

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

BRUNO DE LUKA OLIVEIRA LIMA

ANÁLISE COMPARATIVA DA LIBERAÇÃO DA GRAFITA EM LIGAS DE FERRO
FUNDIDO NODULAR POR MEIO DE LIMPEZA TÉCNICA E FILTRAGEM POR
MEMBRANA DE CELULOSE

Joinville

2023

BRUNO DE LUKA OLIVEIRA LIMA

ANÁLISE COMPARATIVA DA LIBERAÇÃO DA GRAFITA EM LIGAS DE FERRO
FUNDIDO NODULAR POR MEIO DE LIMPEZA TÉCNICA E FILTRAGEM POR
MEMBRANA DE CELULOSE.

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dr.(a) Viviane Lilian Soethe
Parucker

Joinville

2023

BRUNO DE LUKA OLIVEIRA LIMA

ANÁLISE COMPARATIVA DA LIBERAÇÃO DA GRAFITA EM LIGAS DE FERRO
FUNDIDO NODULAR POR MEIO DE LIMPEZA TÉCNICA E FILTRAGEM POR
MEMBRANA DE CELULOSE.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 07 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Dr.(a) Viviane Lillian Soethe Parucker
Orientador(a)

Dr.(a) Derce de Oliveira Souza Recouvreux
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr.(a) Rafael Gallina Delatorre
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família e amigos que me apoiaram e me deram suporte em todos meus passos e decisões durante minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pelo conhecimento e resistência, por me acompanhar em todos os caminhos trilhados.

Agradeço a minha mãe, Elci Gomes de Oliveira, pelo incentivo, paciência e carinho durante minha jornada durante minha graduação e seus desafios. Me apoiando tanto durante as fases boas como as ruins, sempre ao meu lado.

Agradeço meus amigos e colegas de faculdade que fiz desde o início, por me acolherem e estarem ao meu lado durante meu caminho, me apoiando em todas as decisões durante o curso.

Agradeço a minha família, que sempre expressaram apoio e carinho. Especialmente ao Calvin Braz Bueno, pela paciência e incentivo desde o começo e por estar ao meu lado em todas as etapas.

Agradeço aos meus tios, tias, primos, primas pelo carinho e incentivo, e principalmente a minha avó, Antônia Ferreira de Oliveira, que mesmo de longe sempre zelou por mim e me abençoou.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino de qualidade e gratuito, onde tive a oportunidade de trilhar meu caminho de conhecimento, conhecer colegas e amigos e o iniciar minha vida profissional.

Agradeço aos professores universitários que tive a oportunidade de presenciar as disciplinas, e que me ajudaram a guiar minha graduação.

Agradeço a minha orientadora, prof^a Dra. Viviane Lilian Soethe Parucker, que me guiou com sabedoria durante a realização desse estudo, me incentivando desde o começo.

Agradeço a empresa que me forneceu o material e onde tive a oportunidade de trabalhar como estagiário, também aos meus colegas de setor e laboratório. Os conhecimentos e experiências que tive ao longo desse meu período de estágio foram imprescindíveis para a realização do presente neste trabalho.

RESUMO

Diante da competitividade e demandas econômicas para o mercado automotivo, estratégias inovadoras de gestão para o setor se tornam essenciais para a sobrevivência e vantagem competitiva das empresas, especialmente na otimização da eficácia e eficiência dos processos de fabricação. Isso é crucial no mercado automotivo, onde a limpeza técnica de peças se mostra fundamental para garantir o desempenho e a segurança dos veículos. As normas VDA 19:2015 e a ISO 16232:2018 surgiram com o intuito de atender a essas necessidades na indústria automotiva. Ela documenta e padroniza técnicas para caracterizar a limpeza de peças, com foco na detecção de contaminação por partículas geradas durante a produção. A esse procedimento de análise de sujidade, com base nessas normas, é dado o nome de análise de *technical cleanliness*. A inspeção de contaminantes, de acordo com as normas citadas, é realizada em três etapas: extração, filtragem e análise. A escolha dos métodos em cada etapa considera diversos fatores, como investimento, acordo entre fornecedor e cliente, geometria da peça e materiais utilizados. Para peças de ferro fundido, comuns na indústria automotiva, a liberação de partículas de grafita durante o teste de sujidade é uma consideração importante, pois pode interferir na análise quantitativa realizada por microscopia óptica, onde o equipamento contabiliza e caracteriza as partículas quanto sua geometria. A quantidade exagerada dessas partículas causa a saturação na membrana filtrante, a qual muitas montadoras automotivas preferem que seja de celulose. Portanto, é necessário entender quais ligas de ferro fundido têm maior propensão a liberar grafita em quantidades significativas. Desta forma, no presente estudo, em parceria com uma indústria de fundição de peças automotivas localizada em Joinville, Santa Catarina, realizou-se a análise de *technical cleanliness* em peças de três distintas ligas de ferro fundido nodular. Para isso, além das variações nas composições químicas, a análise estudou também as diferenças dos resultados do teste para os corpos de prova brutos e usinados. Realizando-se uma análise estatística de comparação de médias das partículas contadas pelo microscópio, os resultados da análise destacaram uma diferença significativa na quantidade de partículas liberadas entre os corpos de prova em estado bruto e os que passaram pelo processo de usinagem, sendo que o primeiro caso mostrou uma quantidade superior. No entanto, ao comparar as diferentes ligas, não foi identificada uma discrepância substancial, uma vez que a diferença não foi estatisticamente significativa.

Palavras-chave: Peças automotivas. Ligas de ferro fundido nodular. *Technical cleanliness*. Membrana filtrante de celulose.

ABSTRACT

Amidst competitiveness and economic demands in the automotive market, innovative management strategies for the sector become essential for the survival and competitive advantage of companies, especially in optimizing the effectiveness and efficiency of manufacturing processes. This is crucial in the automotive market, where technical *cleanliness* of parts proves essential to ensure the performance and safety of vehicles. The VDA 19:2015 and ISO 16232:2018 standards have emerged to meet these needs in the automotive industry. They document and standardize techniques for characterizing part *cleanliness*, focusing on detecting particle contamination generated during production. This procedure of dirt analysis, based on these standards, is referred to as technical *cleanliness* analysis. Contaminant inspection, according to the mentioned standards, is carried out in three stages: extraction, filtration, and analysis. The choice of methods in each stage considers various factors such as investment, agreement between supplier and customer, part geometry, and materials used. For cast iron parts, common in the automotive industry, the release of graphite particles during the dirt test is an important consideration as it can interfere with the quantitative analysis performed by optical microscopy, where the equipment counts and characterizes particles based on their geometry. An excessive amount of these particles causes saturation in the filter membrane, which many automotive manufacturers prefer to be made of cellulose. Therefore, it is necessary to understand which cast iron alloys are more prone to release graphite in significant quantities. In this way, in the present study, in partnership with an automotive casting industry located at Joinville, Santa Catarina, a technical *cleanliness* analysis was conducted on parts of three distinct nodular cast iron alloys. In addition to variations in chemical compositions, the analysis also studied the differences in test results for raw and machined specimens. Performing a statistical analysis of the mean particle counts observed under the microscope, the results of the analysis revealed a significant difference in the quantity of particles released between the specimens in their raw state and those that underwent the machining process. In the former case, a higher quantity of particles was observed. However, when comparing different alloys, no substantial discrepancy was identified, as the difference was not statistically significant.

Keywords: Automotive parts. Cast iron alloys. *Technical Cleanliness*. Cellulose filter membrane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono	19
Figura 2 - Faixas de composição para as ligas de ferro fundido usadas comercialmente.....	20
Figura 3 - Micrografia de um ferro fundido nodular com matriz ferrítica	21
Figura 4 - Classificação das técnicas de fabricação de metais.....	23
Figura 5 - Diagrama simplificado da obtenção de ferro-gusa	24
Figura 6 - Ilustração de lavadoras de peças industriais modelo Spinula Systems: (A) SPIN 360M; (B) Spinflow.....	25
Figura 7 – Fluxograma esquemático do processo de <i>technical cleanliness</i> segundo a VDA 19.1:2015.....	27
Figura 8 – Formatos dos bocais para o instrumento de enxágue sobre uma peça na cabine de extração: (A) jato direcional, (B) jatos paralelos, (C) jatos cruzados, (D) jatos em leque.....	28
Figura 9 – Ilustração de uma cabine de extração utilizada para <i>technical cleanliness</i>	29
Figura 10 – Esquema ilustrativo do sistema de filtragem na cabine de extração.....	31
Figura 11 – Exemplos de superfícies de membranas filtrantes: (A) membrana porosa de celulose, (B) membrana de malha de poliéster.....	31
Figura 12 – Membranas filtrantes utilizadas em testes de sujidade contendo regiões de saturação de partículas.....	32
Figura 13 – Ilustração de uma análise gravimétrica.....	34
Figura 14 – Exemplo de elementos contaminantes encontrados sobre o elemento filtrante: (A) cavaco metálico, (B) material fibroso, (C) polímero.....	34
Figura 15 – Esquema ilustrativo de um sistema experimental	36
Figura 16 – Fluxograma da execução do trabalho	38
Figura 17 – Dimensões do corpo de prova padrão usado na fábrica.....	40
Figura 18 – Imagem ilustrativa do corpo de prova utilizado nos testes, evidenciando a área usinada.....	41
Figura 19 – Ilustração de uma lavadora por aspersão.....	41
Figura 20 – Imagem ilustrativa dos corpos de prova preparados para serem levados à cabine de extração.....	42
Figura 21 – Exemplos de membranas de filtração de celulose.....	43

Figura 22 – Corpo de prova disposto na câmara de extração.....	45
Figura 23 – Enxáge sob pressão sendo realizado na superfície usinada do corpo de prova	46
Figura 24 – Posicionamento da membrana sobre a balança de precisão para análise gravimétrica.....	47
Figura 25 - Ilustração do microscópio óptico utilizado para analisar as membranas filtrantes.....	47
Figura 26 – Ilustração da análise realizada sobre a membrana filtrante pelo microscópio óptico.....	48
Figura 27 – Exemplos da ocupação de partículas sobre as mebranas de celulose. .	49
Figura 28 - Média da quantidade de partículas por faixa de tamanho para os resultados da análise óptica com corpos de prova de LIGA 1	51
Figura 29 – Resultado da análise óptica realizada nos corpos de prova de LIGA 1 brutos e usinados	52
Figura 30 – Média da quantidade de partículas por faixa de tamanho para os resultados da análise óptica com corpos de prova de LIGA 2.....	54
Figura 31 – Resultado da análise óptica realizada nos corpos de prova de LIGA 2 brutos e usinados	55
Figura 32 – Média da quantidade de partículas por faixa de tamanho para os resultados da análise óptica com corpos de prova de LIGA 3.....	57
Figura 33 – Resultado da análise óptica realizada nos corpos de prova de LIGA 3 brutos e usinados	58
Figura 34 – Média dos resultados da análise gravimétrica [mg] para as ligas de ferro fundido nodulares testadas.	59
Figura 35 – Quantidade média de partículas em cada liga para os corpos de prova brutos	60
Figura 36 – Quantidades de partículas para cada liga de ferro fundido testada.	61
Figura 37 – Gráfico comparativo entre as quantidades médias totais de partículas entre corpos de prova brutos e usinados.	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros do teste <i>cleanliness</i> para extração de partículas.	44
Quadro 2 - Divisão da quantidade de membranas usadas no trabalho: (A) Membranas para LIGA 1, (B) Membranas para LIGA 2, (C) Membranas para LIGA 3	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ductilidade de ligas ferrosas	21
Tabela 2 - Propriedades químicas das ligas de ferro fundido nodulares estudadas.	39
Tabela 3 - Propriedades mecânicas das ligas de ferro fundido.....	39
Tabela 5 – Características do teste em branco.	44
Tabela 6 - Resultados da análise de microscopia óptica com os corpos de prova de LIGA 1	50
Tabela 7 - Quantidade de partículas encontradas na análise óptica das membranas com partículas metálicas dos corpos de prova de LIGA 1	51
Tabela 8 - Resultados da análise de microscopia óptica com os corpos de prova de LIGA 2	53
Tabela 9 - Quantidade de partículas encontradas na análise óptica das membranas com partículas metálicas dos corpos de prova de LIGA 2	54
Tabela 10 - Quantidade de partículas encontradas na análise óptica das membranas com partículas metálicas dos corpos de prova de LIGA 3	56
Tabela 11 - Quantidades de partículas encontradas nos testes com os corpos de prova de LIGA 3.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCC - Cúbica de Corpo Centrado

CT – Computed Tomography

DOE – Design of Experiments

EDX – Energy Dispersive X-ray

IR – Infrared

ISO – International Organization for Standardization

ISO 16232:2018 - International Organization for Standardization 16232:2018

LIBS – Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SEM – Scanning Electron Microscopy

STD – Standard

VDA 19:2015 - Verband der Automobilindustrie 19:2015

DIN - Deutsches Institut für Normung

DIN 8580:2022 - Deutsches Institut für Normung 8580:2022

α – Ferrita

G_n – Grafita nodular

Fe_3C - Cementita

μm – micrômetros

mg – miligrama

mm – milímetro

ml – mililitro

cm – centímetro

min – minuto

l – Litro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVOS.....	15
1.1.1. <i>Objetivo Geral</i>	15
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. PADRONIZAÇÃO E PRINCÍPIOS DA LIMPEZA TÉCNICA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	17
2.2. CARACTERÍSTICAS DO FERRO FUNDIDO NODULAR	19
2.3. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE FERRO FUNDIDO	22
2.4. MÉTODO DE EXTRAÇÃO POR ENXÁGUE SOB PRESSÃO, FILTAGEM E ANÁLISE PADRONIZADA.....	26
2.4.1. <i>Extração por Enxágue Sob Pressão</i>	28
2.4.2. <i>Teste de valor em branco</i>	29
2.4.3. <i>Filtragem por membrana de celulose</i>	30
2.4.4. <i>Métodos de Análise</i>	33
3. METODOLOGIA.....	36
3.1 ESCOLHA DAS LIGAS DE FERRO FUNDIDO E MÉTODO DE LIMPEZA	38
3.2. MÉTODO DE EXTRAÇÃO E ANÁLISE <i>CLEANLINESS</i>	42
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	50
4.1. ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA DE LIGA 1	50
4.2. ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA DE LIGA 2	53
4.3. ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA PARA LIGA 3	55
5. CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva desempenha um papel de relevância na economia global, emergindo como a sexta maior economia em termos do volume anual de negócios. Durante o ano de 2017, as projeções indicaram um crescimento para cerca de 14 milhões de trabalhadores empregados em escala mundial. Esse setor não apenas desempenha um papel importante nas atividades econômicas, mas também assume uma posição estratégica ao gerar empregos ao redor do globo (ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO, 2020).

Somado a isso, a competitividade nos mercados atuais e o cenário econômico demandam cada vez mais que as empresas adotem estratégias de gestão inovadoras. Essas estratégias são essenciais para garantir a sobrevivência, o crescimento e a vantagem competitiva das organizações. É nesse contexto que as empresas buscam abordagens que otimizem simultaneamente a eficácia e a eficiência de seus processos de fabricação. Isso pode ser alcançado por meio da aprimoração da qualidade de produtos e/ou serviços (DIAS, 2021).

Esses fatores são relevantes principalmente para o mercado automobilísticos, no qual os sistemas automotivos devem desempenhar suas funções de maneira a aprimorar a eficiência do veículo e a segurança dos usuários. Segundo João Dias (2021), partículas de sujeira em um componente automotivo podem se deslocar de um local não crítico para uma região sensível e prejudicar o funcionamento e o desempenho de diferentes sistemas veiculares.

