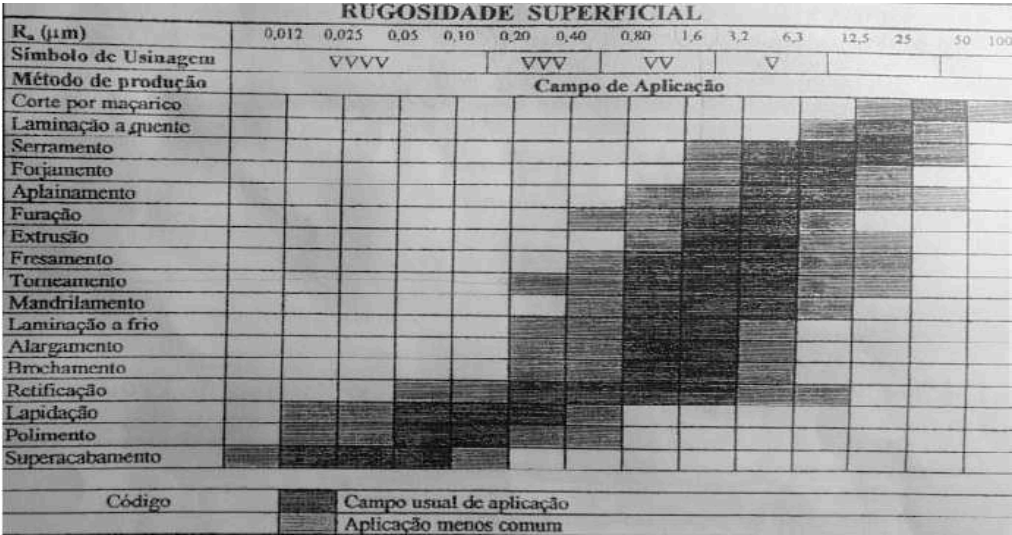


Figura 2.20: Rugosidade superficial para diferentes tecnologias mecânicas [9].

O acabamento superficial é quantificado pela rugosidade (Ra) e esse parâmetro está relacionado com a altura das irregularidades superficiais de uma peça. A qualidade superficial de um componente, obtida a partir de um processo de fabricação qualquer, é importante, pois não influencia apenas na aparência da peça, mas também nas propriedades relativas a atrito e desgaste, resistência à fadiga e transmissão de calor, entre outros [9] (Batista, 2011).

A fundição por espuma perdida e molde mencionada, porém, apresenta certas limitações que resultaram, ao longo dos anos, na refutação desse método para a fabricação de componentes. Sem as tecnologias CAD-CAM (Computer Aided Design e Computer Aided Manufacturing), o que inclui as tecnologias de impressão 3D atuais, os custos da fabricação de moldes para a criação dos



Figura 2.21: Rugosidade superficial para diferentes tecnologias mecânicas [43].

modelos em cera ou espuma podem ser bastante elevados, especialmente nos casos de produção de pequenas quantidades de peças [7] (Black, 2008).

Além disso, os modelos em cera ou espuma convencionais, produzidos a partir desses moldes ou matrizes, costumavam ser, até poucas décadas, facilmente danificados, deformados ou distorcidos devido às baixas resistências dos materiais utilizados. Com o desenvolvimento de novos polímeros e a impressão 3D precisa com esses materiais, o cenário de limitações da microfusão, no entanto, vem sendo transformado [10] (Kumar, 2015).

O auxílio da manufatura aditiva na produção de modelos em PMMA, por exemplo, faz com que não seja necessária a fabricação de moldes, e o modelos das peças a serem revestidos podem ser impressos de forma bastante coerente com seus respectivos desenhos de projeto, como é possível observar na Figura 2.22.

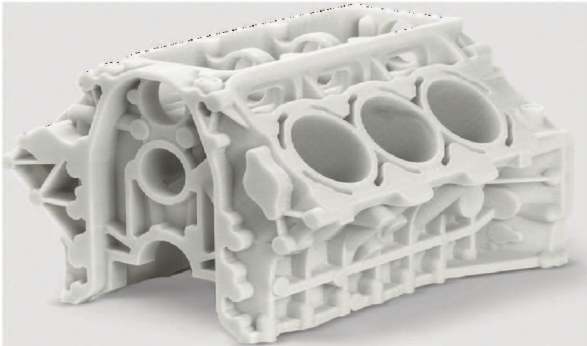


Figura 2.22: Protótipo de componente em polímero produzido por impressão 3D [44].

Considerando-se também os custos de usinagem e de outros tratamentos de superfície, é de especial interesse que a microfusão resulte em peças que já apresentem a qualidade superficial necessária. Assim, combinando-se impressão 3D e microfusão, deve ser possível obter peças com tolerâncias dimensionais e acabamentos superficiais ainda melhores que aqueles do caso da espuma perdida com uso de molde para a criação dos modelos das peças [7] (Black, 2008).

2.2.4

Microfusão e Reciclagem

Para o melhor alinhamento das práticas de microfusão descritas com os fundamentos da sustentabilidade, é preciso investigar essa tecnologia de fabricação, entre outros aspectos, em termos de reutilização de materiais. Basicamente, há estes tipos de materiais envolvidos na metodologia proposta nesse trabalho: cerâmica de revestimento; cera e polímero PMMA (referentes à produção dos modelos de peças); e ferro fundido, que deve constituir o produto final. A reciclagem deste último é abordada na seção 2.4.2 deste trabalho.

Por mês, 50 a 100 toneladas de rejeitos provenientes de revestimento cerâmico são gerados por empresas do ramo de fundição por cera perdida e microfusão no Brasil. Esse material pode ser reaproveitado, se fragmentado e moído, por exemplo, dentro das indústrias de produção de cimento. A adição do pó de casca cerâmica, resíduo da microfusão, em alguns concretos, pode melhorar suas propriedades, como resistência e durabilidade [8] (Machado, 2012).

Além disso, o resíduo cerâmico da microfusão tem algumas características que podem ser aproveitadas em outros contextos. Esse resíduo é um material composto de mulita e silicato de zircônio, dois minerais que tornam a cerâmica muito resistente em processos industriais de elevada temperatura. Assim, a casca cerâmica residual, proveniente da microfusão, pode ser aproveitada, também, na fabricação dos filtros cerâmicos que são usados para a remoção de escória de fundição [11] (Carvalho, 2015).

A cera e o PMMA constituintes, respectivamente, dos canais da árvore de microfusão e dos modelos de peça podem ser inseridos em um ciclo de reaproveitamento diferente. Como mencionado anteriormente, a cera é derretida no procedimento de deceragem da árvore revestida em cerâmica, e o PMMA, por sua vez, evapora quando submetido a altas temperaturas.

O produto da deceragem pode ser novamente utilizado para a fabricação de canais em um processo de microfusão subsequente, uma vez que esse material pode ser solidificado novamente com uma forma desejada. A cera que

consistiu a árvore de modelos também pode ser aditivada com outros compostos químicos e ser utilizada como matéria-prima para modelos precisos de peça em processos de fundição por cera perdida [12] (Tascioglu, 2004).

O reaproveitamento do PMMA apresenta certa semelhança com o da cera. Este é um polímero termoplástico facilmente encontrado no mercado. Como visto na disciplina de Comportamento Mecânico dos Materiais, os termoplásticos são uma classe de plásticos formados por cadeias poliméricas com ligações fracas intermoleculares. Sendo assim, ao serem submetidos a elevadas temperaturas, as ligações fracas rompem-se, fundindo o material. Quando este é resfriado, no entanto, essas ligações são reestabelecidas [3] (Castro, 2009).

Então, os termoplásticos podem ser fundidos e remodelados várias vezes sem sofrer danos estruturais que modifiquem as propriedades finais obtidas. O PMMA para microfusão, se recuperado e armazenado na forma líquida ou de vapor, portanto, pode ser reaproveitado como insumo para a impressora 3D. Além disso, o PMMA é um material acrílico inerte que pode ser utilizado para constituir embalagens recicláveis dentro da indústria alimentícia [13] (Vieira, 2006).

2.3

Manufatura Aditiva do Modelo de Peça para Microfusão

Como mencionado anteriormente, a ideia deste trabalho é estudar a metodologia de fabricação de uma peça, a partir da microfusão, utilizando-se um modelo de peça impressa em polimetil-metacrilato, PMMA, para a aplicação de revestimento cerâmico. Sendo assim, esta seção apresenta, primeiramente, algumas considerações sobre os processos de manufatura aditiva existentes e, em seguida, trata do processo de impressão 3D com PMMA.

2.3.1

Tipos de Manufatura Aditiva

Atualmente, existem processos de manufatura aditiva com diferentes materiais, como cerâmicas, ligas metálicas e plásticos - este último sendo o caso do polímero PMMA. Em todos esses processos mencionados, é preciso que seja feita, primeiramente, a modelagem da peça a ser impressa com o auxílio de alguma ferramenta de desenho do tipo CAD. Também é possível obter o modelo digital de um objeto real a partir do escaneamento tridimensional deste para impressão [14] (Rodrigues, 2017).