Segundo Cestari (2016), a presença de partículas indesejáveis na superfície de um componente mecânico, ou fluído, podem causar quebras e mau funcionamento de sistemas veiculares, além de ocasionar problemas críticos de vedação e montagem, podendo levar a obstrução prematura de filtros. Podem também contribuir para o desgaste acelerado da superfície de peças.

Na indústria automotiva, cerca de 80% do peso bruto de um veículo é composto de material metálico como, por exemplo, ligas de ferro fundido, empregados na fabricação de componentes como virabrequim, eixos, válvulas, engrenagens, peças do sistema de direção, transmissão, entre outros (Orłowicz, 2015). Dessa forma, realizar uma inspeção de sujidade sobre essas peças se torna importante para a segurança dos passageiros e correto funcionamento dos sistemas veiculares.

Nesse contexto, em 2004, a Associação de Indústria Automotiva Alemã criou a norma VDA Volume 19, para documentar e padronizar técnicas e procedimentos para caracterizar a limpeza de peças da cadeia de produção na indústria automobilística, sendo revisada em 2015. A proposta do documento era servir como base para a análise de *Technical Cleanliness*, traduzido livremente como limpeza técnica, para detectar, da melhor maneira possível, a contaminação por partículas geradas pela linha de produção sobre a superfície de peças automotivas (VDA, 2015).

A norma VDA 19:2015 ainda afirma que as especificações *cleanliness* podem estar presentes, dependendo da viabilidade técnica e econômica da empresa, em todos os setores da linha de produção, seleção de materiais, logística, colaboradores, equipamentos e postos de trabalho. A inspeção de contaminantes sobre a superfície das peças é o foco da norma VDA 19.1, enquanto a VDA 19.2 foca no local de inspeção, tendo que atender ainda as normas de Sala Limpa da NBR ISO 14644.

A análise de contaminantes sobre a superfície de um componente é estabelecido internacionalmente pela norma ISO 16232:2018 – “*Road vehicles – Cleanliness of components and system*”. O objetivo desta norma é melhorar a avaliação de resultados de inspeção de limpeza técnica e fornecer informações sobre como definir especificações de limpeza e explicar os procedimentos caso os valores limites sejam ultrapassados (ISO, 2018).

Essa inspeção de contaminantes é realizada em três etapas: extração dos contaminantes, filtragem e análise. a primeira etapa consiste em utilizar um fluido para desunir as partículas da peça analisada, a segunda é sobre utilizar um elemento filtrante para armazenar esses particulados que serão analisados na terceira etapa. A norma ainda afirma que a escolha dos métodos de cada etapa varia dentre fatores como investimento para o teste, acordo entre fornecedor e cliente, geometria da peça, área a ser analisada e materiais utilizados (VDA, 2015).

Para a fase de filtragem, a norma VDA 19:2015 compara a aplicabilidade de filtros de malha e membranas fibrosas, como a de nitrato de celulose. Cada uma dessas opções apresenta propriedades distintas; segundo a norma, a escolha pela membrana de celulose é comumente feita quando se requer informações sobre partículas extremamente pequenas. Contudo, é importante notar que esse tipo de material retém partículas que devido ao tamanho diminuto, não são relevantes para a aprovação no teste de sujidade da peça (VDA, 2015).

Considerando a aplicação em larga escala de peças de ferro fundido na fabricação de componentes para a indústria automobilística, testes de sujidade se tornam cada vez mais comuns. Desta forma, deve-se tomar especial atenção a este tipo de material, uma vez que, ele possui tendência de promover liberação de partículas de grafita. Esse fenômeno ocorre por diversos motivos devido as características da fundição, elementos de liga e tratamento do material (VDA, 2015).

Essa liberação de partículas metálicas interfere na inspeção e contagem de partículas relevantes para o sucesso do teste de sujidade durante a etapa de análise por microscópio óptico, causando uma saturação sobre a membrana de celulose, como indicado pela norma VDA 19. Dessa forma, a informação de quais ligas de ferro fundido possuem uma característica de liberação de grafita em maior quantidade se torna muito importante para as empresas fabricantes de peças automotivas (VDA, 2015).

Diante disso, no presente estudo, realizou-se a inspeção *cleanliness* em peças de três distintas ligas ferro fundido nodular, considerando corpos de prova de geometria e forma de fabricação idênticas, variando apenas a composição dos elementos de liga. Os corpos de prova utilizados seguem a padronização própria da empresa de fundição onde este estudo foi realizado, para testes de pintura e proteção superficial para peças automotivas.

Espera-se encontrar uma diferença na quantidade de particulados tanto entre os tipos de liga quanto entre peças usinadas e brutas (peças não usinadas) devido as características de acabamento escolhidas para os corpos de prova serem diferentes e das propriedades da composição química de cada liga de ferro fundido nodular testada.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar a análise comparativa por inspeção *cleanliness* de três ligas de ferro fundido nodular utilizadas no setor automotivo, utilizando corpos de prova padrão e filtragem por membrana de celulose, após passarem por processo de lavagem.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar o procedimento de limpeza técnica e análise *cleanliness* utilizando corpos de prova padronizados de três ligas diferentes de ferro fundido nodular separados por usinados e não usinados (brutos);
- Comparar quantitativamente as ligas de ferro fundido escolhidas de acordo com os resultados da análise gravimétrica e quantidade de partículas metálicas presentes nas membranas de celulose;
- Determinar qual das ligas de ferro fundido estudadas tem maior probabilidade de apresentar um resultado inconclusivo, ao passar por inspeção *cleanliness*, devido à saturação da membrana filtrante.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PADRONIZAÇÃO E PRINCÍPIOS DA LIMPEZA TÉCNICA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.

As principais transformações tecnológicas no setor automotivo são impulsionadas pela busca na redução de emissões de poluentes, diminuição de combustível, aumento do desempenho dos veículos e redução do tamanho dos motores. As ideias trás desses avanços é manter a potência, o torque e a resposta dos sistemas veiculares, sem que o motorista perceba uma queda de performance do veículo (RIOSULENSE, 2021).

Tendências de mercado como a redução do tamanho do motor, requerem que as peças sejam cada vez mais limpas para suas aplicações na indústria automotiva, devido as regiões dos sistemas veiculares serem sensíveis a interferências de funcionamento devido a presença de partículas de sujeira. As normas estabelecidas para garantir que esses componentes estejam satisfatoriamente limpos geram a necessidade de investimento em tecnologias voltadas a limpeza industrial (SCHULZ, 2013).

A crescente complexidade técnica dos produtos na indústria automobilística requer condições de fabricação cada vez mais limpas de contaminantes. Resíduos particulados provenientes do processo de manufatura presente nas superfícies das peças causam redução de performance, gasto de matéria prima e mão de obra, retrabalhos e redução de produção (PISCANI, 2017).

Nos processos de tratamento de remoção de contaminantes nas superfícies de materiais metálicos, o processo de limpeza possui uma importância significativa, uma vez que uma peça limpa de maneira incompleta é a causa principal do surgimento de defeitos no acabamento superficial (FONTES E DÍNIS, 2001).

Normas que estabelecem a quantidade de partículas contaminantes presentes em peças de relevância funcional para sistemas veiculares são evidentes nesse cenário de indústria automotiva. Na Europa, a Associação Alemã da Indústria Automotiva criou a norma VDA, Volume 19, para documentar e padronizar técnicas e procedimentos para caracterizar a limpeza de peças da cadeia de produção na indústria automobilística (SCHULZ, 2013).

A VDA 19 visa não somente a limpeza superficial, mas sim na cadeia de fabricação de peças automotivas como um todo. Uma pequena partícula contaminante em um local inadequado pode ocasionar defeitos e falhas no sistema. Dessa forma, Doria Schulz (2013), entende que a limpeza técnica, ou “*Technical Cleanliness*”, é um critério de qualidade que a indústria automobilística deve atender para garantir a precisão do projeto de engenharia.

A Organização Internacional de Normalização (ISO) publicou a norma ISO 16232 - *Road vehicles – Cleanliness of components and system*, que estabelece os procedimentos para análise de contaminação para peças veiculares, de maneira semelhante à divulgada pela VDA 19:2015. Segundo a norma, é necessário o controle sobre a quantidade de partículas presentes nos componentes fabricados, de maneira que forma de se obter esse controle é a medição pela análise quantitativa desses contaminantes.

Para a norma VDA 19.1:2015, o primeiro passo para a realização da inspeção de *cleanliness* é identificar as áreas mais sensíveis à presença de partículas. Dessa maneira, o objetivo é caracterizar os particulados em relação a criticidade funcional das regiões do equipamento da maneira mais precisa possível com relação a: efeito prejudicial ao componente (bloqueios, obstruções, curtos elétricos); tamanho e quantidade de partículas, concentração em uma região, propriedade do material das partículas (VDA, 2015).

A norma ainda afirma que a aprovação de uma peça em um teste de análise *cleanliness* depende dos limites requisitados pelos clientes das fabricantes de peças, como por exemplo a montadora sueca Volvo tem como base a norma STD 102-0007, onde solicita a contagem de partículas, o tamanho da maior partícula metálica e a massa da membrana filtrante como parâmetros para serem analisados (VOLVO, 2019).

A VDA 19:2015 aponta que o impacto de custo sobre a linha de produção se torna maior segundo as requisições solicitadas pelo cliente, dessa forma deve ser levado em consideração ao ser estabelecido o acordo dos testes a serem realizados. Setores e processos afetados pelos requisitos são, por exemplo: fabricação (fundição, usinagem, rebarba), logística, modificações de material, ambiente fabril e mão de obra (VDA, 2015).

Segundo Alexandra Dzetit e Gheorghe Nagi (2017), ao pesquisarem sobre a importância do teste *cleanliness* na manufatura de peças automotiva, deve-se levar

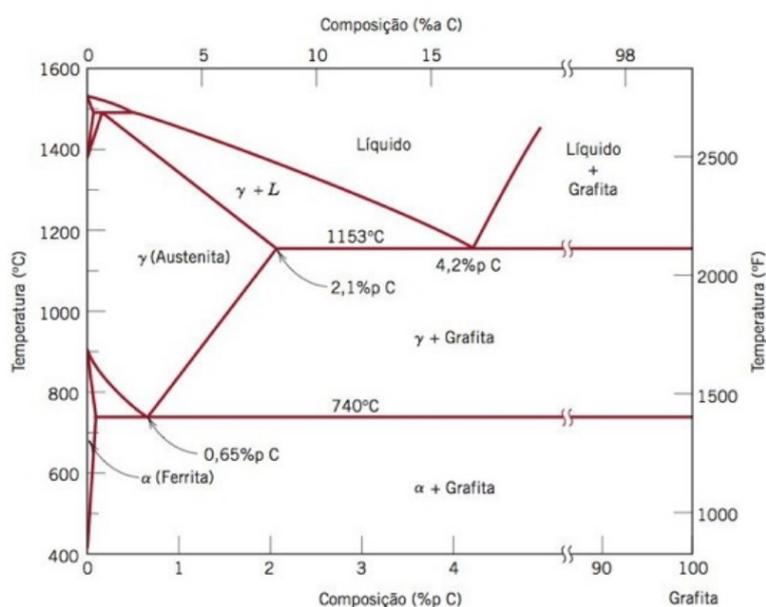
em consideração a utilização do teste apenas caso a presença dos contaminantes possam representar riscos ao funcionamento do sistema onde está inserido. Além disso, a realização do teste deve ser considerada desde o princípio do projeto do componente, adotando as medidas necessárias, como instalação de filtros, controlando a limpeza do local de produção e cuidados de manuseio.

2.2. CARACTERÍSTICAS DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Diversos materiais podem ser empregados em diferentes projetos de engenharia. É papel do engenheiro conhecer suas propriedades e a influência das mesmas no comportamento dos materiais que vai utilizar no projeto do produto, seja ele uma ponte, computador ou automóvel. Há uma variedade de materiais utilizados na manufatura de um automóvel, por exemplo, como ferro, aço, vidro, plásticos, borracha, entre outros. Dessa forma, deve-se ter um critério de escolha para o material adequado para cada peça (VAN VLACK, 2000).

O Ferro fundido pode ser descrito como uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,14%, entretanto na prática esse número está entre 3,0% e 4,5%. Essas composições estão em fase líquida para uma faixa de temperatura de aproximadamente 1150 °C e 1300 °C, como ilustrado na Figura 1, que apresenta um diagrama de fase Ferro-Carbono (CALLISTER, 2015).

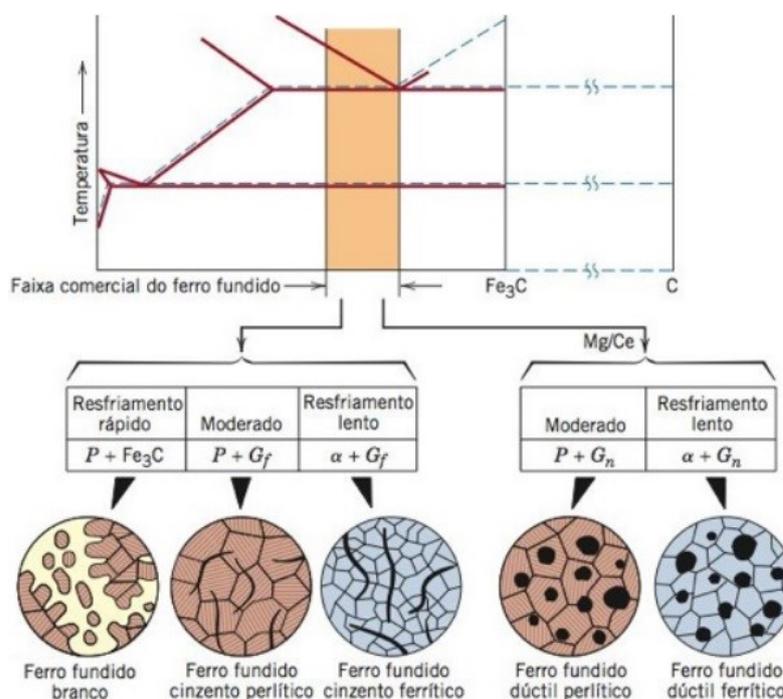
Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono



Fonte: Callister, 2015.

Observando o diagrama de fases apresentado na Figura 1, para os ferros fundidos, a fase rica em carbono é intitulada de grafita, que de acordo com Callister (2015), é o resultado da dissociação da cementita com uma taxa de resfriamento controladamente mais lenta para ligas de ferro-carbono com concentração de silício maiores de 1%. Os autores ainda afirmam que de maneira geral, o carbono está presente nos ferros fundido na forma de grafita, de tal forma que a microestrutura e as características mecânicas dependem diretamente da composição e do tratamento térmico do material.

Figura 2 - Faixas de composição para as ligas de ferro fundido usadas comercialmente.



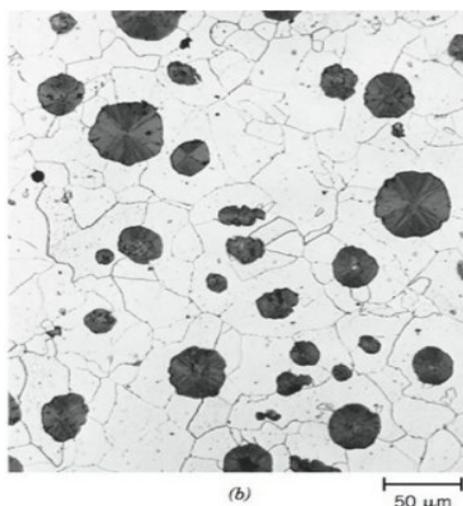
Fonte: Adaptada de Callister, 2015.

Na Figura 2, é apresentado um esquema com as possíveis microestruturas formadas nos diferentes tipos de ferros fundidos. De acordo com a Figura 2, pode-se verificar que a variação da composição e do tratamento térmico aplicado na obtenção dessas ligas ferrosas afeta diretamente a microestrutura do material. A fase matriz da liga de ferro fundido dúctil, ou nodular, pode ser ferrítica ($\alpha + G_n$), de estrutura cúbica

de corpo centrado (CCC); ou perlítica ($P + G_n$), formada por lamelas alternadas de ferrita (α) e cementita (Fe_3C) (CALLISTER, 2015).

Segundo Callister (2015), ferro nodular, ou ferro dúctil, é o nome dado a liga resultante da formação da liga de ferro fundido com a grafita em forma de nódulos, partículas com formatos esféricos, ilustrado na Figura 3, ao se adicionar magnésio e/ou cério ao material antes da fundição. A fase matriz em torno dos nódulos é perlítica, para taxas de resfriamento lentas, ou ferrítica para taxas com velocidade moderada, variando de acordo com o tratamento térmico.

Figura 3 - Micrografia de um ferro fundido nodular com matriz ferrítica



Fonte: Callister, 2015.

A presença dos nódulos de grafita, como os mostrados na Figura 3, na matriz de ferro nodular nas ligas promove menores concentrações de tensão internas no material, se comparado com grafita lamelar formada em ligas de ferro fundido cinzento. A Tabela 1 apresenta um quadro comparativo entre as propriedades de alongamento dos diferentes tipos de ligas ferrosas (VAN VLACK, 2000).

Tabela 1 - Ductilidade de ligas ferrosas

Tipo de liga ferrosa	Alongamento a cada 50 mm (%)
Aço ferrítico	50
Ferro nodular ferrítico	10 a 20
Ferro maleável ferrítico	± 15
Ferro cinzento ferrítico	1

Fonte: Adaptado de Van Vlack, 2000.

Na composição do ferro fundido nodular, verifica-se além do carbono, a incorporação de silício, que além de auxiliar podem oscilar entre 1,8% e 6%, entretanto, elevadas concentrações de carbono e silício propiciam a flutuação de nódulos da grafita. Em contrapartida, a redução do teor de carbono aprimora a contração da solidificação, e a diminuição do teor de silício resulta na formação de carboneto em vez de grafita (CHARRE, 2004).

Os componentes que beneficiam a formação esferoidal da grafita em ferros fundidos nodulares desempenham um papel importante como dessulfurantes. Dessa forma, é importante manter o teor de enxofre, outro elemento presente em ligas de ferro fundido, o mais baixo possível, minimizando assim as perdas do elemento nodulizante por meio desse mecanismo. Em situações em que o metal base apresenta teores mais elevados de enxofre, torna-se necessário realizar adições mais substanciais de liga nodulizante, acarretando não apenas um aumento de custos, mas também uma maior propensão à formação de drosses (SANTOS, 2000).

O manganês também possui concentrações consideráveis em ligas de ferro fundido, em teores elevados, a liga pode apresentar microsegregação, o que pode ocasionar a formação de carbonetos em torno de grãos, afetando negativamente a ductilidade e tenacidade do material. Para uma condição em que a ductilidade deve ser maior, o teor de concentração desse elemento deve ser de no máximo 0,3% (ALTERKAR, 2018).

Segundo Callister (2015), as aplicações típicas de peças metálicas de ferro fundido nodular são para componentes que necessitam suportar pressões, como válvulas e bombas; engrenagens e partes de máquinas para alta resistência, pinhões, cilindros e peças com movimentos deslizantes, virabrequins e componentes gerais automotivos. Adicionalmente, possuem limite de resistência a tração variando entre 380 MPa e 480 MPa, e ductilidade variando entre 10% e 20%.

2.3. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE FERRO FUNDIDO

A fabricação de peças metálicas pode ser efetuada de diversas maneiras, podendo passar por processos mecânicos, no qual as peças passam por aplicações de tensões externas, como por exemplo: operações de conformação, como

forjamento, extrusão e usinagem; ou por processos metalúrgicos, como técnicas de fundição ou metalurgia do pó, que ocorrem geralmente com o material sendo submetido a altas temperaturas (AGOSTINHO, VILELLA e BUTTON, 2004). A Figura 4 ilustra um fluxograma com exemplos de técnicas de fabricação de metais.

Figura 4 - Classificação das técnicas de fabricação de metais.



Fonte: Callister, 2015.

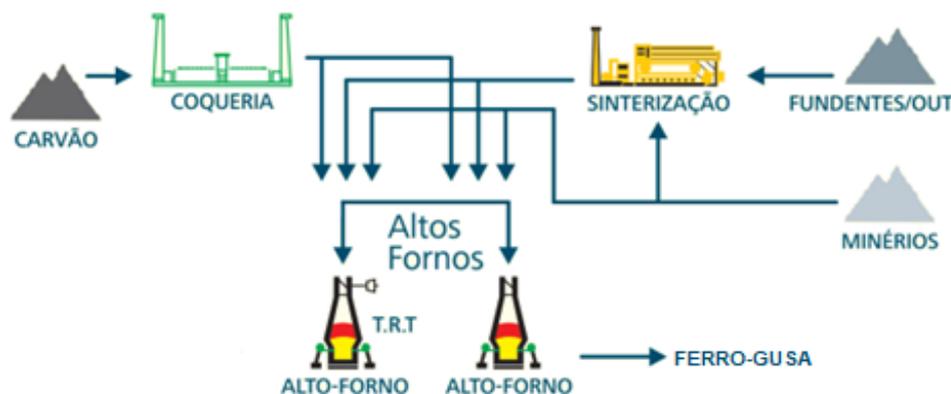
A Figura 4 ilustra o processo de fundição como uma das técnicas de fabricação de metais, esse procedimento consiste na técnica de fabricação onde o metal em estado líquido é despejado no molde com a cavidade no formato e medidas adequadas correspondendo as características da peça desejada. Aplicada a variados tipos de ligas metálicas com temperaturas de fusão não elevada e fluidez adequada ao processo, sendo as mais utilizadas aço e ferro fundido, além de ligas de alumínio, cobre, zinco e magnésio (MORO, AURAS, 2007).

Como pode ser visualizado na Figura 4, o processo de fundição pode ser realizado de diferentes formas: em molde de areia, com matriz, de precisão, com espuma perdida ou contínua. Segundo Callister (2015), elas são aplicadas quando: deseja-se obter uma peça de geometria complexa, ou a liga a ser trabalhada possui uma baixa ductilidade de tal forma que a conformação a quente ou a frio seria dificultada ou ainda o custo de fabricação por fundição seja menor se comparado a outras técnicas.

As matérias primas da fundição de peças metálicas ferrosas são: o minério de ferro, coque (carvão) e fundente. A Figura 5 ilustra a obtenção em alto-forno do ferro-gusa, matéria prima das ligas ferrosas. Os componentes são inseridos na parte superior do alto-forno, onde um ar pré-aquecido é soprado pela parte inferior, o carvão

fornece o carbono para a redução de óxido de ferro, além de ser a principal fonte desse elemento para a liga (TÂMEGA, 2017).

Figura 5 - Diagrama simplificado da obtenção de ferro-gusa



Fonte: Adaptado de Silva, 2011.

O coque atua como combustível no processo e realiza a redução do óxido de ferro, favorecendo a obtenção de ferro puro. O fundente, na forma de calcário (carbonato de cálcio) é utilizado para facilitar a separação entre ferro fundido e a escória, ou seja, os componentes provenientes do minério de ferro que não são interessantes para a fabricação do material final. O ferro gusa é obtido com alto teor de carbono, e com proporções descontroladas de manganês, silício, enxofre e outros elementos contaminantes. O produto então passa por um processo de refino e é transportado até um conversor (MORO e AURAS, 2007).

Do conversor, o metal líquido é então vazado em moldes, onde ocorre o processo de lingotamento do ferro gusa, que é resfriado e solidificado. Assim, a etapa subsequente é a de conformação mecânica, podendo, por exemplo, passar por processos de forjamento e/ou laminação, formando assim chapas, trilhos, tubos e perfis específicos para suas aplicações (MORO e AURAS, 2007).

Para o processo de fundição o metal líquido é depositado em moldes, usualmente feitos a base areia, podendo ter geometrias mais complexas, dependendo de exigências do projeto e aplicações da peça, acabamento superficial, precisão dimensional e custo de operação. Com o metal preenchendo a cavidade do molde, ou matriz, a cavidade macho, que forma a parte interna da geometria da peça é também posicionado e aplicada a pressão necessária (MATOS, 1997).

Saindo da etapa de molde, os produtos resultantes podem ser classificados como tarugos ou lingotes, acabados ou semi-acabados. Dessa fase eles passam por uma etapa de rebarba, que consiste em correções necessárias para retirar excessos de materiais que ficaram devido geometria e preenchimento dos moldes, beneficiando assim as próximas etapas (OLIVEIRA, 2020 apud MENDES, 2020).

Dependendo da finalidade da peça, saindo da etapa de rebarba após a fundição, poderia ser concluída sua fabricação. Entretanto, a peça pode passar por etapas a mais, como a usinagem. Segundo a norma DIN 8580:2022, este procedimento consiste na remoção de material sob a forma de cavaco, conferindo à peça formatos, outras dimensões ou acabamento superficial (DIN, 2022).

Das etapas de rebarba e/ou usinagem, as peças então passam por uma etapa de limpeza industrial. Esse procedimento é responsável por remover partículas contaminantes ou qualquer outro resíduo das etapas anteriores. A Figura 6 ilustra exemplos de lavadoras de peças industriais.

Figura 6 - Ilustração de lavadoras de peças industriais modelo Spinula Systems: (A) SPIN 360M; (B) Spinflow.



Fonte: Spinula System (2023).

A lavadora de câmara única, exemplificada na Figura 6 (A), é comumente composta por sprays de aspersão posicionados nas paredes da câmara interna da máquina, circundando a peça a ser lavada. Esses sprays distribuem um fluido de limpeza, geralmente um solvente ou desengraxante, sobre a peça, que está disposta em uma grade giratória. O modelo de lavadora apresentado na Figura 6 (B) é

configurado como um túnel com um trilho, onde a peça é inserida na entrada e, ao percorrer o interior, é atingida pelos jatos de spray de aspersão.

2.4. MÉTODO DE EXTRAÇÃO POR ENXÁGUE SOB PRESSÃO, FILTRAGEM E ANÁLISE PADRONIZADA.

Estabelecidas pelo Associação da Indústria Automobilística Alemã primeiramente em 2004 e depois revisada em 2015, a VDA 19 descreve e padroniza os requerimentos, técnicas, ferramentas e procedimentos necessários para realizar corretamente a análise *cleanliness* para as peças da indústria automotiva, dessa forma aprimorando a qualidade informativa e a comparabilidade dos resultados (VDA, 2015).

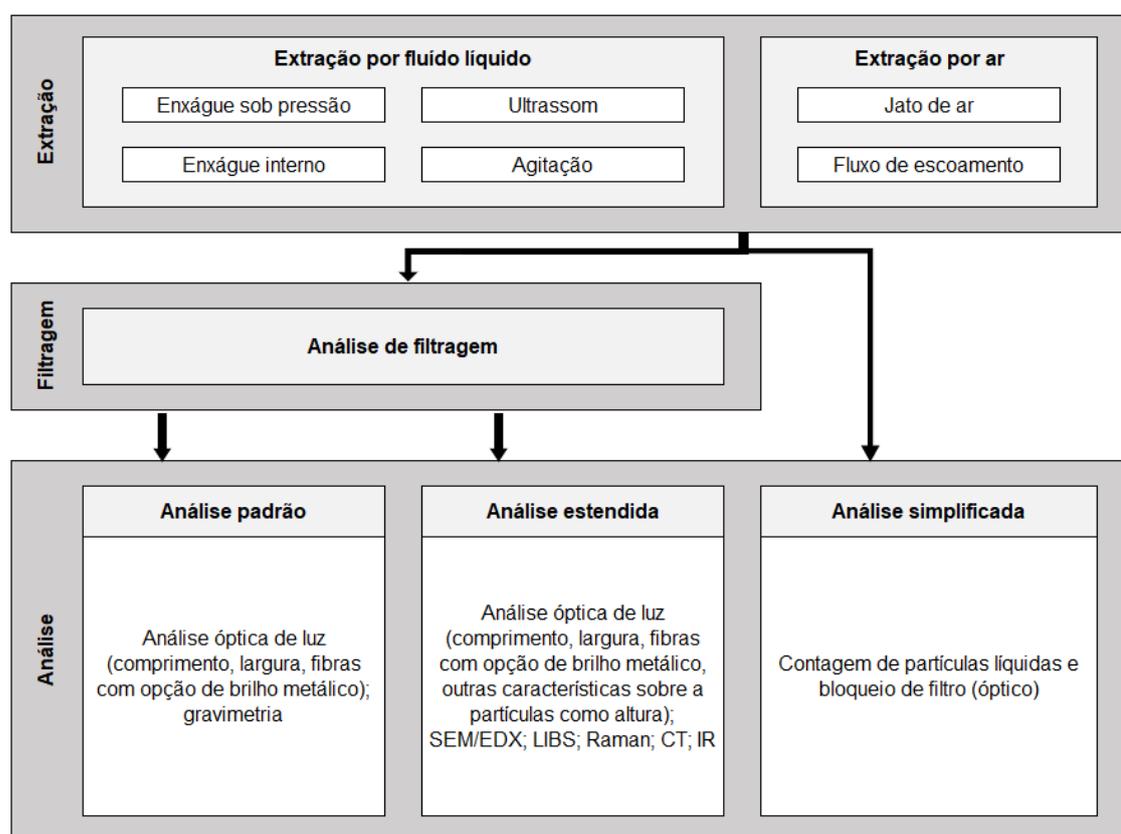
Para Lanzinger *et al.* (2023), o objetivo da análise *cleanliness* é prevenir a contaminação em toda a linha produtiva através de otimização da logística, manuseio correto e melhoria de processos mecânico. Procedimentos como perfuração, fresagem e usinagem geram partículas contaminantes, tanto pelo processo quanto das ferramentas utilizadas, gerando uma quantidade de partículas que podem permanecer na superfície das peças, mesmo com o cuidado durante a realização do trabalho. Na análise mencionada, matérias orgânicas ou resíduo de óleos e graxas não são relevantes, uma vez que o foco são as partículas metálicas.

Segundo a norma VDA 19:2015, a inspeção *cleanliness* detecta, da melhor maneira possível, os contaminantes particulados sobre a superfície dos componentes testados que foram gerados pelo processo de manufatura. Diferentemente de outros testes diretos, como por exemplo a análise visual ou tátil, esse procedimento é indireto, possuindo uma etapa de amostragem, que consiste na extração do fluido de teste. Na sequência estão descritos os procedimentos e métodos utilizados para a correta análise *cleanliness*.

A norma VDA 19:2015 ainda afirma que o procedimento de inspeção de limpeza pode ser desmembrado em três etapas principais: extração, filtragem e análise, conforme representado no fluxograma da Figura 7. Após a peça ser lavada na etapa de lavação, ela é levada ao local onde será efetuada a análise *cleanliness*. A etapa de extração pode utilizar tanto fluido líquido quanto ar, enquanto a análise pode ser conduzida de forma padrão, estendida ou simplificada.