O arquivo que contém as informações dimensionais do produto a ser impresso deve ser, de maneira geral, convertido para um formato STL, que

Matéria-prima	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Líquido	<i>Stereolithography</i> (SLA)	Polímeros fotosensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação destes com um laser.	Protótipos, moldes.
	<i>Multi-jet Modeling</i> (MUM)	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de uma iluminação ultravioleta (UV).	Protótipos, moldes.
	<i>Rapid Freezing Prototyping</i> (RFP)	Água	Produção de peças a partir do congelamento de gotículas de água depositadas.	Protótipos, moldes.
Filamento ou Pasta	Modelação por extrusão de plástico (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base.	Protótipos, moldes.
	<i>Robocasting</i>	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica.	Objetos cerâmicos.
	<i>Freeze-form Extrusion Fabrication</i> (FEF)	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa.	Objetos cerâmicos.

Tabela 2.3: Tipos de manufatura aditiva com insumo líquido ou em filamentos [14].

significa *surface tessellation language*. Este é lido e traduzido em um outro formato pelo software próprio da impressora 3D utilizada. A partir disso, o software da impressora subdivide o modelo CAD em camadas e é configurado para a realização da impressão de acordo com o seu material de insumo e os seus parâmetros de impressão.

A opção pelo tipo de tecnologia aditiva a ser usada na produção de uma peça depende de uma série de fatores, como: a disponibilidade de recursos, o tipo de material, a qualidade de impressão desejados e a aplicação final da peça. Na verdade, como mostram as Tabelas 2.3 e 2.4, a impressão pode ocorrer com diferentes materiais e componentes mecânicos podem ser impressos diretamente em metal. Esse tipo de impressão apresenta uma série de características interessantes como: perda mínima de material; boa tolerância dimensional e acabamento superficial; uso eficiente de energia e possibilidade de automação dos processos.

Entretanto, a manufatura aditiva em metal exige controle rigoroso de composição química no que se refere ao insumo de impressão para a garantia das propriedades mecânicas da peça impressa. O equipamento de impressão pode ser seriamente danificado caso o pó metálico não apresente as caracte-

rísticas específicas indicadas pelo fabricante e o custo do ferramental pode ser bastante elevado [15] (Moro, 2007).

Matéria-prima	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	<i>Alumide-</i> , <i>Carbon Fibre</i> ; PA 1101; PA 2200/2201; PA 2221; PA 2202; PA 2210; PA 3200; PAEK; <i>Polyestylene</i>	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos, partes aeronáuticas, partes de motores automotivos, peças especiais para indústria, moldes
	<i>Selective Laser Modeling</i> (SLM)	<i>Stainless steel</i> 316L e 17-4PH; <i>H13 tool steel</i> ; <i>Aluminium</i> Al-Si-12 e Al-Si-10; <i>Titanium</i> CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; <i>Cobalt-chrome</i> ASTM75; <i>Inconel</i> 718 e 625	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um laser	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes de motores automotivos; trocadores de calor; moldes; peças especiais para a indústria
	<i>Electron Beam Melting</i> (EBM)	<i>Cobalt-chrome</i> ASTM F75; <i>Titanium</i> Ti-6Al-4V, <i>Grade 2</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes automotivas
	<i>Laser Metal Deposition</i> (LMD)/ <i>Laser Engineered Net Shaping</i> (LENS)/ <i>Direct Metal Deposition</i> (DMD)	<i>Aluminium</i> Al-Si-10Mg; <i>Cobalt-chrome</i> MP1 e SP2; <i>Maraging-Steel</i> ; <i>Inconel</i> 71B e 625; <i>Stainless steel</i> 17-4PH e 15-5PH; <i>Titanium</i> Ti-6-Al-4V	Produção de peças por meio da fusão completa de pó de metal	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes de motores automotivos; trocadores de calor; moldes; peças especiais para a indústria
	Impressão Tri-dimensional (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
Placa sólida	Manufatura de objeto em lâminas (LOM)	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos e moldes

Tabela 2.4: Tipos de manufatura aditiva com insumo em pó ou em lâminas sólidas [14].

Sendo assim, a inserção da metalurgia do pó em um contexto de recicla-

gem metálica seria ideal, mas não é tão simples de ser realizada em função da necessidade de fabricação do pó a partir de sucata metálica. Em contraposição, a impressão de modelos de peças em polímeros para a posterior microfusão com metal já está presente no mercado há décadas, assim como a reciclagem metálica por meio das técnicas de fundição.

Nesse contexto, este trabalho visa desenvolver uma metodologia para a reciclagem de sucata e a fabricação do suporte de mola de suspensão de caminhão da VW a partir da microfusão e impressão 3D com polímeros, ou seja, sem fazer uso da metalurgia do pó.

Algumas tecnologias de manufatura aditiva com insumo contituente de resinas ou plásticos já disponíveis no mercado são, por exemplo: a impressão por deposição de filamento fundido; estereolitografia; sinterização seletiva a laser; impressão por deposição de insumo em pó com injeção de aglutinante; e polyjet.

Para produzir o modelo em plástico do suporte de mola de suspensão da VW, é preciso determinar, portanto, o tipo de polímero e de processo de impressão a ser realizado, considerando-se o fato de que a qualidade do modelo impresso se reflete na qualidade do componente microfundido posteriormente. A impressão com o polímero PMMA e suas características são apresentadas na seção 2.3.2.

2.3.2

Impressão 3D com PMMA

A impressão de modelos em polimetil-metacrilato, PMMA, pode ser realizada com o material pulverizado ou em forma de filamentos. As Figuras 2.23 e 2.24 mostram esses dois tipos de insumo. No caso de impressão com PMMA na forma de filamentos, assim como acontece com a impressão com pó, o processo de fabricação acontece camada a camada.



Figura 2.23: Filamentos de PMMA para impressão 3D [45].



Figura 2.24: Impressão com PMMA em pó [46].

O filamento de PMMA é aquecido na impressora e é depositado, com uma taxa controlada, na bancada de impressão em um estado quase líquido, por meio de uma ponteira com pequeno diâmetro. Enquanto acontece a deposição, a ponteira segue uma rota determinada de acordo com a programação do *software* da máquina, o qual, por sua vez, segue as instruções geométricas de um projeto CAD [16] (Espalin, 2010).

Após completar a deposição de uma camada, a ponteira passa a fazer o mesmo procedimento em uma camada superior. O processo se repete até que tenham sido construídas todas as camadas do produto. O PMMA tem ponto de fusão entre 200°C e 230°C, então ele está dentro da faixa de valores de temperatura de operação admissíveis para impressão por deposição - até 290°C [17] (Osswald, 2006).

No caso da impressão 3D com PMMA pulverizado, é possível existir diferentes características de processo, dependendo da marca fabricante do equipamento. Entretanto, de maneira geral, as impressoras utilizam o conceito da fotopolimerização para gerar uma forma sólida 3D a partir de matéria em pó. Assim, no caso do insumo de impressão pulverizado, distinguem-se algumas etapas.

Primeiramente, o pó é espalhado como uma camada fina e homogênea de material sobre uma plataforma de impressão; em seguida, atua uma ponteira da impressora, injetando líquido absorvedor de luz ultravioleta nas regiões que devem ser sinterizadas e que dão origem ao produto desejado da impressão.

Então, as regiões com o líquido absorvedor são iluminadas, o líquido absorve a energia da luz ultravioleta e funde a camada de pó sob ele. Uma nova camada de pó, então, é despejada sobre a camada sinterizada e as etapas se repetem, dando origem a um produto que se forma de camada em camada.

Por fim, o produto é retirado da plataforma de impressão, assim como o excesso de pó sobre ele. Na Figura 2.25, estão dispostos alguns dados sobre o

PLASTIC		
Base material	PMMA particle material (55 μm)	PMMA particle material (85 μm)
Binder-type	PolyPor B	PolyPor C
Tensile strength	$\geq 2.0 \text{ MPa}$	$\geq 2.0 \text{ MPa}$
Yield point	1 %	1 %
Burn-out temperature	700 °C	600 °C
Residual ash content	< 0.01 weight %	< 0.01 weight %
Especially suited for	Investment casting; design models	Investment casting
Advantages	sharp edges; for highest accuracy and true-to-detail; reusable particle material	burns out very well
TECHNICAL DATA		PLASTIC PARTS
Layer thickness	Standard 150 μm	
Resolution x, y	up to 600 dpi	
Accuracy	$\pm 0.4 \%$ (min. $\pm 0.3 \text{ mm}$)	

Figura 2.25: Dados do insumo de PMMA pulverizado fornecido pela marca Voxeljet de impressoras [29].

insumo em pó de PMMA, fornecido pela marca fabricante de impressoras 3D Voxeljet. Os dados foram retirados do site da empresa [29].

Após a impressão da peça em PMMA, é possível aplicar nela uma camada superficial de cera ou epoxy antes da etapa de revestimento cerâmico para microfusão, para que seja obtida uma superfície de melhor qualidade, melhor acabada e mais resistente, no modelo impresso e, por consequência, também na peça microfundida a partir do modelo. Na Figura 2.26, apresentam-se alguns dados de revestimento em cera e epoxy.

SUITABLE FINISHING TREATMENT	Wax	Epoxy
Tensile strength	see base material	up to 25 MPa
Softening temp.	73 °C	80 °C
Burn-out temp.	see base material	-
Characteristics	smooth liquid, resistant surface	solid material, dyeable

Figura 2.26: Dados de revestimento superficial de cera/epoxy para o modelo em PMMA [29].

2.4

Reciclagem e Produção de Ferro Fundido Nodular GGG-40

Essa seção apresenta, primeiramente, uma breve reflexão sobre a importância da reciclagem no contexto atual e da relação desta com os caminhões de circulação urbana, como o e-Delivery da VW. Em seguida, aborda-se o tema da reciclagem metálica, fundamental para a produção do suporte de mola de suspensão, segundo a metodologia aqui proposta. Por fim, trata-se da obtenção dos elementos de liga que caracterizam o ferro fundido nodular GGG-40, constituinte do componente mecânico em questão.

2.4.1

Considerações sobre Reciclagem e o e-Delivery da VW

A manufatura de qualquer produto está relacionada, diretamente, com a disponibilidade de recursos primários para a sua produção. Sabe-se que os recursos do planeta são finitos e, em geral, passam-se longos períodos de tempo até que estes sejam reestabelecidos naturalmente. Dessa forma, a reciclagem de materiais está conectada aos conceitos de oferta e procura tão características do modelo econômico atual. A necessidade de consumir sempre existirá, enquanto houver vida. A oferta de recursos, no entanto, depende consideravelmente do modo como o homem decide, hoje, relacionar-se com a Terra.

Os avanços tecnológicos das últimas décadas associam-se ao estabelecimento de grandes sítios de mineração pelo mundo. Infelizmente, os impactos ambientais dessa atividade são muitos: o desmatamento das áreas para extração de minério e a consequente expulsão da fauna local, causando desequilíbrios ecológicos, também, nos arredores da área de mineração; a possibilidade de contaminação do solo e de bacias hidrográficas por vazamento de substâncias tóxicas; o assoreamento de rios em função do mal gerenciamento de grandes volumes de sedimentos gerados pela mineração; a intensificação de processos erosivos locais; entre outros [18] (Silva, 2007).

Todos esses fenômenos podem ser substancialmente reduzidos se os recursos minerais demandados pelo setor industrial forem buscados, diretamente, nos centros urbanos. O aproveitamento das cidades como fontes de minério e de outras riquezas naturais, para novos ciclos industriais e de produção de bens de consumo, é um conceito conhecido atualmente como *urban mining* [19] (Sun, 2016).

A atividade de coleta seletiva presente no contexto do *urban mining* deve, idealmente, apresentar um mínimo de impactos ambientais. Assim, esta pode ser desenvolvida a partir de uma rede logística de caminhões elétricos leves, específicos para a circulação em meio urbano, como o e-Delivery da VW. Nesse

sentido, em um cenário em que não só o suporte de mola de suspensão traseira do caminhão pode ser reciclado, mas todos os seus componentes, forma-se um ciclo fechado, em que parte dos próprios resíduos coletados por caminhões leves de circulação urbana são matéria prima para a produção de novos caminhões.

2.4.2

Reciclagem Metálica: Obtenção de Ferro e Elementos de Liga para o Ferro Fundido Nodular GGG-40

Diferentemente do papel, cujas propriedades físicas se alteram a cada novo processo de reciclagem por encurtamento das fibras de celulose, no caso dos metais, a reciclagem pode ser realizada sucessivamente, sem a perda de suas características de interesse. As sucatas metálicas ferrosas têm diferentes origens: elas podem ser geradas dentro das próprias siderúrgicas, nas metalúrgicas, nas fundições e nas indústrias - como é o caso dos resíduos gerados por operações de torneamento e de estampagem em metais [9] (Batista, 2011). Também, a sucata pode ser gerada por obsolescência de produtos devido a novas linhas de lançamento no mercado, por exemplo, de veículos e eletrodomésticos.

A sucata composta de metais inoxidáveis é a mais prática de ser reciclada. As peças feitas de aços inoxidáveis não alteram sua composição ao longo de sua vida útil e também não após seu descarte. Assim, esse tipo de sucata pode ser completamente fundido e moldado para novas aplicações, se antes for lavado para a retirada de resíduos químicos que possam influenciar em propriedades de liga. Geralmente, as sucatas metálicas são fragmentadas, para que tenham maior superfície exposta ao calor do forno e fundam de maneira mais homogênea e eficiente [20] (Trindade, 2013).

As outras ligas metálicas, que não são inertes à química do ambiente ao qual são expostas, sofrem variações de composição significativas com o passar do tempo, por exemplo, as peças ou sucatas que podem se oxidar (enferrujar). Para fabricar novos componentes a partir desse tipo de sucata, portanto, é preciso corrigir a composição do ferro fundido, o que é feito segundo os mesmos princípios da fundição com minério de ferro natural como matéria prima, descritos na seção 2.2.1.

A sucata ferrosa fundida reage com coque e calcário e a escória de impurezas é grosseiramente separada, gerando-se ferro gusa. Esse material, reagindo com oxigênio dentro do conversor da siderúrgica, é purificado: as impurezas reagem com o oxigênio e, com base em um controle de composição, é possível obter ligas ferrosas de qualidade, a partir de um material proveniente de sucata.

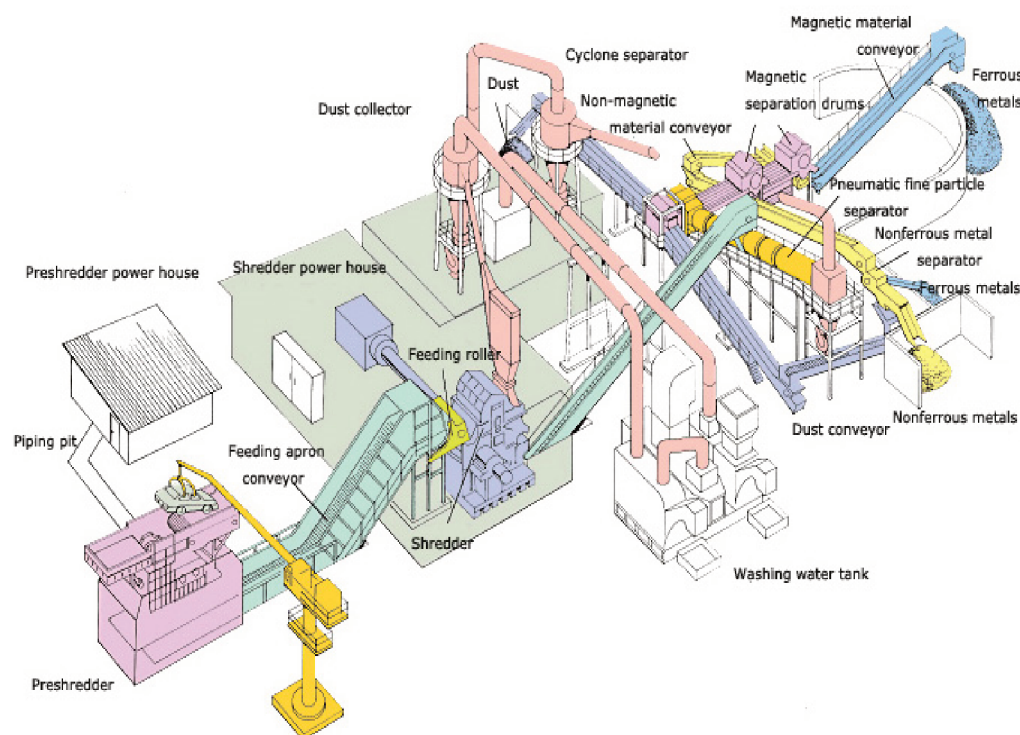


Figura 2.27: Planta de reciclagem metálica com Shredder do Grupo Morita [22].

O que acontece, no entanto, é que as sucatas metálicas acumulam-se misturadas em ferro-velhos, e o processo de reciclagem metálica passa a ter que incorporar novas etapas. Assim, atualmente, existem plantas sofisticadas para a reciclagem de metais misturados acumulados. De acordo com as plantas automatizadas para reciclagem do tipo Shredder, as sucatas metálicas devem ser trituradas em pequenos pedaços e separadas de eventuais materiais não metálicos presentes - madeira, plásticos, vidros; mais ainda, as sucatas metálicas devem separadas por tipo de metal [21] (Medina, 2003).