A abordagem de extração simplificada difere das outras duas pois dispensa o processo de filtragem. A escolha entre essas opções é influenciada principalmente pelos requisitos de aprovação específicos de cada empresa aos quais as peças serão enviadas, bem como as propriedades mecânicas e a geometria dos componentes analisados (DEROSE; BARBERO; SCHEFFLER, 2022).

Figura 7 – Fluxograma esquemático do processo de *technical cleanliness* segundo a VDA 19.1:2015



Fonte: Adaptado de VDA 19, 2015.

Segunda a Norma VDA 19:2015, a etapa de extração consiste em desprender as partículas contaminantes das superfícies da peça analisada, sendo definida de acordo com a geometria (tamanho, formato, acessibilidade as superfícies escolhidas para serem analisadas), material e tipo de adesão do particulado a ser removido.

Para a escolha do componente de filtragem, a norma informa que deve ser averiguado o tamanho esperado e quantidade das partículas que serão extraídas da peça. Enquanto que para a escolha do método de análise, o método padrão deve ser escolhido sempre que não haja um resultado específico requerido. O método

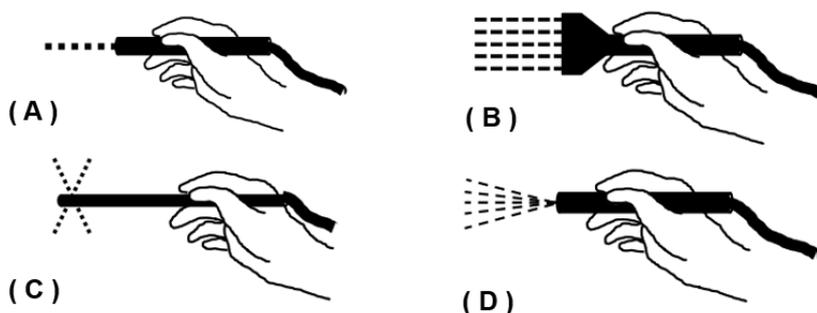
simplificado é escolhido quando há um limite de equipamentos ou o foco é a contagem de partículas líquidas e não metálicas (VDA, 2015).

2.4.1. Extração por Enxágue Sob Pressão

Segundo a norma VDA 19:2015, os métodos de extração, conforme ilustrados na Figura 7, são categorizados com base no tipo de fluido, podendo ser executados por líquido, tendo essas quatro formas de extração: "enxágue sob pressão", "enxágue interno", "ultrassom" e "agitação"; ou por meio de ar, com duas abordagens: "jato de ar" e "fluxo de escoamento". A escolha desses métodos é predominantemente influenciada pela geometria da peça a ser inspecionada, bem como pelo acesso ao local desejado para a aplicação do fluido ou ar.

A técnica de extração por enxágue sob pressão envolve a utilização de mangueiras equipadas com bocais de jato de fluidos líquidos, seja em padrões paralelos, formato de leque, diretos ou especialmente projetados para componentes com geometrias que permitem o enxágue direto. O método, entretanto, não é eficaz na limpeza de superfícies internas e áreas de difícil acesso, abrangendo, por exemplo, furos cegos e galerias. A Figura 8 ilustra exemplos de formatos usuais de bocais de jato de fluido.

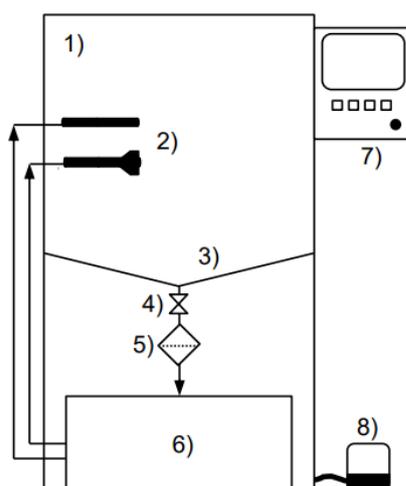
Figura 8 – Formatos dos bocais para o instrumento de enxágue sobre uma peça na cabine de extração: (A) jato direcional, (B) jatos paralelos, (C) jatos cruzados, (D) jatos em leque



Fonte: Adaptado de VDA 19.1, 2015.

O processo de extração por enxágue sob pressão ocorre em uma cabine de extração, a qual é composta por: uma câmara de pressão de enxágue, área de coleta, ferramenta de enxágue, registro, local de filtragem, tanque para o fluido de teste, unidade de controle de programação e um pedal para a gestão do fluxo. A Figura 9 representa ilustrativamente esse equipamento de extração conforme definido na norma VDA 19.1:2015 (VDA,2015).

Figura 9 – Ilustração de uma cabine de extração utilizada para *technical cleanliness*.



Fonte: VDA 19.1, 2015.

A Figura 9 ilustra os setores da cabine de extração, com a câmara (1) onde a peça é posicionada. Após ser aplicado o enxágue sob pressão, o fluído extraído se direciona ao fundo da câmara (3) passando então por um canal onde há um registro para controle do fluxo (4) e caindo sobre o filtro (5) alocado na máquina, depositando os contaminantes, e o fluído então segue para o tanque (6). Para controlar o fluxo do fluído ejetado pelo bocal (2), é usado um pedal (8). Todo esse processo é monitorado e programado pelo sistema de controle (7) (VDA, 2015).

2.4.2. Teste de valor em branco

Quanto mais limpo for um componente, ou seja, quanto menor a quantidade de partículas contaminantes sobre suas superfícies, maior o risco de contaminação por particulados externos ao processo de manufatura, como por exemplo o próprio ambiente do laboratório onde é realizado o teste ou presentes no líquido de extração.

Para mitigar esse problema, é realizado um teste de valor em branco, em que consiste em realizar o procedimento da inspeção em um elemento filtrante antes da filtragem (ISO, 2018).

O valor em branco não deve ultrapassar 10% da quantidade máxima permitida e/ou da massa registrada na análise gravimétrica para a aprovação da peça a ser testada. Além disso a maior partícula encontrada deve ser menor ou igual a metade da maior permitida, um exemplo citado pela norma, indica se o valor máximo permitido para o solicitante do teste para o tamanho de uma partícula ser de 500 μm , então a maior partícula encontrada no teste em branco deve ser no máximo de 50 μm (VDA, 2015).

2.4.3. Filtragem por membrana de celulose

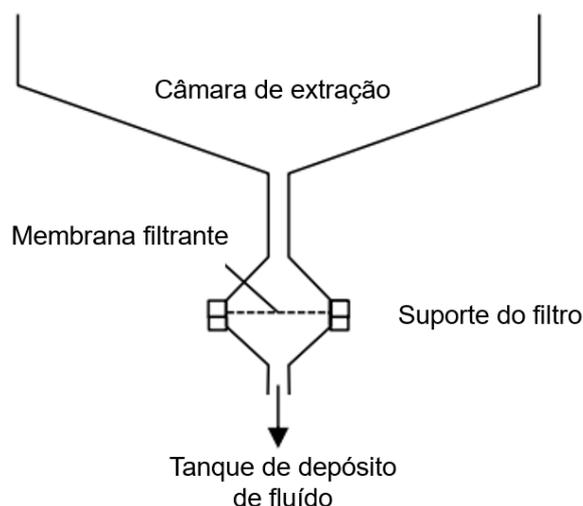
O sistema de filtragem, consiste no depósito das partículas extraídas do componente e suspensas no fluido de teste sobre a superfície de um filtro de análise. Geralmente é feito o uso de filtração por vácuo para garantir que as partículas sejam levadas até o filtro. Essa etapa é decisiva para a execução correta na qualidade dos resultados subsequentes da análise de *cleanliness* (VDA, 2015).

A ISO 16232:2018 afirma que as propriedades do filtro, como a compatibilidade química com o fluido de extração, capacidade de retenção das partículas por meio do tamanho dos poros do filtro, e outras características ópticas, podem variar consideravelmente dependendo do componente alvo do teste e do método de análise escolhido.

A VDA 19:2015 indica os materiais e equipamentos necessários sendo: o filtro de ou membrana de análise, os equipamentos para garantir a retenção de partículas (como a bomba a vácuo), pinça para manusear a membrana de filtragem, placa de Petri e um ambiente isolado para armazenamento e uma máquina de aquecimento e secagem para controle de temperatura e umidade.

A norma ainda afirma que o procedimento consiste primeiramente na preparação dos equipamentos que serão usados, como membrana filtrante, microscópio óptico para contagem das partículas, balança para análise gravimétrica, placa de Petri para depositar a membrana, dessecador para controle de umidade e pinça para manuseio da membrana. A Figura 10 ilustra o sistema de filtragem da cabine de extração utilizada no teste.

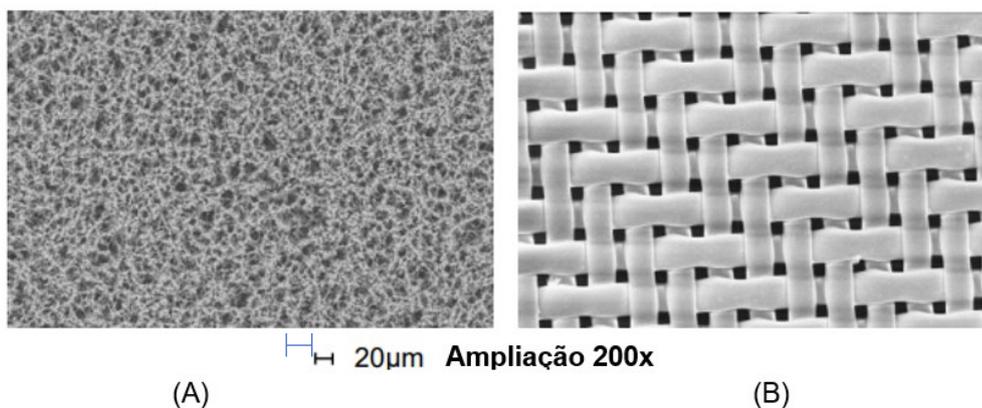
Figura 10 – Esquema ilustrativo do sistema de filtragem na cabine de extração.



Fonte: Adaptado de VDA 19, 2015.

O material do filtro é definido de acordo com o tamanho das partículas que devem ser extraídas e testadas e com o material do fluido de extração. De maneira generalizada, o material pode ser dividido em duas categorias, de malha ou membrana porosa, com o primeiro podendo ser de celulose ou nylon e o segundo de poliéster ou nylon. A Figura 11 evidencia exemplos desses tipos de filtros.

Figura 11 – Exemplos de superfícies de membranas filtrantes: (A) membrana porosa de celulose, (B) membrana de malha de poliéster.



Fonte: VDA 19.1, 2015.

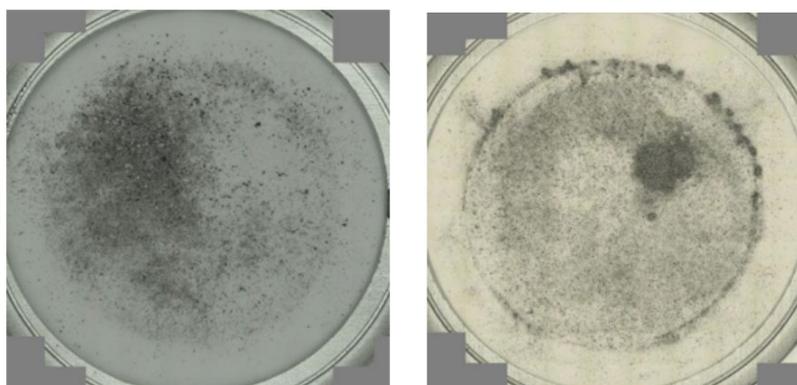
Segundo a norma VDA 19:2015, as vantagens de uso do filtro de membrana de celulose estão relacionadas a capacidade do material de ser altamente compatível

com a leitura do microscópio óptico, além de ter uma superfície relativamente suave para a retenção das partículas, entretanto possui tamanho de poros indefinidos, de tal maneira que retem também as partículas que não são relevantes para a análise.

A VDA 19:2015 destaca as vantagens do uso de filtros com malha definida, em que o tamanho e a geometria dos poros são previamente especificados. Isso resulta em uma menor retenção de partículas e uma absorção reduzida de umidade na superfície após o teste, proporcionando uma melhoria nos resultados da gravimetria. No entanto, é importante observar que, em análises utilizando microscópio óptico, a eficiência pode ser comprometida se a luz utilizada for insuficiente.

Para que um teste de *cleanliness* seja feita de forma coerente, a membrana deve estar disposta de uma maneira que o microscópio ótico consiga realizar a leitura de maneira eficiente, não resultando em uma inspeção duvidosa ou incapaz de relatar a quantidade de material retido na membrana (VDA, 2015). A Figura 12 apresenta dois exemplos de problemas de saturação que podem ocorrer nos elementos filtrantes durante o teste.

Figura 12 – Membranas filtrantes utilizadas em testes de sujidade contendo regiões de saturação de partículas.



Fonte: VDA 19.1, 2015.

As imagens apresentadas na Figura 12, mostram regiões sobre as membranas onde há um acúmulo de partículas sobre determinadas áreas. Segundo a VDA 19, essas regiões de saturação de partículas ocasionam problemas durante a análise sob o microscópio pois dificulta a leitura e contagem dos contaminantes. Os

resultados, segundo as descrições na norma, são inconclusivos, uma vez que não é possível realizar a contagem das partículas de maneira eficiente.

A ocupação da membrana se torna um importante fator na análise de limpeza técnica uma vez que quanto maior a área ocupada pelas partículas, maior a dificuldade de análise coerente. Para os filtros de membrana porosa, uma ocupação maior que 1.5% apresenta problemas quanto a contagem e visualização das geometrias das partículas. Esse número é de 3% para os elementos filtrantes de malha (ISO, 2018).

2.4.4. Métodos de Análise

Os procedimentos descritos neste capítulo estão de acordo com as normas VDA 19 e ISO 16232, esses afirmam que os métodos de análise de *cleanliness* são divididos em três categorias: padronizada, estendida e simplificada. De maneira geral, a forma padronizada é utilizada sempre que não seja necessária a obtenção de um resultado de um equipamento específico requisitado pelo solicitante do teste. Fazem parte da análise padronizada o processo de gravimetria, realizada por uma balança de precisão, e a análise por luz óptica, realizada pelo microscópio óptico.

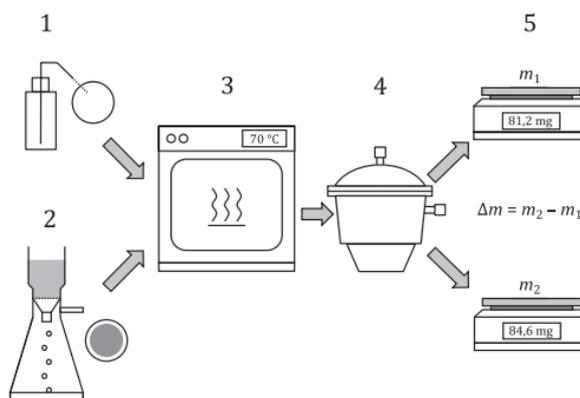
A gravimetria consiste em pesar o elemento filtrante para determinar a massa total das partículas extraídas na etapa anterior. Segundo a norma ISO 16232:2018, o procedimento é realizado ao se pesar a membrana antes e depois do procedimento de filtração. Primeiramente a membrana é molhada com o fluido de extração, então é levada ao secador, posteriormente colocado no dessecador para controle de umidade e depois, com o uso de uma balança de precisão é aferida a massa (m_1).