Além disso, nesse tipo de planta de reciclagem em grande escala, deve ser conferida a presença de radioatividade nos materiais e de elementos químicos contaminantes - os que interferem nas propriedades das ligas, como o enxofre que, em excesso, fragiliza as ligas ferrosas. Também, ocorre a lavagem da sucata, antes que esta seja novamente fundida para a produção de lingotes metálicos.

Uma planta do tipo Shredder para a reciclagem de metais do Grupo Morita é a apresentada nas Figuras 2.27 e 2.28. Na Figura 2.29, tem-se o fluxograma de operações com imagens reais do processo de reciclagem automatizado. Tais imagens apresentam o processo de separação automatizada de materiais metálicos, que passam por um processo de trituração, de lavagem

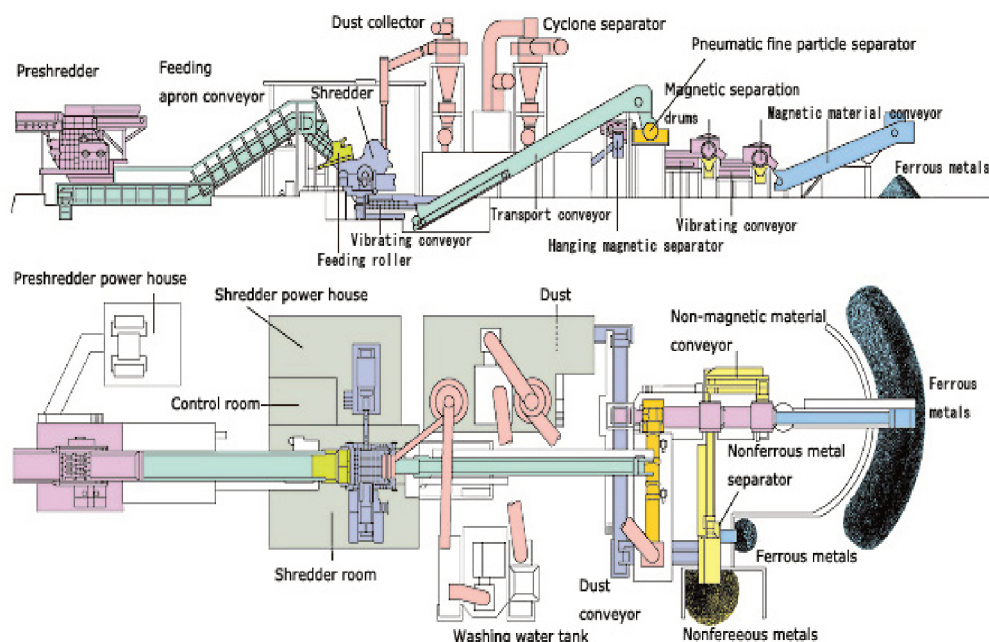


Figura 2.28: Planta de reciclagem metálica com Shredder do Grupo Morita em vista superior [22].

e separação de metais ferrosos dos não ferrosos com o auxílio de tambores magnéticos.

Os materiais ferrosos, então, podem seguir para a produção de ligas ferrosas, como é o caso do ferro fundido nodular GGG-40 que compõe o suporte de mola de suspensão do caminhão e-Delivery. Fica evidente que, se os materiais ferrosos forem identificados previamente e não misturados com outros metais, o processo de reciclagem de sucata ferrosa consistiria apenas das etapas de trituração e lavagem, para então vir a etapa de fundição.

Finalmente, é preciso considerar a presença dos elementos de liga. Como mencionado na seção 2.1.2, a composição química do ferro fundido nodular GGG-40 é de ferro e carbono, com os elementos de liga silício, manganês, fósforo e enxofre.

Geralmente, os elementos de liga são impurezas que já vem com a matéria prima - o minério de ferro - extraído em sítios de mineração, de modo que, uma vez que já estão presentes na solução metálica fundida, eles precisam apenas ter suas quantidades controladas para que a liga metálica resultante tenha as propriedades desejadas. Esse controle, como já mencionado na seção 2.2.1, acontece por meio de reações químicas com cal, coque e oxigênio, e eliminação de escória, que se separa por diferença de densidade.

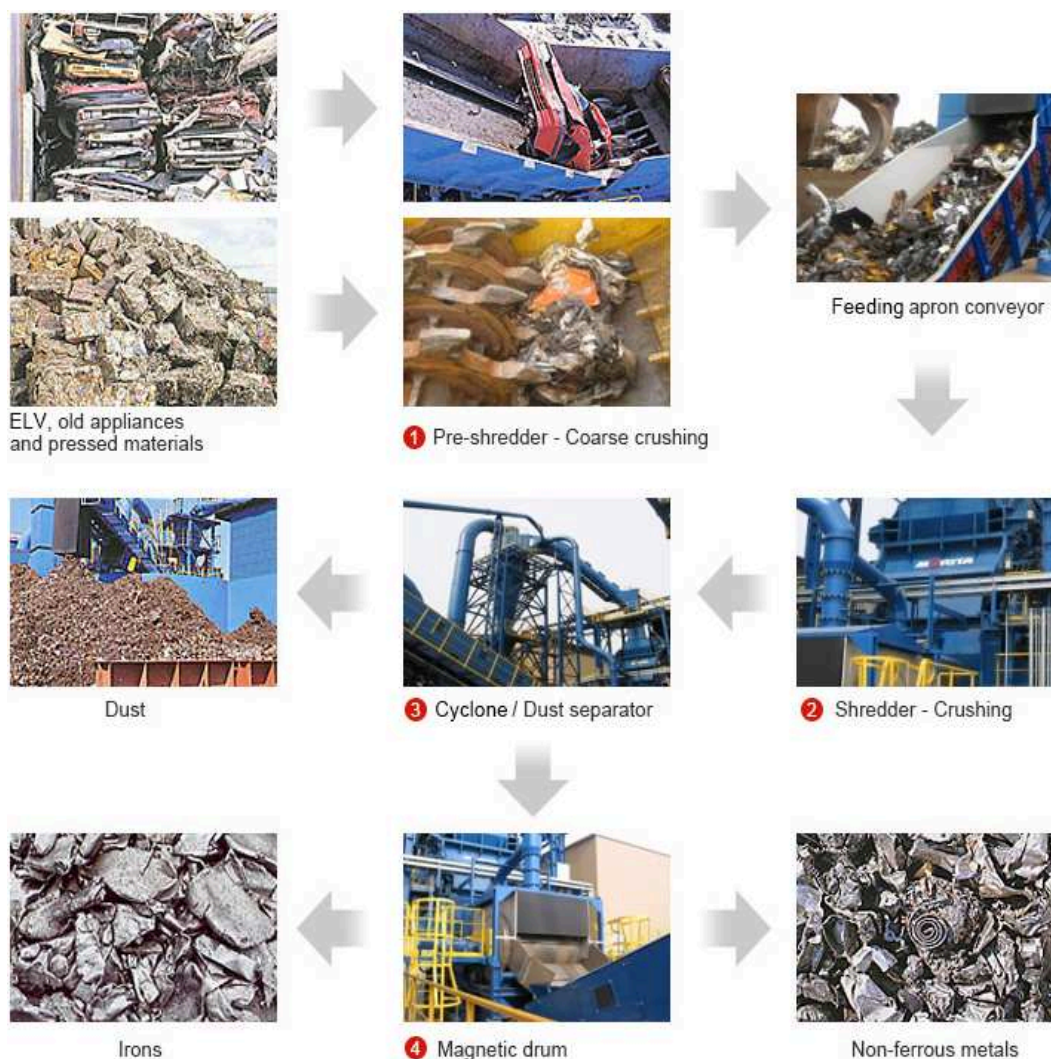


Figura 2.29: Fluxograma de reciclagem de metais da Planta Shredder do Grupo Morita [22].

Nas sucatas metálicas cujo processo de controle de impurezas já tenha sido realizado durante a fabricação das peças e que estejam bem separadas e limpas, não deverá ser necessário remover tanta escória ou adicionar grande quantidade de elementos de liga. Caso seja necessário obter, no entanto, elementos de liga para serem acrescentados na solução fundida, existe a possibilidade de obter esses elementos a partir dos resíduos da planta de reciclagem Shredder - os quais muitas vezes acabam em aterros sanitários [24] (Reckziegel, 2012).

A Figura 2.30 mostra os resultados de caracterização de resíduo de um triturador de sucata no Rio Grande do Sul, os quais, na Figura 2.29, estariam presentes em "Dust". Como é possível observar, os elementos de liga necessários à fabricação do GGG-40 (silício Si, manganês Mn, fósforo P e enxofre S) estão todos presentes nessa listagem de resíduos, exceto fósforo.

Elemento	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Mg	%	1,05	1,02	0,96
Al	%	6,65	6,53	7,10
Si	%	19,06	19,78	14,64
S	%	0,38	0,51	0,55
K	%	0,89	1,04	0,83
Ca	%	9,11	8,72	9,17
Ti	%	1,36	1,72	1,61
V	%	0,03	0,02	0,02
Cr	%	0,33	0,20	0,14
Mn	%	1,05	0,73	0,64
Fe	%	54,53	53,03	57,06
Ni	%	0,09	0,11	0,12
Cu	%	0,33	0,30	0,38
Zn	%	4,17	5,22	5,78
Sr	%	0,11	0,16	0,12
Zr	%	0,20	0,18	0,10
Cd	%	0,30	0,28	0,25
Pb	%	0,38	0,47	0,55

Figura 2.30: Caracterização de resíduos de um triturador de sucata [24].

O fósforo, de modo geral, é obtido por mineração a partir de rochas fosfáticas e a maior parte deste recurso (finito) é destinada à produção de fertilizantes em agricultura. A intervenção humana no ciclo natural do fósforo, no entanto, faz com que grandes quantidades dessa substância sejam misturadas aos recursos hídricos, causando a contaminação destes.

Por esta razão, existe uma busca intensa por novas tecnologias de recuperação de fósforo presente em corpos aquáticos, em especial, em estações de tratamento de esgoto [25] (Pantano, 2016). É possível, portanto, pensar no esgoto, também, como uma fonte de extração de elementos de liga para fundição.

Também é possível, no entanto, que a busca pelos elementos de liga como fósforo e enxofre não seja necessária, uma vez que a composição final da liga metálica precisa de uma porcentagem bastante reduzida de tais elementos e eles, geralmente, já vêm da sucata fundida, muitas vezes sendo necessária a retirada do excesso de tais elementos do ferro fundido, sob o risco de fragilização da liga.

3

A Metodologia de Fabricação Proposta

A partir dos conhecimentos básicos apresentados no capítulo 2, apresenta-se a proposta de fabricação sustentável elaborada para o suporte de mola de suspensão traseira pertencente ao e-Delivery da VW.

Dessa forma, o presente capítulo é dividido em quatro partes: primeiramente, discorre-se sobre a obtenção da matéria prima para a fabricação do componente a partir de sucata; depois, sobre a impressão 3D do modelo de suporte de mola em PMMA; propõe-se, então, a microfusão da peça; e, por fim, apresenta-se os ensaios mecânicos e inspeção metrológica necessários para a validação do método proposto.

Em uma visão mais ampla, a proposta de fabricação idealizada para o componente mecânico deverá seguir as seguintes etapas:

- Separação da matéria prima de ferro fundido da sucata;
- Desenvolvimento do Projeto CAD da peça;
- Impressão 3D do modelo da peça em PMMA;
- Preparo do revestimento cerâmico;
- Aplicação do revestimento cerâmico no modelo em PMMA;
- Calcinação do conjunto cerâmica mais modelo, com coleta do resíduo de PMMA para reciclagem;
- Fundição da liga com metal reciclado;
- Purificação da liga - retirada de impurezas e possível acréscimo de elementos de liga provenientes dos resíduos sólidos de plantas de reciclagem (Shredder) ou mesmo de estações de tratamento de água;
- Preenchimento do recipiente cerâmico com o metal fundido para microfusão;
- Solidificação da liga;
- Remoção da camada cerâmica, com encaminhamento desse resíduo para reciclagem;
- Obtenção do componente mecânico em metal;
- Realização de tratamento térmico;
- Acabamentos e inspeção.

O caminho de fabricação proposto nas próximas seções, no entanto, é mais simplificado e sugere uma estratégia para que se possa realizar pelo menos um primeiro experimento, com base nesse trabalho, dentro das próprias instalações da Universidade, aproveitando os laboratórios e a equipe capacitada que poderia auxiliar no desenvolvimento prático da proposta. A fim de se minimizar o gasto de materiais e energia, deve-se pensar primeiro na fabricação de corpos de prova de ferro fundido nodular GGG-40, a partir da sucata microfundida, com a aplicação de tratamento térmicos.

Os corpos de prova constituídos do material reciclado, uma vez submetidos a ensaios mecânicos, devem apresentar as propriedades mencionadas na seção 2.1.2, bem como o comportamento sob fadiga indicado na seção 2.1.3. Os valores das propriedades mecânicas desejadas são retomados mais adiante neste capítulo. Se as características de material forem alcançadas com sucesso, então, é possível avançar para a fabricação do suporte de mola como um todo.

3.1

Da Sucata Metálica para o Suporte de Mola de Suspensão

Para produzir o suporte de mola de suspensão do e-Delivery é preciso trabalhar com ferro fundido. As sucatas ferrosas, portanto, são de especial interesse. Como apresentado na seção 2.4.2, a separação das sucatas ferrosas a partir de um amontoado de materiais misturados pode não ser um procedimento muito simples.

Entretanto, caso a sucata seja separada previamente por coleta seletiva, torna-se mais fácil adquirir a matéria prima para a fabricação do suporte de mola ou de corpos de prova do mesmo material. Retomando-se rapidamente o que foi exposto antes, sucatas ferrosas são, geralmente, provenientes de estruturas metálicas de construção civil (por exemplo, aços estruturais), chassis e carrocerias de veículos, maquinários quebrados e inoperantes, componentes mecânicos rompidos; entre outros.

Em uma siderúrgica, essa sucata é fundida completamente, e a escória flutuante é removida para se obter o ferro-gusa de composição química não muito controlada. No conversor ou forno elétrico, o ferro-gusa é submetido a reações com oxigênio para eliminação ou o controle de impurezas. Nessa etapa, costuma-se realizar a coleta de amostras do material fundido em diversos momentos, para a análise de composição pelo método da espectroscopia de fluorescência de raios X, [26, 27] (Kohmann, 2015; Oliveira, 2011).

Para propor uma metodologia de fabricação que possa ser colocada sob teste, pelo menos em maior parte, no campus da Universidade, a ideia é utilizar suportes de molas de suspensão de caminhão da VW que já foram descartados

como sucata, após quebra em serviço, como matéria prima para a fabricação de um novo componente. Dessa forma, a composição química da sucata deve estar bem próxima daquela esperada para a peça final - inclusive em termos de elementos de liga - e deve ser possível minimizar a necessidade de análise sobre amostras de metal retiradas do cadinho de fundição.

Já ocorre, na MAN Latin America, a análise de ciclo de vida dos componentes de veículos. Os caminhões de teste, caminhões protótipos, que rodam no pátio de ensaio veicular da empresa possuem previsão de descarte. Os mais de 100 modelos de caminhão do tipo Delivery em teste, portanto, ao fim de sua vida, vão gerar sucata de suportes de mola de suspensão rompidos ou desgastados. A ideia é utilizar esse descarte metálico, que já é separado pela própria empresa, para a realização da microfundição de novos suportes de mola.

Para a sucata composta de antigos suportes de mola de suspensão já quebrados poder ser fundida, no entanto, ela deve primeiramente ser fragmentada em pedaços menores. Estes poderiam ser usinados com as ferramentas presentes no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, que conta com uma subdivisão para a preparação de amostras e dispõe de uma serra de corte com disco diamantado.

Parte dos suportes de mola fragmentados deve ser submetida a análise de microestrutura, para que possa ser definido que tipo de tratamento térmico deverá ser realizado posteriormente. Como mencionado na seção 2.1.2, caso seja observada a microestrutura de um ferro fundido nodular perlítico (matriz de perlita com nódulos de grafita), deve-se realizar um resfriamento moderado; caso seja observada uma matriz de ferrita com nódulos de grafita, o tratamento térmico é o resfriamento lento. Esse estudo e a verificação da necessidade de recozimento podem ser realizados no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos (LMTT) da PUC-Rio.

A fundição metálica em si poderia ser realizada com parceria do Laboratório de Processamento em Alta Temperatura (LPAT) do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio. Já para a eventual determinação de composição do ferro fundido, seriam necessários o auxílio técnico e o uso de ferramental do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME), pertencente ao mesmo departamento.

O LME possui a infraestrutura necessária para análises qualitativa e quantitativa elementar por EDS - espectroscopia por energia dispersiva - e para análise de fluorescência e difração de raios X. É possível utilizar EDS para melhor determinar a composição química da sucata mesmo antes de sua fundição.

3.2

Manufatura Aditiva do Suporte de Mola e Corpos de Prova

A impressão 3D do modelo de suporte de mola de suspensão do e-Delivery pode ser realizada no Instituto Tecgraf de Desenvolvimento de Software Técnico-Científico da PUC-Rio, que conta com um equipamento de prototipagem rápida em polimetil-metacrilato, PMMA, da marca Voxeljet. A impressora, modelo Voxeljet VX800, é capaz de realizar a manufatura aditiva de peças com dimensões de até 850 x 45 x 500mm (comprimento, largura, altura). As camadas têm espessura de até 150 μ m [29].

Para realizar a impressão, é preciso ter o projeto CAD do componente mecânico desejado, como apresentado na Figura 3.1. A vista superior da peça pode ser observada na Figura 3.2.