O procedimento é então realizado com a membrana após o fluido com as partículas extraídas coletar o material, passar pela secadora e pelo dessecador, considerando as mesmas características de tempo e temperatura de acordo com os parâmetros do teste, então é pesada na mesma balança de precisão. A massa encontrada então (m_2) é subtraída da anterior, resultando na variação das massas (Δm) (VDA, 2015).

O esquema é ilustrado pela Figura 13, mostrando o procedimento com a membrana antes da filtração (1) e depois com a presença das partículas (2). Os outros equipamentos mostrados são o secador (3), o dessecador (4) e a balança de precisão (5). A norma ainda aponta que a análise gravimétrica não fornece outras

informações como quantidade, tamanho ou natureza das partículas, portanto serve apenas como complemento para o teste como um todo.

Figura 13 – Ilustração de uma análise gravimétrica

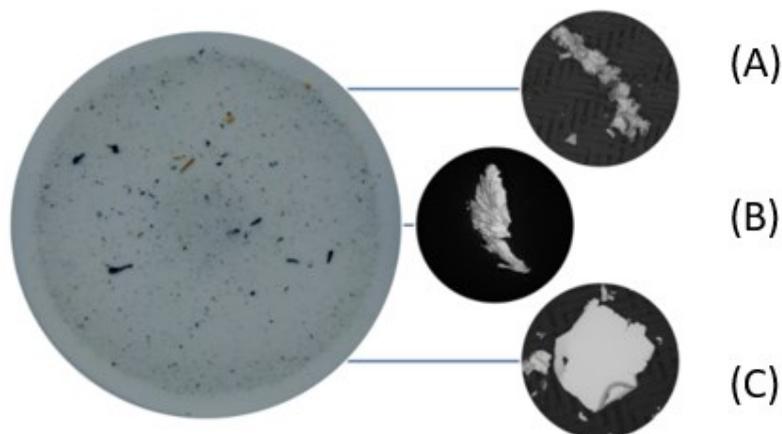


Fonte: ISO 16232, 2018.

Para as informações sobre quantidade, tamanho e ocupação da membrana é utilizado um microscópio que faça análise óptica. A membrana contendo as partículas é posicionada no campo de iluminação do equipamento, uma fonte de luz então é apontada para a superfície da membrana, dessa forma refletindo a luz em direção a lente. A reflexão emitida pelo material é interpretada pelo microscópio em metálico, não-metálico e fibra (ISO, 2018).

Um exemplo de imagem registrada pela análise pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Exemplo de elementos contaminantes encontrados sobre o elemento filtrante: (A) cavaco metálico, (B) material fibroso, (C) polímero



Fonte: Holzapfel e Kreck, 2014.

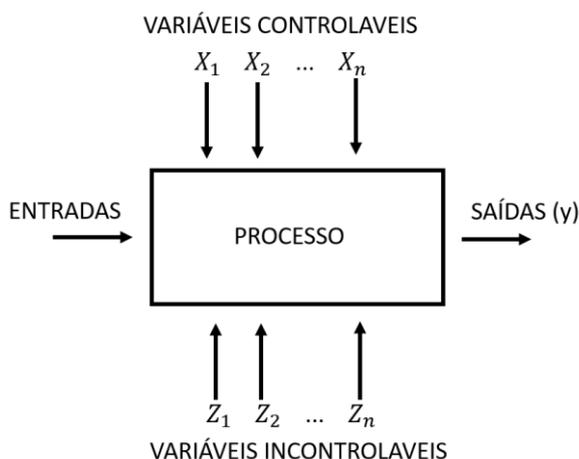
As imagens obtidas pela análise microscópica são então analisadas pelo responsável por realizar o teste, pois embora o equipamento tenha uma precisão considerável, a presença de partículas sobrepostas ou muito próximas podem gerar inconclusões. Algumas medidas podem ser tomadas para evitar a saturação ou sobreposição de partículas, como análise em cascata, em que são realizadas filtragens consecutivas; ou um espalhamento de partículas em regiões de saturação (VDA, 2015).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no experimento para comparar e analisar os resultados do procedimento de limpeza técnica aplicada nos corpos de prova das diferentes ligas de ferro fundido nodulares selecionadas. Para esse propósito será apresentada a escolha das ligas de ferro, corpos de prova, métodos de limpeza aplicados e, por fim, a análise comparativa utilizada.

Um experimento pode ser definido como uma série de execuções, ou testes, de um processo, modificando intencionalmente as variáveis de entradas do sistema, ilustrado esquematicamente na Figura 15, para poder observar os motivos ou características que alteram as saídas, ou seja, os resultados (MONTGOMERY, 2012).

Figura 15 – Esquema ilustrativo de um sistema experimental



Fonte: Adaptado de Montgomery (2012).

Utilizando como base a Figura 15, pode-se identificar para este trabalho as entradas como os processos de fabricação dos corpos de prova, desde a fundição, passando pela usinagem, acabamento, limpeza e parâmetros da análise de sujidade. Esses processos serão os mesmos para todas as peças testadas, sendo assim determinado que os corpos de prova devem seguir as mesmas etapas de fabricação e análise de sujidade das peças automotivas fabricadas com as ligas de ferro fundido selecionadas.

Foi utilizada uma variável controlável (X), referente ao tipo de liga de ferro fundido, alterando assim as características químicas de cada corpo de prova. As variáveis incontroláveis estão associadas ao manuseio dos operadores durante todo

processo de fabricação e análise de sujidade, e possíveis diferenças geométricas entre as peças analisadas. Entretanto, as variáveis incontrolláveis serão consideradas como não influentes no resultado, de forma que não afetam o objetivo deste trabalho.

Uma ferramenta que pode ser utilizada para uma aproximação matemática de análise e condução do experimento é o chamado Planejamento de Experimentos, do inglês DOE (*Design of Experiments*), utilizado na indústria para aprimoramento de processo e melhora de produtividade. Utiliza-se do princípio de manipulação das variáveis controláveis para analisar, através de técnicas estatísticas, os resultados obtidos (DURAKOVIC, 2017).

Segundo Montgomery (2012), os três princípios básicos do planejamento experimental são: casualização, replicação e controle local. Randomização se refere a aleatoriedade na ordem das amostras testadas, replicação é a repetição dos testes utilizando os mesmos parâmetros para todos e por fim, controles locais são usados para direcionar o foco dos fatores, bloqueando fatores que não são importantes para o experimento.

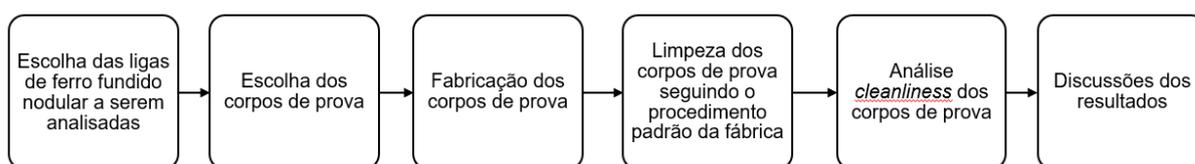
De acordo com Durakovic, de uma maneira geral, para realizar o planejamento e condução de experimentos, utiliza-se os seguintes passos:

1. Ter ciência do problema: identificar o problema que será investigado.
2. Definição da variável de saída: designar qual saída mensurável será utilizada para chegar ao objetivo do experimento.
3. Determinar os fatores e seus níveis: definir quais fatores que interferem no sistema e quais os níveis de influência.
4. Escolha da ferramenta experimental a ser usada: depende do número de amostras disponíveis, de quais fatores são mais influentes e da quantidade de réplicas usadas.
5. Realizar o experimento: fazer os testes para coletar os dados do sistema.
6. Analisar os dados: utilizar da ferramenta escolhida para realizar a análise quantitativa ou qualitativa dos dados obtidos.
7. Descrever as conclusões e recomendações: etapa de validação dos resultados, com gráficos, dados e recomendações para ações a serem tomadas com base no que foi testado.

3.1 ESCOLHA DAS LIGAS DE FERRO FUNDIDO E MÉTODOS DE LIMPEZA

Devido a pesquisa ser realizada dentro do setor de fundição de uma fábrica de peças automotivas, a escolha do material a ser utilizado para comparação tem algumas limitações físicas e logísticas. Primeiramente foram analisados quais materiais usados em todas as peças de ferro fundido produzidas dentro da fundição passam por análise de sujidade. Posteriormente foi realizado um levantamento para identificar quais, dentre esses materiais, possui histórico de saturação de membrada de análise de sujidade. Para realizar o experimento, seguiu-se a lógica de procedimentos descritos no fluxograma ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma da execução do trabalho



Fonte: Autor, 2023.

Como ilustrado pela Figura 16, o primeiro passo para realizar o estudo é a escolha das ligas de ferro fundido nodulares, seguido pela escolha dos corpos de prova que serão fabricados com as ligas determinadas. Segue-se então todo o processo fabril das peças: fundição, usinagem e rebarba. Posteriormente, as peças passam por um processo de limpeza em uma lavadora dedicada. Após a lavagem, as peças são encaminhadas para o laboratório, onde se realiza a análise de *cleanliness*. Após a conclusão da análise, segue-se para a avaliação dos resultados e as discussões relacionadas aos mesmos.

Para a escolha do material a ser usado, foi informado pela fábrica que três ligas de ferro fundido nodular apresentam histórico de reprovação na análise de sujidade devido a saturação de grafita nas membranas. A Tabela 2 apresenta esses materiais, aqui intitulados LIGA 1, LIGA 2 e LIGA 3, quanto as composições químicas, sendo essas informações disponibilizadas pela fábrica onde foram realizadas as confecções dos corpos de prova e a análise *cleanliness*.

Tabela 2 - Propriedades químicas das ligas de ferro fundido nodulares estudadas.

	C (%)	C / Peça	Si (%)	Si/Peça (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Sn+Cu (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cr (%)	V (%)
LIGA 1	3,60-3,70	3,55-3,65	1,80-1,90	2,20-2,40	máx. 0,40	máx. 0,06	máx. 0,02	máx. 0,01	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,08	0,05
LIGA 2	3,36-3,46	3,25-3,35	3,20-3,30	3,60-3,80	máx. 0,33	máx. 0,05	máx. 0,02	máx. 0,01	máx. 0,02	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,06	0,05
LIGA 3	3,60-3,70	3,55-3,65	1,80-1,90	2,15-2,35	máx. 0,40	máx. 0,06	máx. 0,02	máx. 0,01	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,08	0,05

Fonte: Registro da fábrica (2023).

Analisando os dados da Tabela 2, pode-se verificar a semelhança entre as ligas 1 e 3 quanto às suas composições químicas gerais, mudando apenas quanto a quantidade de silício por peça específica, ou seja, a quantidade de silício de acordo com a aplicação de determinada peça, escolhida por suas características mecânicas, de acordo com as características descritas na Tabela 3, disponibilizada pela fábrica onde os corpos de prova foram confeccionados.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das ligas de ferro fundido.

	Limite de escoamento (MPa)	Limite de tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
LIGA 1	350	500	7	170-200
LIGA 2	360	500	10	185-245
LIGA 3	400	600	3	210-280

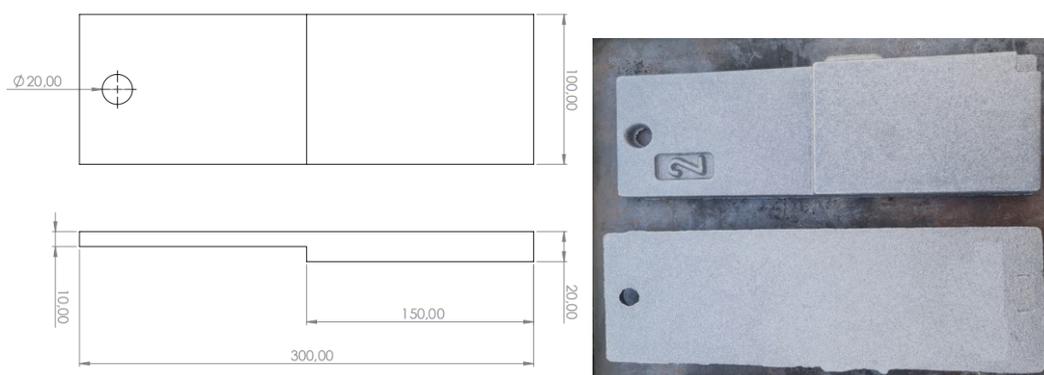
Fonte: Registro da fábrica (2023).

A Tabela 3, relativa às propriedades mecânicas de cada liga de ferro escolhida, serve como base de padronização para as peças produzidas na fábrica onde foi realizado o experimento, nela é possível observar que cada material é apropriado para uma aplicação diferente. As Ligas 1 e 2 possuem características semelhantes, a segunda possui características que aumentam seu limite de escoamento e capacidade de dureza enquanto diminui sua capacidade de alongamento. Já entre a LIGA 1 e 3 que possuem uma composição química bem semelhante, mostradas na Tabela 1, possuem características mecânicas distintas, de tal forma que a LIGA 3 apresenta limite de escoamento, tração e dureza maiores, porém com alongamento 4% menor em relação a LIGA 1.

Na fundição onde foram realizados os testes para este trabalho, análises *cleanliness* de peças fabricadas com essas ligas de ferro fundido apresentaram um

histórico de reprovação por inconclusão devido a saturação das membranas filtrantes, sendo esse o fator fundamental para a escolha dessas ligas como base do estudo. Dessa maneira, passa-se para a determinação dos corpos de prova que devem ser fabricados com esses materiais. Para isso, fora utilizada uma peça determinada pela própria fundição que é utilizada como corpo de prova para testes de acabamento e pintura realizadas na fábrica, tendo as dimensões e fotos ilustradas na Figura 17.

Figura 17 – Dimensões do corpo de prova padrão usado na fábrica.



Fonte: Autor, 2023.

O corpo de prova é fundido usando o mesmo material na fabricação das peças da linha de produção da fábrica, de tal forma que são somente feitos de acordo com a demanda de fundição das peças que utilizam as ligas de ferro fundido descritas nas Tabelas 1 e 2. Esse fato torna a produção dos corpos de prova dependente diretamente da linha de produção da empresa onde o experimento foi realizado, sendo um dos limitantes antes mencionado para esta pesquisa.

Para este trabalho fora definido que seriam utilizados dois tipos de corpo de prova para cada liga de ferro fundido, sendo um tipo bruto, ou seja, a peça é apenas fundida e passa pelo acabamento diretamente, e o segundo tipo é usinado, sendo uma parte do corpo de prova usinado após a fundição. A Figura 17 ilustra o primeiro tipo de corpo de prova, o bruto, e a Figura 18 ilustra o segundo tipo, o usinado.

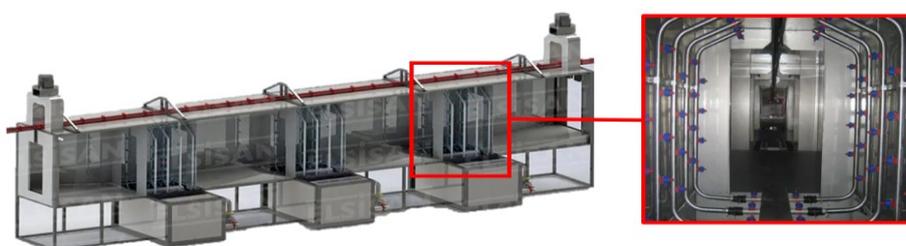
Figura 18 – Imagem ilustrativa do corpo de prova utilizado nos testes, evidenciando a área usinada



Fonte: Autor, 2023.

Os corpos de prova passam pelos processos de fundição e usinagem antes de serem levados para a limpeza e proteção superficial, preparando-os assim para o teste de sujidade. Para realizar a etapa de lavagem da peça, decidiu-se utilizar o sistema de linha de lavagem por aspersão, no qual uma peça é posicionada em um gancho e percorre um monotrilha passando por jatos de fluido. Uma imagem ilustrativa da lavadora empregada neste processo é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Ilustração de uma lavadora por aspersão



Fonte: Adaptado de Elsisan (2023).

A Figura 19 ilustra uma lavadora semelhante a utilizada para o teste, em que contém três etapas de limpeza. Neste tipo de equipamento, sprays de aspersão são posicionados por todas as paredes internas, de modo a liberar os fluídos de limpeza por toda a peça a ser lavada. Para realizar a limpeza efetiva da peça, são realizadas três etapas dentro da máquina, uma para cada câmara da lavadora, a peça é transportada através do trilho para cada uma das três câmaras. A primeira etapa utiliza um fluido desengraxante de limpeza para remover as sujeiras mais grosseiras provenientes dos processos de fundição e usinagem, além do manuseio até a lavadora.

A segunda etapa utiliza um fluído de limpeza mais específico, removendo partículas de sujeira mais finas que não saíram na primeira etapa. Juntas as duas etapas são de limpeza por desengraxe. Entretanto, algumas peças necessitam ainda de uma terceira etapa, a de proteção superficial, dessa forma, ainda dentro da máquina, a peça passa para a região de aspersão de óleo protetivo desaguante sobre sua superfície.

No final do processo, a peça sai limpa e com uma camada fina de óleo protetivo contra corrosão. Para o experimento descrito neste trabalho foram usados os dois primeiros processos de limpeza por desengraxante, não passando pela etapa de lavação por óleo protetivo desaguante, devido a determinação do teste de seguir as mesmas etapas das peças automotivas que usam as ligas de ferro fundido escolhidas.

3.2. MÉTODO DE EXTRAÇÃO E ANÁLISE *CLEANLINESS*

Depois de passar pelo processo de fabricação e limpeza, a peça é embalada utilizando plástico próprio para proteção corrosiva para peças de materiais metálicos. Para a análise de sujidade ser corretamente efetuada, deve-se retirar da linha de produção antes de ser enviada para o cliente final, pois assim pode ser avaliado como a peça chegaria ao seu destino. Assim, os corpos de prova são retirados da embalagem e levados em um carrinho próprio para o laboratório. Os corpos de prova dispostos no carrinho de transporte podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 – Imagem ilustrativa dos corpos de prova sendo transportados para o laboratório de análise *cleanliness*



Fonte: Autor, 2023.

Adotando os procedimentos de testes *cleanliness* estabelecido a partir das análises de sujidade já aplicadas pela fábrica, adota-se como método de extração o enxágue sob alta pressão. Esse método segue as técnicas e procedimentos normatizados pela VDA 19.1 e ISO 16232. Além disso, utiliza-se o método de análise por microscópio óptico com membrana para filtração de nitrato de celulose.

A escolha da membrana é devido a propriedade da celulose ser capaz de filtrar melhor as menores partículas extraídas das peças. Para este experimento a membrana de celulose possui uma porosidade de 1,2 micrometros e diâmetro de 47 mm. Uma ilustração da membrana utilizada é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Exemplos de membranas de filtração de celulose



Fonte: Aprolab, 2023.

As membranas de nitrato de celulose, como as ilustradas na Figura 21, segundo o laboratório fornecedor do material Enge Solutions, situado em São Paulo-SP, são o tipo mais utilizado em laboratórios e para filtração analítica, oferecendo propriedades umectantes excepcionais e taxas de fluxo mais lentos para soluções aquosas. Além disso, possuem custos menores em relação aos de membrana de malha.

Os procedimentos de análise estão descritos no capítulo 6 da norma VDA 19.1, “Método de extração”, sendo apresentados primeiramente a forma de preparação do teste, os cuidados e manuseios necessários de ferramentas antes do teste propriamente dito.

Os parâmetros iniciais utilizados são fornecidos pela norma e estão dispostos no Quadro 1. Essas características devem garantir a máxima eficiência de limpeza de contaminantes sobre a peça de ferro fundido dentro da câmara, evitando a formação

de aerossol, bem como indicar as características das ferramentas e volumes necessários para que o procedimento seja coerente.

Quadro 1 - Parâmetros do teste *cleanliness* para extração de partículas.

Parâmetro	Valor
Formato do Bico	Redondo de jato completo
Diâmetro do Bico	2.5 mm
Vazão Volumétrica	1.5 l/min
Distância do Componente	Máx. 15 cm
Volume de Lavagem sob Pressão / Área da Superfície do Componente	5 ml/cm ²

Fonte: VDA 19, 2015.

Como descrito nos procedimentos de teste pela norma, o valor de branco é feito ao ser realizado um enxágue no ambiente de teste, neste caso a câmara de extração, sem os corpos de prova, para validar o teste. Os resultados do valor de branco podem ser vistos na Tabela 4. Foram encontradas partículas na faixa de tamanho entre 5 a 200 μm , acima desse valor não fora detectado nenhum contaminante.

Tabela 4 – Características do teste em branco.

	Massa [mg]	Ocupação do Filtro [%]	Quantidade de Partículas Metálicas Encontradas (por faixa de tamanho) [μm]					
			5 a 15	15 a 25	25 a 50	50 a 100	100 a 150	150 a 200
Branco Corpos de prova	3,9	0,0346	772	283	169	48	9	2

Fonte: Autor, 2023.

Para compreender os valores da Tabela 4, como as maiores partículas encontradas estão na faixa de tamanho de 150 a 200 μm , a maior partícula permitida a ser encontrada nos testes com os corpos de prova, para que a análise *cleanliness* seja aprovada, deve ter dimensões de, no máximo, 2000 μm , uma vez que o tamanho de 200 μm corresponderia aos 10% limitados pela norma VDA 19:2015.

Após a validação do teste por meio dos valores encontrados no teste de branco, o primeiro corpo de prova é posicionado dentro da câmara de extração, onde o responsável pela execução do experimento enxágua a região a ser verificada. A quantidade de líquido é definida pela norma em 3000 litros. A Figura 22 demonstra o corpo de prova posicionado dentro da máquina de extração, sendo suspenso por um gancho.

Figura 22 – Corpo de prova disposto na câmara de extração.



Fonte: Autor, 2023.

Para a execução dos testes foi considerada que a sequência de testes com os corpos de prova seria feita em ordem aleatória, pois é dito que para a análise estatística em experimentos científicos, esse método pode reduzir a chance de ocorrência de tendências lineares, ou efeitos do tempo (OPRIME; PUREZA; OLIVEIRA, 2017).

O líquido utilizado é o BONDERITE C-NE 5088, que segundo o fabricante Henkel, é um limpador aquoso, sem solventes, neutro, projetado para aço, ferro

fundido e metais não ferrosos. Sendo composto por surfactantes, sais de ácidos orgânicos e hidrotrópicos. O produto pode ser aplicado em processos de pulverização e imersão, sendo ideal para limpeza e passivação simultâneas após usinagem. A Figura 23 mostra a execução do enxágue sobre a área usinada dos corpos de prova.

Figura 23 – Enxágue sob pressão sendo realizado na superfície usinada do corpo de prova



Fonte: Autor, 2023.

Após a extração do líquido do primeiro corpo de prova, a membrana de celulose contendo as partículas que foram extraídas é retirada da cabine e mantida em um dessecador, um recipiente de vidro fechado hermeticamente, com um agente dessecante de sílica, para controle da umidade.

Refazendo o procedimento para os corpos de prova restantes, as membranas remanescentes são armazenadas no mesmo local, visando diminuir e controlar a umidade. O monitoramento da umidade das membranas é importante para a análise de *cleanliness* pois interfere na aferição gravimétrica e na contagem de partículas pelo microscópio ao alterar o reflexo das partículas metálicas.

Após a etapa de secagem, as membranas seguem para a verificação da gravimetria propriamente dita. Tal procedimento é feito com cada membrana de celulose, que cuidadosamente são posicionadas sobre a superfície da balança digital, o resultado é anotado e a membrana é levada para o microscópio óptico. O processo de gravimetria é ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Posicionamento da membrana sobre a balança de precisão para análise gravimétrica.



Fonte: Autor, 2023.

No microscópio óptico, o procedimento consiste em posicionar cada membrana de celulose sequencialmente. O equipamento realiza a leitura da área ocupada por partículas, realizando automaticamente a leitura com base em seu material, classificando em metálico, não metálico ou fibroso. Para este estudo, dado que o foco é a quantificação de material metálico, tal qual a grafita, os outros tipos de materiais não serão considerados nos resultados analisados. Uma ilustração do equipamento usado pode ser vista na Figura 25.

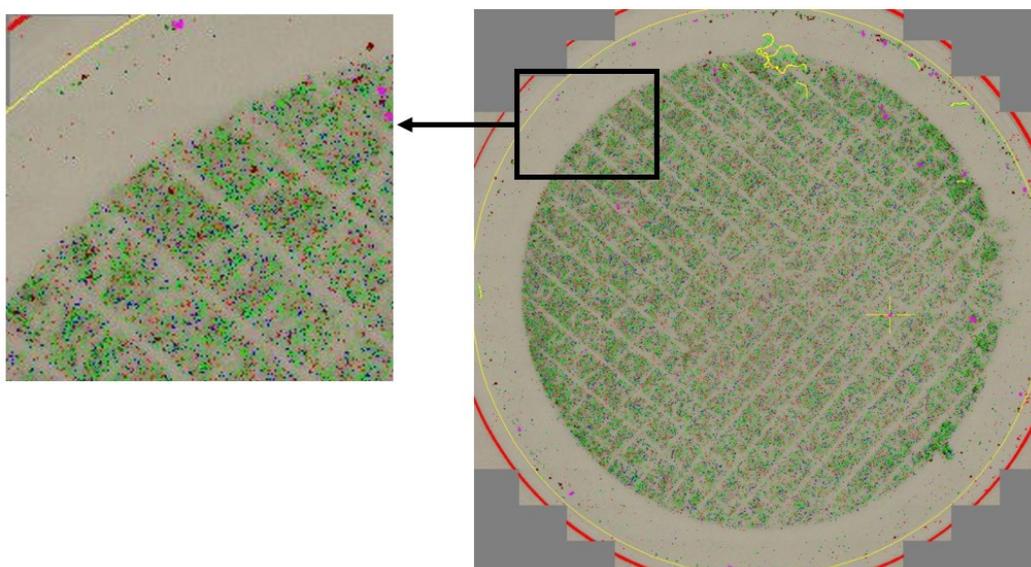
Figura 25 - Ilustração do microscópio óptico utilizado para analisar as membranas filtrantes



Fonte: Direct Industry, 2023.

O equipamento utilizado para o presente estudo é um modelo de microscópio óptico JOMESA HFD4 (*High Focal Depth*) possuindo um software desenvolvido pelo próprio fornecedor para contagem de partículas, capaz de contabilizar partículas metálicas, não metálicas e fibrosas. Foi utilizada uma escala de 4,6 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ para realizar a contagem das partículas pelo equipamento. Na Figura 26 é ilustrado uma imagem gerada pelo microscópio da membrana filtrante.

Figura 26 – Ilustração da análise realizada sobre a membrana filtrante pelo microscópio óptico

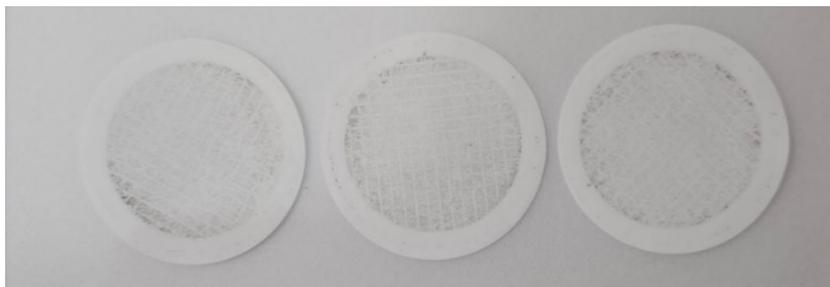


Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 26 é possível observar as cores geradas pelo equipamento ao realizar a análise óptica, os pontos coloridos apontam as partículas metálicas e não metálicas, identificadas pelo microscópio, já os traços amarelos indicam as fibras. A área efetiva de contagem é demarcada por uma circunferência amarela.

O microscópio óptico gera o relatório apontando a quantidade de partículas divididas em várias faixas de tamanho, bem como a área ocupada pelos particulados sobre a membrana de celulose. O resultado pode gerar um resultado inconclusivo quando a quantidade de partículas acumuladas em uma região da membrana está saturada. Exemplos do estado das membranas após análise podem ser vistos na Figura 27.

Figura 27 – Exemplos da ocupação de partículas sobre as membranas de celulose



Fonte: Autor, 2023.

Para cada corpo de prova foi utilizada uma membrana, dessa forma, como foram utilizados 30 corpos de prova, foram utilizadas ao todo 30 membranas, 10 para cada liga de ferro fundido nodular escolhido. Além disso, para cada liga de ferro fora também dividido pela metade cada quantidade, 5 para cada acabamento utilizado, bruto e usinado. O Quadro 2 mostra como foi feita a divisão de amostras para cada membrana.

Quadro 2 - Divisão da quantidade de membranas usadas no trabalho: (A) Membranas para LIGA 1, (B) Membranas para LIGA 2, (C) Membranas para LIGA 3

(A)			(B)			(C)		
LIGA	ACABAMENTO	Nº DA MEMBRANA	LIGA	ACABAMENTO	Nº DA MEMBRANA	LIGA	ACABAMENTO	Nº DA MEMBRANA
LIGA 1	BRUTO	1	LIGA 2	BRUTO	1	LIGA 3	BRUTO	1
		2			2			2
		3			3			3
		4			4			4
		5			5			5
	USINADO	1		USINADO	1		USINADO	1
		2			2			2
		3			3			3
		4			4			4
		5			5			5

Fonte: Autor, 2023.

A determinação de usar 30 corpos de prova, bem como a divisão ilustrada no Quadro 2 foi determinada em conjunto com a fábrica onde foi realizada o teste, devido a disponibilidade de confecção dos corpos de prova, bem como as operações de logística para incrementar na linha de produção o material. Fora também uma requisição da empresa de utilizar as duas formas de acabamento pois os resultados são benéficos para os projetos futuros de peças automotivas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

A análise seguiu os parâmetros e requisitos indicados na normativa VDA 19.1 e 19.2 de 2015, que orientou tanto o procedimento de extração de partículas por meio do enxágue sob pressão quanto o ambiente em que foi realizado o experimento. Dessa forma, neste capítulo são descritos os resultados obtidos pela quantificação das partículas encontradas nas membranas de celulose de cada um dos grupos das amostras utilizadas para o experimento.

4.1. ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA DE LIGA 1

A dimensão das partículas obtidas e a ocupação da membrana durante a análise de *cleanliness* realizada nos corpos de prova da LIGA 1, detalhada no Capítulo 3, para as amostras no estado bruto e usinado, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 - Resultados da análise de microscopia óptica com os corpos de prova de LIGA 1

LIGA 1		Massa [mg]	Ocupação do Filtro [%]	Maior Partícula Metálica Encontrada [µm]	
				Largura	Comprimento
Bruto	1	5,4	0,724961	224	150
	2	5,1	0,824302	323	115
	3	5,7	2,231135	455	227
	4	4,6	0,877467	372	195
	5	5,4	1,840258	665	475
	Média	5,2	1,30		
Usinado	1	5,3	1,061194	377	147
	2	6,1	1,174309	395	214
	3	5,1	1,071686	231	89
	4	4,5	0,850709	239	117
	5	5,6	1,003693	362	216
	Média	5,3	1,03		

Fonte: Autor (2023).