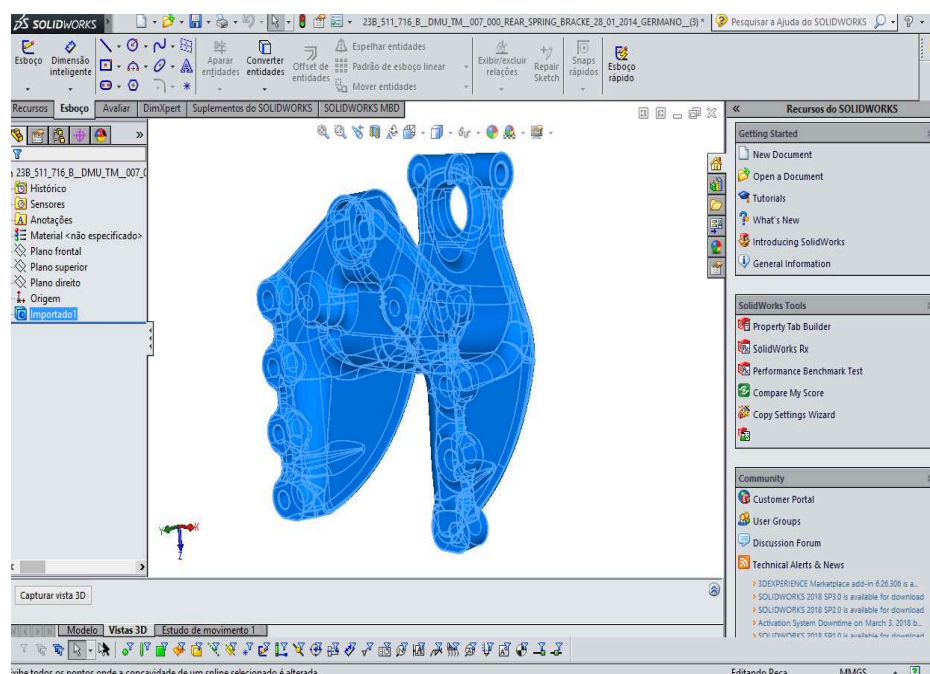


Figura 3.1: CAD do suporte de mola de suspensão da VW no Solidworks [28].

Para a impressão de corpos de prova em PMMA, é necessária a criação dos arquivos CAD destes também, nas dimensões possíveis de serem ensaiadas nos laboratórios da PUC-Rio. O Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) dispõe de uma máquina de tração, cujas garras são capazes de fixar diâmetros entre 8mm e 9mm. A geometria e as dimensões sugeridas pela equipe do laboratório, para os corpos de prova a serem fabricados são apresentadas na Figura 3.3. Deve-se escolher o corpo de prova *Specimen 3*.

Como os corpos de prova são pequenos e há espaço disponível na Voxeljet VX800 para a produção de mais de um, deve ser possível imprimir, diretamente, uma árvore em PMMA para a microfusão, com vários corpos

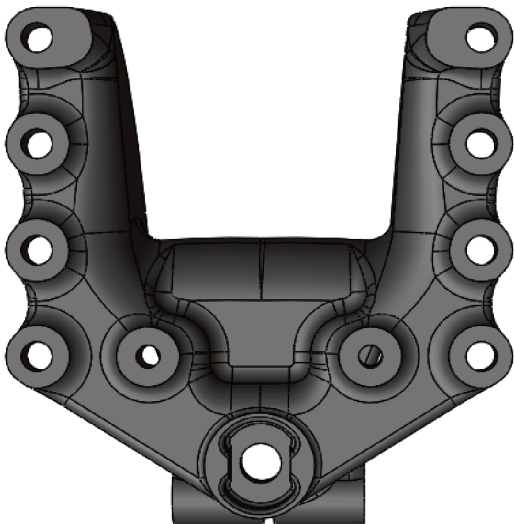
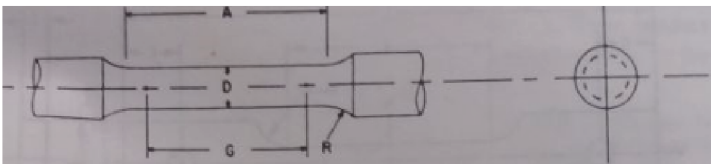


Figura 3.2: Vista superior do suporte de mola de suspensão no Solidworks [28].

de prova idênticos presos em seus ramos. Assim, posteriormente, tanto o revestimento cerâmico como o preenchimento de metal fundido podem ser realizados de uma única vez.



Dimensions, mm [in.]			
For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E 8]			
	Standard Specimen		Small-Size Specimens
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]

Figura 3.3: Geometria e dimensões de corpos de prova para ensaio de tração.

Para que os futuros ensaios mecânicos a serem realizados com os corpos de prova metálicos, apresentem resultados minimamente confiáveis, testes podem ser realizados pelo menos 4 vezes, para essa primeira tentativa de fabricação proposta. Dessa forma, o arquivo CAD deve ser elaborado a fim de se obter uma estrutura de hastes em PMMA que conecta 3 ou 4 corpos de prova.

Na Figura 3.4, é possível observar, à esquerda, uma estrutura em cera, com corpos de prova fixados a ela para serem microfundidos de uma única vez para servirem de referência para a modelagem de uma árvore para os corpos de prova *Specimen 3* [30] (Tremarin, 2011). Na mesma figura, à direita, é

mostrado um exemplo CAD de uma árvore de peças a serem impressas [31] (Chimarelli, 2018).

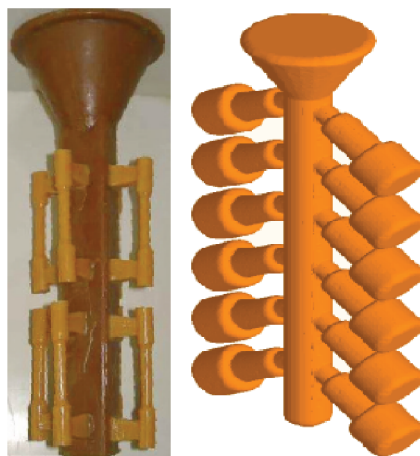


Figura 3.4: À esquerda: árvore de cera para microfusão de corpos de prova [30]. À direita: exemplo de CAD de árvore a ser impressa para microfusão [31].

3.3

Microfusão para o Suporte de Mola de Suspensão

Para realizar a microfusão dos corpos de prova e, posteriormente, do suporte de mola de suspensão, é preciso realizar uma série de etapas, como foi descrito na seção 2.2.2. Para a fabricação dos corpos de prova metálicos no campus da PUC-Rio, a partir dos modelos impressos em PMMA dispostos numa estrutura única de árvore, é preciso aplicar, sobre esta, as camadas de revestimento cerâmico.

A árvore de PMMA com os modelos de corpos de prova deve ser submetida a repetidos ciclos de aplicação das camadas de revestimento. Cada um deles consiste de: imersão da árvore em banho de lama cerâmica; recobrimento da camada de lama com partículas refratárias (estuco) com o uso de chuveiro de areia; e secagem da camada de revestimento aplicada. É preciso, portanto, dispor da quantidade necessária de materiais refratários [33] (Machado, 2005).

A Associação Brasileira de Fundição divide os materiais utilizados na confecção da casca cerâmica para microfusão nos seguintes grupos [32]: refratários, aglomerantes, agentes de molhamento, nucleantes e os antiespumantes. Dentre os materiais refratários, é possível trabalhar com compostos sílico-aluminosos, alumina, cristobalita, sílica fundida, quartzo e zirconita. Os materiais aglomerantes são, geralmente, compostos de sílica coloidal e silicato de etila.

Em Avaliação Microestrutural de Cascas Cerâmicas Utilizadas na Produção de Moldes para o Processo de Fundição por Cera Perdida [33] (Machado,

2005), é apresentada a composição da lama de revestimento e os tipos de estuco utilizados em um processo de microfusão de barras metálicas. O autor descreve a aplicação de camadas de lama na árvore de cera para microfusão compostas de sílica coloidal (30% de SiO_2 com diâmetro médio de partícula de 13nm), 0,2% de tensoativo, 0,2% de antiespumante diluído em água na mesma proporção e material refratário zirconita.

Nesse mesmo estudo, as lamas foram produzidas em tanques, como mostrado na Figura 3.5, sob temperaturas controladas de 18°C a 22°C, com umidade ambiente de 50% a 70%. Foram aplicadas 8 camadas de revestimento, com refratários para estucagem de zirconita nas duas primeiras camadas e de chamote nas seguintes, sendo uma nona e última camada apenas constituída de lama, para uma melhor vedação da casca cerâmica produzida.



Figura 3.5: Tanque com lama cerâmica para revestimento [33].

O procedimento apresentado pode servir de base para a microfusão dos corpos de prova desejados neste trabalho, constituídos de metal reciclado a partir de suportes de mola de suspensão já rompidos de caminhões e-Delivery. A árvore de PMMA impressa e já revestida ainda precisaria ser levada a um forno capaz de chegar a 1100°C de temperatura, para calcinação do revestimento. Nesse processo, a árvore de PMMA, interna ao revestimento evapora, a 700°C, como mencionado na seção 2.3.2.

Dessa forma, a produção da casca cerâmica requer controle tanto de temperatura como de umidade do ar e não existe, no momento, um espaço na Universidade dedicado a microfusão de componentes mecânicos ou de corpos de prova. Assim, além do obstáculo referente à obtenção dos materiais necessários, essa etapa da fabricação depende da capacidade de um laboratório da PUC-Rio ceder espaço para o tanque de revestimento e local para secagem da árvore

de microfusão. Além disso, como mencionado, é necessário o uso de um forno para calcinação em que caibam as dimensões da árvore revestida.

De qualquer forma, uma vez concluída a fabricação da casca cerâmica, é possível fundir os fragmentos metálicos de antigos suportes de mola de suspensão e escoar o material fundido - o que deve ser feito de uma só vez - no interior do vaso cerâmico. Dessa forma, o cadinho do forno de fundição deve ser capaz de produzir o volume de metal fundido necessário para preencher o interior da casca cerâmica. Caso isso não seja possível, seria preciso, portanto, produzir os corpos um a um, sem imprimir uma árvore inteira de corpos de prova em PMMA.

A fundição e o manuseio do cadinho também são dificuldades que dependem da participação da equipe do Laboratório de Processamento em Alta Temperatura (LPAT) do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio, assim como o tratamento térmico de recozimento a ser aplicado, que, em teoria, poderia ser realizado no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos (LMTT).

3.4

Os Ensaios Mecânicos para Validação de Método

Os corpos de prova, feitos a partir da liga reciclada microfundida e tratados termicamente, devem ser submetidos a diferentes testes de propriedades de material para se garantir que estas correspondam às aquelas normalizadas para o ferro fundido nodular GGG-40 do suporte de mola. Como mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas desejadas são: resistência à tração de 400MPa, tensão de escoamento de 250MPa, alongamento de 12% e dureza 201HB. Além disso, o limite de fadiga do material deve estar na faixa 150 a 200MPa.

Dessa forma, uma vez produzidos os corpos de prova, deve-se realizar o ensaio de dureza no material. Este é mais simples que o ensaio de tração, que o ensaio de fadiga e que a realização de metalografia após o tratamento térmico. Se a dureza do material estiver muito distante do valor esperado de 201HB, provavelmente foram cometidos erros de fabricação ou de tratamento térmico e, nesse caso, existem lacunas de conhecimento importantes quanto à metodologia proposta.

O ensaio de dureza é não destrutivo e ocorre em uma região muito pequena do corpo de prova, de modo que este mesmo pode ser posteriormente utilizado no ensaio de tração. O ensaio de dureza poderia ser realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Se o ensaio resultar em um valor de dureza próximo ao

esperado, deve-se realizar, então, o ensaio de tração, neste mesmo laboratório, para se obter os valores de resistência à tração, tensão de escoamento e alongamento do corpo de prova fabricado.

Mais uma vez, se as propriedades obtidas pelo ensaio de tração estiverem significativamente distantes do esperado, deve-se revisar todas as etapas realizadas em busca do erro de manufatura. No entanto, caso os valores de propriedades estejam próximos do esperado, então, deve-se fazer a metalografia do material do corpo de prova, para se analisar se, de fato, foi alcançada a microestrutura esperada para o ferro fundido nodular GGG-40. A metalografia poderia ser realizada no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos (LMTT) da PUC-Rio.

No caso dos valores de propriedades de material, medidos a partir dos corpos de prova, estarem coerentes com o que se deseja, é possível começar a desenvolver a fase de fabricação do suporte de mola de suspensão, segundo a mesma estratégia utilizada para a fabricação dos corpos de prova. Como se trata de uma peça de dimensões maiores do que as de corpos de prova, é possível ocorrerem fenômenos durante a solidificação da liga que resultam em porosidades ou quaisquer defeitos na estrutura do suporte de mola produzido.

Devido a essas eventuais falhas, que podem ocorrer durante a microfusão e solidificação do componente mecânico, deve-se fazer, uma vez obtida a peça, ensaio de dureza na superfície do mesmo. Assim, pode-se conferir, em um primeiro momento, se as propriedades mecânicas do componente estão parecidas com as dos corpos de prova produzidos e ensaiados. A metalografia em uma superfície do componente também pode ser realizada, para a verificação da microestrutura produzida. A avaliação metrológica da peça fabricada poderia ser realizada com o auxílio da equipe e dos instrumentos do Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) da PUC-Rio.

Como a microfusão resultaria na peça já formada com as geometrias que deve apresentar e já com um acabamento de qualidade, pelo menos em teoria, o teste que mais mostraria resultados quanto ao desempenho da peça em condições reais de serviço seria o teste veicular. Este deveria ser realizado como já é feito com os suportes de mola de suspensão dos protótipos de caminhão Delivery, como foi apresentado na seção 2.1.3, com sensores acoplados aos pontos críticos da peça e sob as diversas condições de pista simuladas na MAN Latin America.

4

Considerações Finais

A Engenharia Mecânica engloba, dentre diversas atividades, o projeto e a fabricação de elementos mecânicos, o desenvolvimento de máquinas para o processamento de materiais e o gerenciamento de produções. Dessa forma, o profissional da área tem responsabilidade direta sobre os impactos sociais e ambientais dos sistemas ou produtos que desenvolve.

Este trabalho representou um esforço para unir avanços tecnológicos existentes com as noções de sustentabilidade adquiridas ao longo do curso de graduação, a fim de propor uma metodologia de fabricação moderna e sustentável para um suporte de mola de suspensão traseira da nova linha de caminhões elétricos leves da MAN Latin America.

O trabalho mostrou que é possível, sim, associar os diferentes ramos da impressão 3D, da reciclagem metálica e da microfusão em um mesmo contexto de fabricação de componentes mecânicos. Além disso, a busca por conhecimentos relativos a tais temas, em diferentes bancos de bibliografia, não apresenta muitos obstáculos. É evidente, no entanto, que o desenvolvimento prático da metodologia proposta não é simples.

A estratégia de fabricação desenvolvida envolve o trabalho em conjunto de profissionais e técnicos de diferentes áreas do conhecimento (especialmente, mecânica, metalurgia e materiais) e, também, necessita de materiais para impressão 3D e revestimento cerâmico, bem como de equipamentos para fragmentação de sucata já selecionada, para análise de composição, fundição a alta temperatura, tratamento térmico, para controle de condições ambientais e ensaios mecânicos.

Desenvolver todas as etapas necessárias para uma primeira tentativa de fabricação dentro do campus da PUC-Rio, como colocado no capítulo 3, envolveria a participação de diversos laboratórios e suas equipes, além da formação de grupos de pesquisa, especialmente, nas áreas da reciclagem e da microfusão de peças. Porém, isso não é algo impraticável e a busca por processos de fabricação mais sustentáveis é um propósito nobre. Com essa iniciativa, também, é possível aproximar mais o Centro Técnico Científico da Universidade ao setor industrial.

Estando as técnicas da reciclagem metálica, a microfusão e a manufatura aditiva em PMMA dominadas, bastará ser modificado o projeto CAD de componente mecânico desejado para se poder fabricar os mais diferentes tipos de produto. É possível ainda, a partir deste trabalho, desenvolver pesquisas

futuras com o objetivo de tornar o caminho da fabricação proposto em algo mais automatizado, para que este esteja em maior concordância com os ideais da Indústria 4.0 e as tendências de manufatura atuais.

Foi visto, durante a pesquisa bibliográfica deste trabalho, que já são pesquisadas, em diferentes instituições, ferramentas para a modelagem e a simulação computacional do escoamento de metal fundido e da transferência de calor em processos de microfusão. A indústria da reciclagem, cada vez mais, automatiza seus processos e a manufatura aditiva já é, por si só, processo que segue uma série de passos lógicos bem definidos. A união dessas partes para automação da proposta deste trabalho, portanto, não deve ser um objetivo inalcançável.

Por fim, é importante ressaltar que o estabelecimento de cadeias produtivas versáteis é uma grande vantagem dentro de um contexto social, econômico e tecnológico que evolui, cada vez mais rapidamente. Além disso, a necessidade global de sustentabilidade é um fator que alimenta a busca por uma economia mais circular. Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso foi encarado como uma oportunidade, não só de aprofundar os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação sobre processos de fabricação de componentes mecânicos, mas, também, de promover uma relação entre manufatura e reciclagem metálica em acordo com os princípios de economia circular.