Observando-se a Tabela 6, pode-se verificar que a análise gravimétrica indica que na média das massas de ambas as situações dos corpos de prova, brutos e usinados, há uma diferença de 0,1 mg. Já a ocupação da membrana, que é a quantidade, em porcentagem, das partículas que são relevantes para a aprovação do teste, ou seja, aquelas entre a faixa de 5 a 1000 micrometros, é de 1,30% da

membrana, na média, para a situação de corpos brutos e 1,03%, na média, para usinados.

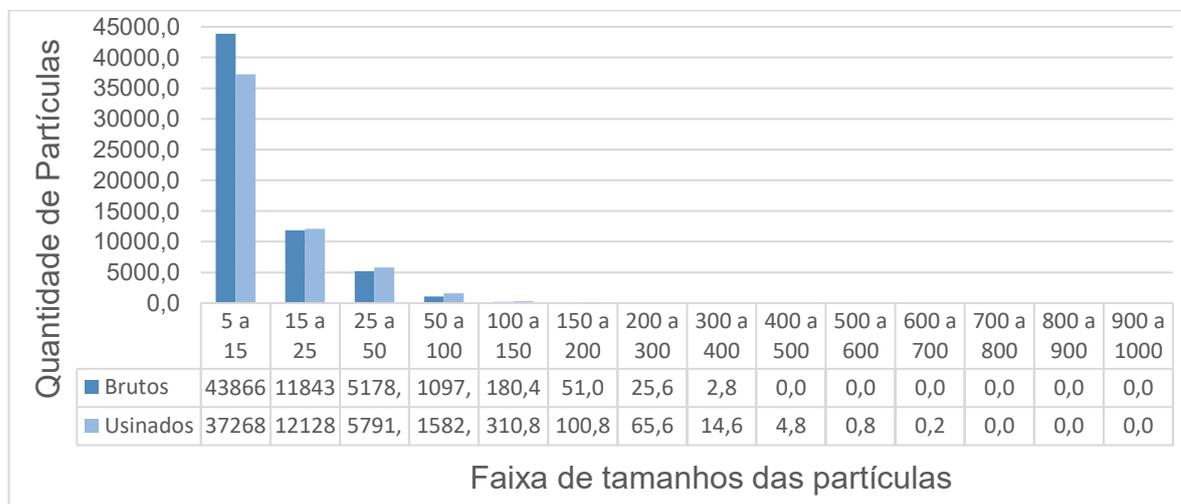
Tabela 6 - Quantidade de partículas encontradas na análise óptica das membranas com partículas metálicas dos corpos de prova de LIGA 1

LIGA 1		Quantidade de Partículas Metálicas Encontradas (por faixa de tamanho) [µm]														
		5 a 15	15 a 25	25 a 50	50 a 100	100 a 150	150 a 200	200 a 300	300 a 400	400 a 500	500 a 600	600 a 700	700 a 800	800 a 900	900 a 1000	TOTAL
Bruto	1	50543	13287	5382	1035	143	45	12	1	0	0	0	0	0	0	36113
	2	49633	13095	5783	1248	210	53	31	3	0	0	0	0	0	0	36576
	3	41508	12802	6029	1217	176	49	21	0	0	0	0	0	0	0	97485
	4	39434	9597	4243	967	137	29	13	3	0	0	0	0	0	0	38775
	5	38212	10436	4456	1020	236	79	51	7	0	0	0	0	0	0	77392
	Média	43866,0	11843,4	5178,6	1097,4	180,4	51,0	25,6	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57268,2
Usinado	1	23556	7753	3595	995	157	45	11	0	1	0	0	0	0	0	70448
	2	24170	7505	3486	1073	236	71	31	3	1	0	0	0	0	0	70056
	3	63408	20661	9920	2574	526	198	149	43	5	1	0	0	0	0	61802
	4	25334	8107	3840	1161	226	68	37	1	1	0	0	0	0	0	54423
	5	49873	16617	8114	2111	409	122	100	26	16	3	1	0	0	0	54497
	Média	37268,2	12128,6	5791,0	1582,8	310,8	100,8	65,6	14,6	4,8	0,8	0,2	0,0	0,0	0,0	62245,2

Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 7 lista as quantidades de partículas metálicas que são relevantes para o teste, separando por faixas de tamanhos, com as médias dos tamanhos tanto para os testes com corpos de prova brutos e usinados. A Figura 28 ilustra um gráfico onde de barras separando os valores quantificados de partículas da Tabela 7.

Figura 28 - Média da quantidade de partículas por faixa de tamanho para os resultados da análise óptica com corpos de prova de LIGA 1

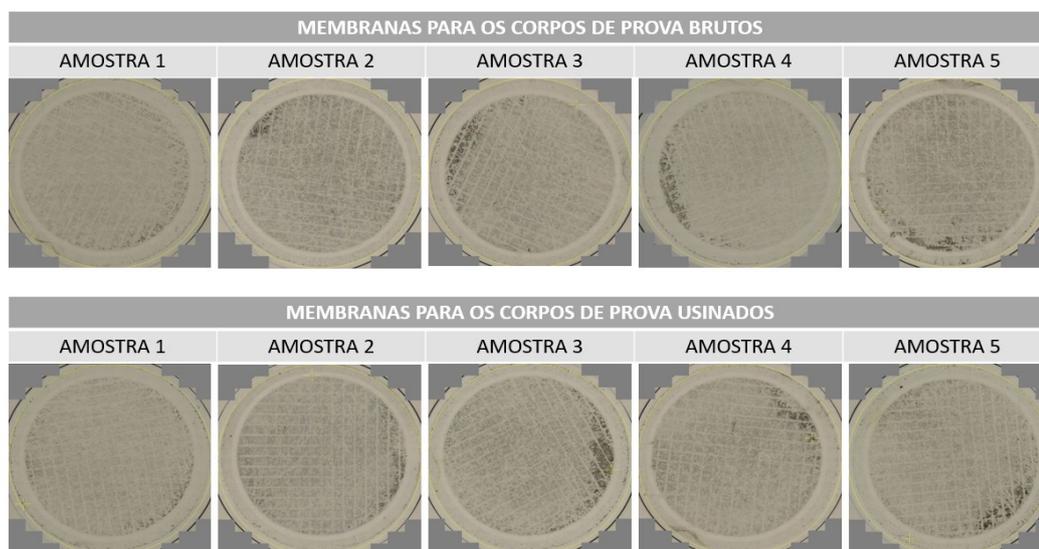


Fonte: Autor, 2023.

Pelo gráfico ilustrado na Figura 28, é possível perceber que a maior quantidade de partículas contabilizadas pelo microscópio está na faixa de tamanho de 5 a 15 μm tanto para o caso de corpos de prova brutos quanto usinados. Em contrapartida, partículas de tamanhos entre 700 e 1000 μm não foram identificadas para a LIGA 1.

Uma imagem das membranas após os testes pode ser observada na Figura 29. Nessa imagem, a primeira linha refere-se aos resultados da análise de *cleanliness* para os corpos de prova brutos e a segunda aos usinados.

Figura 29 - Resultado da análise óptica realizada nos corpos de prova de LIGA 1 brutos e usinados



Fonte: Autor (2023).

Ao se analisar as Tabelas 6 e 7 em comparação com as imagens das membranas da Figura 29, é possível perceber que a quantidade média total de partículas presentes nos corpos de prova bruto é menor do que nos corpos de prova usinados, com 57268,2 e 62245,2 respectivamente. Entretanto, na faixa a partir de 15 μm , a quantidade média de partículas no caso de corpos de prova usinados é menor do que o caso dos brutos. A partir da faixa de 15 μm , a situação inverte, com as maiores quantidade sendo dos corpos de prova usinados.

De maneira geral, é perceptível que tanto na média, quanto em todas as faixas de tamanho da contagem de partículas, as membranas dos corpos de prova brutos possuem uma quantidade menor do que os usinados. Embora para essa liga, a

quantidade maior, em média, para as partículas menores do que 15 μm , essa afirmação seja o contrário.

4.2. ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA DE LIGA 2

Assim como para os corpos de prova de LIGA 1, a análise de *cleanliness* realizada gerou os resultados listados na Tabela 8. Onde são mostrados as massas das membranas com partículas e ocupação desses elementos sobre a superfície de celulose, assim como as larguras e comprimentos das maiores partículas.

Tabela 7 - Resultados da análise de microscopia óptica com os corpos de prova de LIGA 2

LIGA 2		Massa [mg]	Ocupação do Filtro [%]	Maior Partícula Metálica Encontrada [μm]	
				Largura	Comprimento
Bruto	1	4,9	1,010	424	309
	2	5,5	1,858	1232	1052
	3	5,2	2,061	624	335
	4	5,2	2,102	731	247
	5	6,7	1,385	589	410
	Média	5,5	1,68		
Usinado	1	4,2	0,908	344	258
	2	4,2	0,816	369	134
	3	4,2	1,222	390	271
	4	3,8	0,781	381	217
	5	4,1	1,701	407	194
	Média	4,1	1,09		

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 8 é possível observar as larguras e comprimentos das maiores partículas encontradas pela análise óptica realizada nas membranas contendo as partículas dos corpos de prova de LIGA 2. Percebe-se que para a segunda membrana fora encontrada uma partícula de comprimento e largura maiores que 1 mm. Nesse caso, a norma VDA 19:2015 informa que a peça estaria reprovada devido a presença de uma partícula maior que 1000 μm . A Tabela 9 lista, dividindo por faixas de tamanho, as quantidades dos particulados metálicos identificados pelo microscópio.

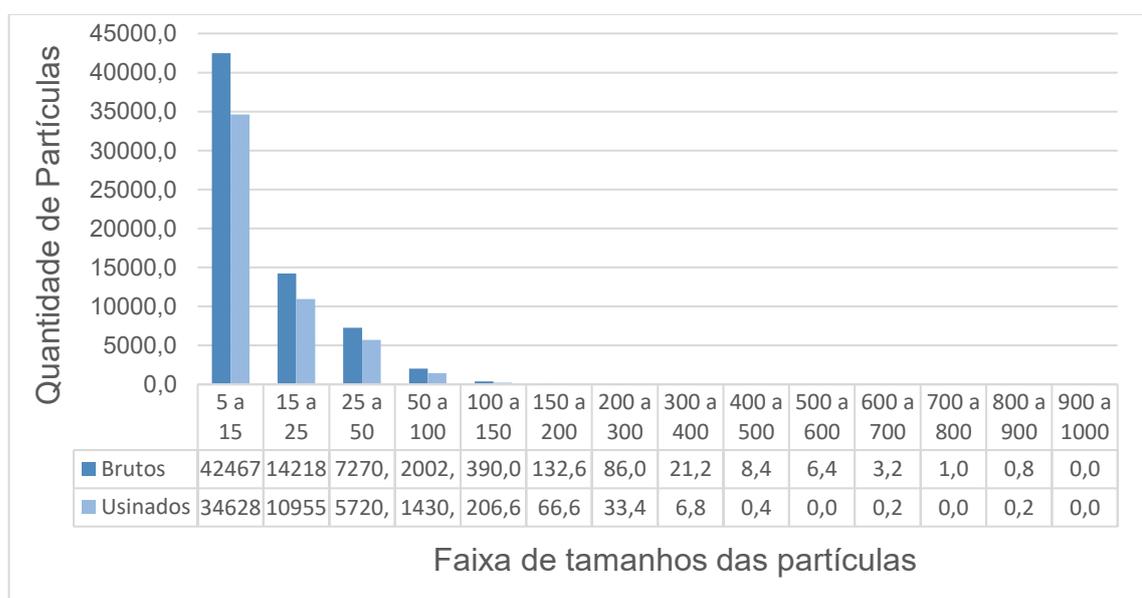
Tabela 8 - Quantidade de partículas encontradas na análise óptica das membranas com partículas metálicas dos corpos de prova de LIGA 2

LIGA 2		Quantidade de Partículas Metálicas Encontradas (por faixa de tamanho [µm])														TOTAL
		5 a 15	15 a 25	25 a 50	50 a 100	100 a 150	150 a 200	200 a 300	300 a 400	400 a 500	500 a 600	600 a 700	700 a 800	800 a 900	900 a 1000	
Bruto	1	28922	8969	4587	1335	237	85	57	6	2	0	0	0	0	0	44200
	2	45188	14194	7113	1820	381	139	87	33	18	13	4	4	3	0	68997
	3	57719	19861	10153	2851	531	173	90	14	3	1	1	0	0	0	91397
	4	47008	16301	8705	2323	420	131	102	31	18	17	11	1	1	0	75069
	5	33498	11769	5795	1682	381	135	94	22	1	1	0	0	0	0	53378
	Média	42467,0	14218,8	7270,6	2002,2	390,0	132,6	86,0	21,2	8,4	6,4	3,2	1,0	0,8	0,0	66608,2
Usinado	1	28239	9205	4229	1100	180	73	40	7	0	0	0	0	0	0	43073
	2	28810	8126	3967	907	132	35	21	11	1	0	0	0	0	0	42010
	3	37204	12200	6580	1530	248	90	47	8	0	0	0	0	1	0	57908
	4	21246	6918	3804	1113	181	52	41	4	0	0	1	0	0	0	33360
	5	57644	18328	10023	2500	292	83	18	4	1	0	0	0	0	0	88893
	Média	34628,6	10955,4	5720,6	1430,0	206,6	66,6	33,4	6,8	0,4	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	53048,8

Fonte: Autor, 2023.

Assim como identificado para os resultados obtidos pelo microscópio óptico quanto a quantidade de partículas para a LIGA 1, na Tabela 9 é possível perceber um comportamento semelhante para a LIGA 2, em que as maiores quantidades de contaminantes está na faixa de 5 a 15 µm. Esse resultado pode ser visualizado também no gráfico da Figura 30.

Figura 30 – Média da quantidade de partículas por faixa de tamanho para os resultados da análise óptica com corpos de prova de LIGA 2



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 31 são apresentadas imagens das membranas de celulose contendo as partículas desprendidas durante o processo de extração ao filtrar o líquido de teste dos corpos de prova brutos e usinados de ferro fundido do tipo LIGA 2.

Figura 31 - Resultado da análise óptica realizada nos corpos de prova de LIGA 2 brutos e usinados



Fonte: Autor, 2023.

Analisando as Tabelas 8 e 9, nota-se que as massas das membranas contendo partículas dos corpos de prova brutos são maiores, em média 5,5 mg, do que dos corpos de prova usinados, 4,1 mg. Além disso, a ocupação da superfície das membranas de celulose para os testes com corpos de prova bruto é maior, com 1,68% na média, enquanto para os usinados é de 1,09%.

Ao analisar a Tabela 9, de maneira análoga ao visto para a LIGA 2, os corpos de prova usinados apresentaram maior quantidade de partículas em média, do que o caso de corpos de prova brutos. com uma média de 66.608,02 partículas para o material no estado bruto e 53.048,8 para os corpos de prova usinados.

4.3. ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA PARA LIGA 3

Os resultados dos testes para a última liga testada, LIGA 3, estão dispostos nas Tabelas 10 e 11. A análise de *cleanliness* seguiu os mesmos padrões utilizados para a LIGA 1 e LIGA 2, ou seja, seguindo o mesmo padrão de operação para testes estabelecidos pela VDA 19.1.