Referências Bibliográficas

- [1] CALLISTER JR.; W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [2] GERE, J.; GOODNO, B.J. **Mecânica dos Materiais: Tradução da 7 ed. norte americana**. 2 ed. brasileira. Cengage Learning, 2015.
- [3] DE CASTRO, J.T.P; MEGGIOLARO, M.A. **Fadiga: Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural Sob Cargas Reais de Serviço: Volume I - Iniciação de Trincas**. Createspace Independent Publishing Platform, 2009.
- [4] MORO, N.; AURAS, A.P; **Processos de Fabricação: Fundição**. Apostila do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2007.
- [5] KAPRANOS, P.; CARNEY, C.; POLA, A.; JOLLY, M. 5.03 - **Advanced Casting Methodologies: Investment Casting, Centrifugal Casting, Squeeze Casting, Metal Spinning, and Batch Casting**. Comprehensive Materials Processing, vol. 5, 39 - 67 p., 2014.
- [6] GIULIANO, J.A.S. *Os Processos de Fundição, como Ferramentas na Obtenção de Esculturas em Metal*. 2008. 150 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [7] BLACK, J.T.; KOHSER, R.A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 10 ed. Wiley, 2008.
- [8] MACHADO, C. F.; MORAVIA, W. G. **Caracterização do Resíduo de Casca Cerâmica do Processo de Fundição por Cera Perdida para Emprego como Pozolana**. Congresso Brasileiro de Cerâmica, 56, 2012, Curitiba, PR, Brasil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2012, 12 f.
- [9] BATISTA, A.A.; VIEIRA, R.D. **Tecnologia Mecânica**. Apostila da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.
- [10] KUMAR, P.; SINGH, R., AHUJA, I.P.S. **Investigations on dimensional accuracy of the components prepared by hybrid investment casting**. Journal of Manufacturing Processes, vol. 20, 525 - 533 p., 2015.
- [11] CARVALHO, A.C.; RAUPP-PEREIRA, F.; NETO, J.B.R.; OLIVEIRA, A.P.N. **Resíduo industrial como matéria-prima alternativa para a produção de filtros cerâmicos refratários**. Cerâmica, São Paulo, vol. 61, no. 359, 8, set. 2015.
- [12] TASCIOGLU, S.; INEM, B.; AKAR. N. **Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by the modification of its properties**. Materials and Design, vol. 25, 499 - 505 p., 2004.
- [13] VIEIRA, A.; SOSSAI, K.; MICAELA, R.; TONON, M.; VESCOVI, V.; VALLE, R. **Polimetilmetacrilato**. Revista Educação e Tecnologia, Faculdade de Aracruz - UNIARACRUZ, 2006.
- [14] RODRIGUES, V.P.; ZANCUL, E.S.; MANÇANARES, C.G.; GIORDANO, C.M.; SALERNO, M.S. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, no 3, 1 - 34 p., set, 2017.

- [15] MORO, N.; AURAS, A.P; **Processos de Fabricação: Metalurgia do Pó e o Futuro da Indústria**. Apostila do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2007.
- [16] ESPALIN, D.; ARCAUTE, K.; RODRIGUEZ, D.; MEDINA, F.; POSNER, M.; WICKER, R. **Fused Deposition Modeling of Polymethylmethacrylate for Use in Patient- Specific Reconstructive Surgery**. Rapid Prototyping Journal, vol. 16, no 3, 164 - 173 p., 2010.
- [17] OSSWALD, T.; BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OBERBACH, K.; SCHMACHTENBERG, E. **International plastics handbook: the resource for plastics engineers**. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2006.
- [18] SILVA, J.P.S. **Impactos ambientais causados por mineração**. Revista Espaço da Sophia, no 8, nov. 2007.
- [19] SUN, Z.; XIAO, Y.; AGTERHUIS, H.; SIETSMA, J.; YANG, Y. **Recycling of metals from urban mines: a strategic evaluation**. Journal of Cleaner Production, vol. 112, 2977 - 2987 p., 2016.
- [20] TRINDADE JR., J.C.N. *Obtenção, Mercado e Reciclagem de Sucatas Ferrosas na Indústria Siderúrgica Brasileira*. 2013, 47 f. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, nov. 2013.
- [21] MEDINA, H.V.; GOMES, D.B. **Reciclagem de automóveis: estratégias, práticas e perspectivas**. Série Tecnologia Ambiental, Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2003.
- [22] SHREDDER PLANT: MORITA SHREDDER PLANT PAVES THE WAY FOR RECYCLING OF WASTE MATERIALS. Disponível em: <www.morita119.com/en/products/recycling/shredder/001.html> Acesso em: 18 nov. 2018.
- [23] POPOVSKI, V. **Determining the Optimum Level of Inoculant Addition by Thermal Analysis - A Case Study**. Elkem Metals, Inc. Pittsburgh, PA, 2005.
- [24] RECKZIEGEL, V.N.; SCHNEIDER, I.A.H.; OSORIO, E.; LEMOS, L. **Reaproveitamento do resíduo do triturador de sucata em uma indústria siderúrgica**. Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 3, Bento Gonçalves - RS, Brasil, abril de 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012, 7 f.
- [25] PANTANO, G.; GROSSELI, G.M.; MOZETO, A.A.; FADINI, P.S. **Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar**. Quim. Nova, São Paulo, vol. 39, no 6, 732 - 740 p., 2016.
- [26] KOHMANN, T.M. *Modelos de Eficiência Metálica, Carregamento e Otimização de Composição Química para Ligas Ferrosas em Fundições*. 2015. 95 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015
- [27] OLIVEIRA, E.A. *Confiabilidade Metrológica na Determinação de Espécies Químicas em Materiais Siderúrgicos por Espectrometria de Fluorescência em Raios-X*. 2011. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [28] Site Institucional da MAN Latin America. Disponível em: <www.vwco.com.br> Acesso em: 18 nov. 2018.

- [29] Site Institucional da Voxeljet. Disponível em: <www.voxeljet.com/materials> Acesso em: 18 nov. 2018.
- [30] TREMARIN, R.C.; SPIM JR., J.A.; FERREIRA, C.R.F. **Influência da adição de aluminato de cobalto na lama de zirconita do processo de fundição de precisão na microestrutura e propriedades mecânicas do aço AISI 347**. CETEC/UNIVATES: Revista Destaques Acadêmicos, ano 3, no 4, 2011.
- [31] CHIMARELLI, B. Webinar: Microfusão. Disponível em: <istsistemas.com.br/webinar-micro-fusao-alcance-bons-resultados-de-modo-simples-e-rapido/> Acesso em: 18 nov. 2018.
- [32] Site Institucional da Associação Brasileira de Fundição. Disponível em: <www.abifa.org.br/abifa/> Acesso em: 18 nov. 2018.
- [33] MACHADO, I.M.L. *Avaliação Microestrutural de Cascas Cerâmicas Utilizadas na Produção de Moldes para o Processo de Fundição por Cera Perdida*. 2005. 119 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- [34] FREELERS. **Volkswagen Caminhões e Ônibus apresenta o elétrico e-Delivery na Alemanha**. Disponível em: <www.frotacia.com.br/volkswagen-caminhoes-e-onibus-apresenta-o-eletrico-e-delivery-na-alemanha/> Acesso em: 18 nov. 2018.
- [35] Imagem disponível em: <www.autossegedos.com.br/caminhoes-2/volkswagen/volkswagen-apresenta-novo-delivery-que-chega-em-seis-versoes/> Acesso em 21 nov. 2018.
- [36] Imagem disponível em: <www.carid.com/articles/coil-leaf-and-torsion-bar-describing-the-3-different-kinds-of-springs.html> Acesso em: 21 nov. 2018.
- [37] Vídeo "Nova Família Delivery Volkswagen Caminhões" disponível em: <youtu.be/ldbHvp9JNAY?list=WL>. Acesso em: 21 nov. 2018.
- [38] Imagem disponível em: <micromazza.wordpress.com/2015/03/11/fundicao-de-precisao-micromazza-pmp-microfusao/>. Acesso em: 21 nov. 2018.
- [39] Imagem disponível em: <www.slideshare.net/algodehistoria/tema-4-el-arte-griego-65504613>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [40] Imagem disponível em: <slideplayer.com.br/slide/10492528/>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [41] Imagem disponível em: <valtechmicrofundidos.com.br/apresentacao/>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- [42] Imagem disponível em: <pdf.directindustry.com/pdf/voxeljet/investment-casting/71477-739963.html>. Acesso em: 19 nov. 2018.
- [43] Análise de Desenhos de Projetos. Disponível em: <edpsm.usuarios.rdc.puc-rio.br/>. Material didático da disciplina Projeto de Sistemas Mecânicos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Acesso em: 19 nov. 2018.
- [44] Imagem disponível em: <forerunner3d.com/services/3d-printed-parts-3d-printed-materials/>. Acesso em: 19 nov. 2018.

- [45] Imagem disponível em: <rigid.ink/blogs/news/why-you-should-try-pmma-filament-and-how-to-print-it>. Acesso em: 19 nov. 2018.
- [46] Imagem disponível em: <3dlogics.com/blog/2018/6/25/how-many-kinds-of-3d-printing>. Acesso em 21 nov. 2018.
- [47] SOUSA, J.A.G; SALES, W.F; MACHADO, A.R. **A review on the machining of cast irons**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 94, 4073 - 4092 p., fev. 2018.

A

APÊNDICE