Tabela 9 - Quantidade de partículas encontradas na análise óptica das membranas com partículas metálicas dos corpos de prova de LIGA 3

LIGA 3		massa [mg]	Ocupação do Filtro [%]	Maior Partícula Metálica Encontrada [µm]	
				Largura	Comprimento
Bruto	1	4,6	1,181	388	211,0
	2	5,1	1,916	549	328,0
	3	4,9	1,346	531	265,0
	4	4,7	1,942	512	336,0
	5	5,7	1,870	861	571,0
	Média	5,0	1,65		
Usinado	1	4	0,811	214	96,0
	2	4,1	1,408	428	264,0
	3	3,9	0,678	273	201,0
	4	4,5	1,303	439	264,0
	5	4	0,956	270	136,0
	Média	4,1	1,03		

Fonte: Autor, 2023.

De maneira igual às ligas 1 e 2, foram gerados os resultados das quantidades das partículas de acordo com a faixa de tamanho para cada corpo de prova de LIGA 3 analisado. O resultado pode ser observado na Tabela 11.

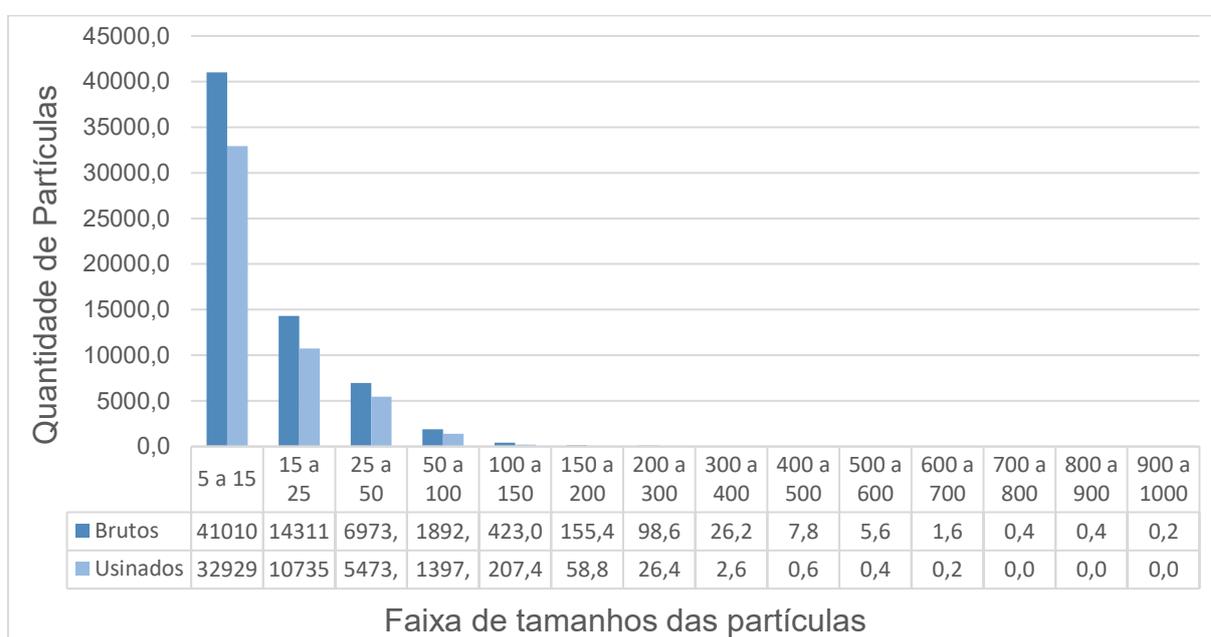
Tabela 10 - Quantidades de partículas encontradas nos testes com os corpos de prova de LIGA 3.

LIGA 3		Quantidade de Partículas Metálicas Encontradas (por faixa de tamanho) [µm]														TOTAL
		5 a 15	15 a 25	25 a 50	50 a 100	100 a 150	150 a 200	200 a 300	300 a 400	400 a 500	500 a 600	600 a 700	700 a 800	800 a 900	900 a 1000	
Bruto	1	30755	9664	5373	1808	337	107	60	11	1	0	0	0	0	0	48116
	2	55179	19588	9534	2102	442	139	71	27	3	6	0	0	0	0	87091
	3	32394	11520	5097	1450	350	152	105	26	8	5	0	0	1	0	51108
	4	44569	16249	7771	2223	553	221	144	31	16	5	2	0	0	0	71784
	5	42153	14536	7093	1881	433	158	113	36	11	12	6	2	1	1	66436
	Média	41010,0	14311,4	6973,6	1892,8	423,0	155,4	98,6	26,2	7,8	5,6	1,6	0,4	0,4	0,2	64907,0
Usinado	1	30808	9158	4208	1002	131	36	6	1	0	0	0	0	0	0	45350
	2	38737	15488	7865	1865	295	103	62	8	2	1	0	0	0	0	64426
	3	22187	6673	3507	966	123	18	10	0	0	0	1	0	0	0	33485
	4	34317	11344	6697	2080	374	104	44	4	1	0	0	0	0	0	54965
	5	38598	11013	5088	1072	114	33	10	0	0	1	0	0	0	0	55929
	Média	32929,4	10735,2	5473,0	1397,0	207,4	58,8	26,4	2,6	0,6	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	50831,0

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados ilustrados na Tabela 11 mostram que a LIGA 3 segue a mesma tendência apresentada para as Ligas 1 e 2, onde as maiores quantidades de partículas estão concentradas na faixa de 5 a 15 μm . Além disso, é perceptível que as quantidades de partículas liberadas ao se analisar os corpos de prova brutos, são maiores que para os usinados. A Figura 32 ilustra essas informações através de um gráfico de barras.

Figura 32 – Média da quantidade de partículas por faixa de tamanho para os resultados da análise óptica com corpos de prova de LIGA 3

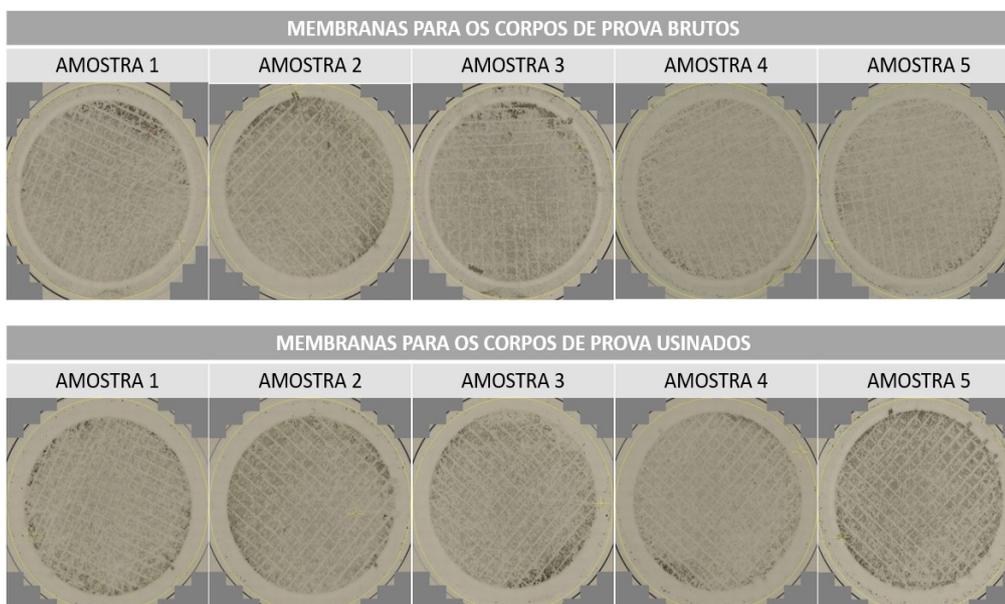


Fonte: Autor, 2023

Pela Figura 32 é possível perceber as diferenças das quantidades entre partículas liberadas ao se analisar os corpos de prova brutos dos usinados, com o primeiro caso tendo um valor maior. É notório também que as maiores quantidades de particulados estão na faixa de menor tamanho.

As fotos de cada membrana após a análise de *cleanliness* para os corpos de prova de LIGA 3, tanto brutos quanto usinados são apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Resultado da análise óptica realizada nos corpos de prova de LIGA 3 brutos e usinados



Fonte: Autor, 2023.

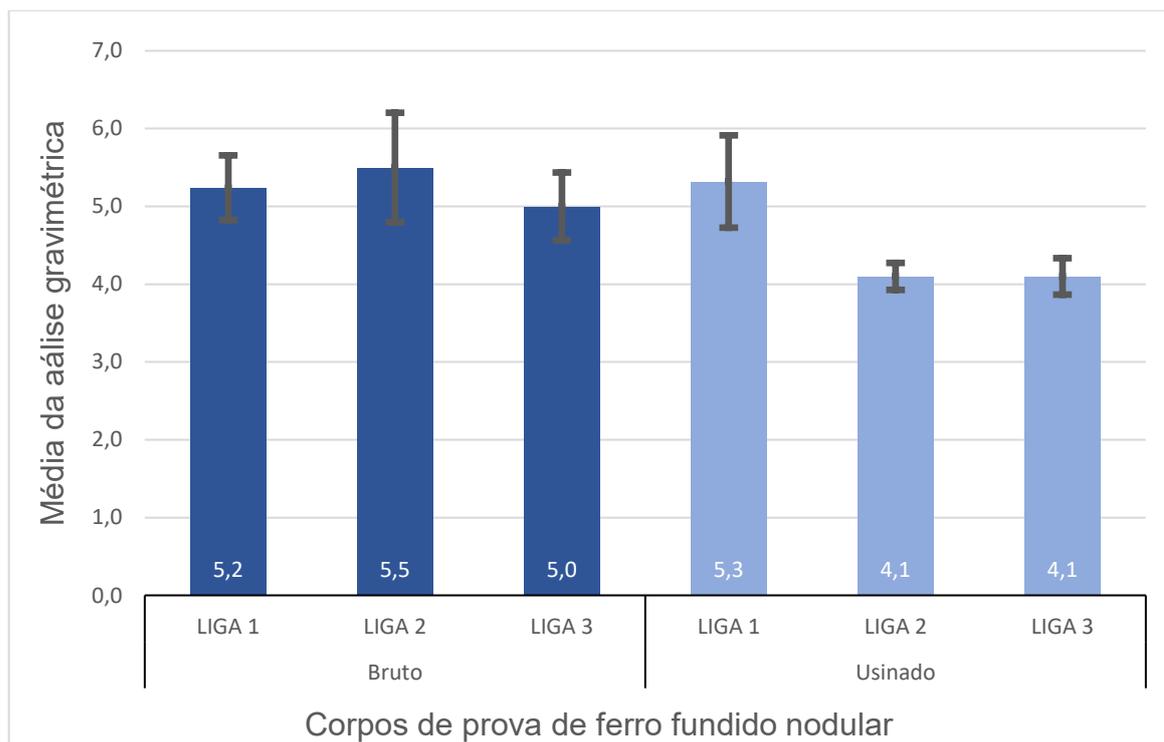
Avaliando-se as tabelas referentes aos resultados da análise para os corpos de prova de liga de ferro fundido intitulados nesse trabalho como LIGA 3, percebe-se que o padrão percebido da LIGA 2 e LIGA 1 das massas encontrados na análise gravimétrica para as membranas, se repete para essa liga. Dessa forma, o valor da massa média das membranas com partículas dos corpos de prova bruto são 5,0 mg, e para o caso dos corpos de prova usinados é 4,1 mg. Quanto à ocupação da membrana, observa-se que os valores são maiores para os resultados referentes aos corpos de prova brutos registrando 1,65% na média, e 1,03% para o caso de corpos de prova usinados.

Considerando a diferença entre o material bruto e usinado, somando os resultados das quantias de contaminantes de todas as ligas entre cada caso, a quantidade total de partículas é maior para os corpos de prova brutos em relação aos usinados. Com uma média de 64.907 partículas contadas para o primeiro caso, e uma média de 50.831 partículas totais para o segundo caso.

4.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS LIGAS DE FERRO FUNDIDO.

A partir dos dados gerados pela análise de *cleanliness*, pode-se comparar então as ligas de ferro fundido em alguns parâmetros. Pela gravimetria gerada, pode-se comparar as massas das membranas. Dessa forma, é possível gerar um gráfico comparando essas massas, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Média dos resultados da análise gravimétrica [mg] para as ligas de ferro fundido nodulares testadas

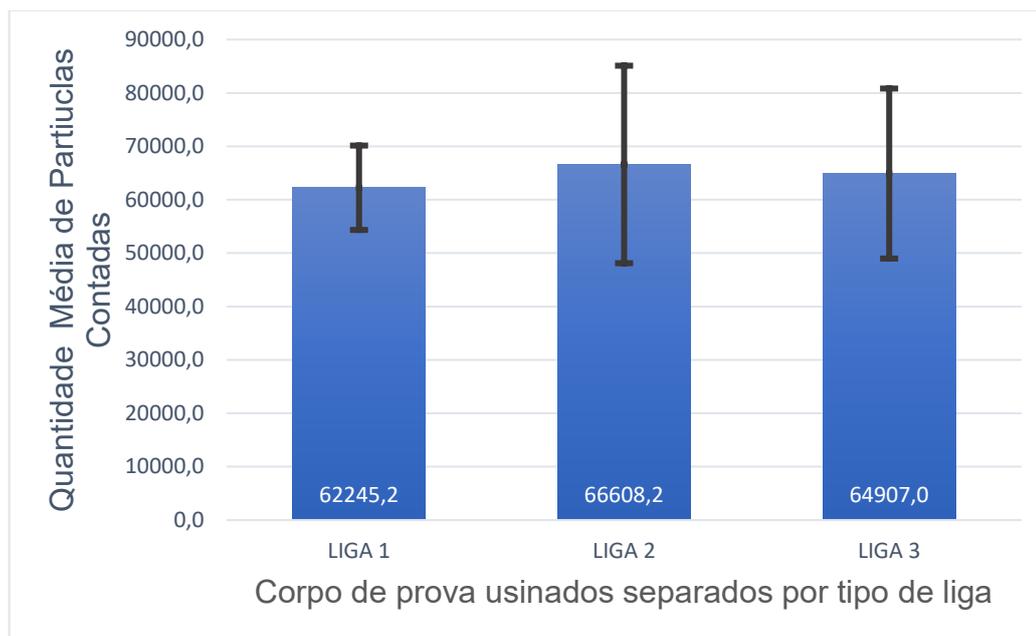


Fonte: Autor, 2023.

A Figura 34 apresenta as médias de gravimetria das quantidades para cada liga de ferro fundido para os corpos de prova brutos e usinados. Nota-se, considerando os valores das médias e das linhas de desvio padrão, que para a LIGA 1 os valores são próximos, registrando 5,2 mg para corpos brutos e 5,3 mg para corpos usinados, os desvios padrões mostram 0,41 e 0,59 respectivamente. Para os resultados referentes a LIGA 2, observa-se uma variação mais significativa, de 5,5 mg para o caso bruto e 4,1 mg para usinados, com desvios padrões de 0,70 e 0,17 respectivamente. a LIGA 3 também registra uma diminuição, passando de 5,0 mg em média, para o caso de corpos de prova brutos para 4,1 mg para usinados, enquanto o desvio padrão para o primeiro caso é de 0,43 e para o segundo de 0,23.

Assim como a gravimetria, outro dado de comparação que pode ser usado é a quantidade de partículas liberadas em cada tipo de corpo de prova. Primeiramente, analisando as quantidades de partículas resultantes do teste com os corpos de prova brutos, gera-se o gráfico da Figura 35.

Figura 35 - Quantidade média de partículas em cada liga para os corpos de prova brutos



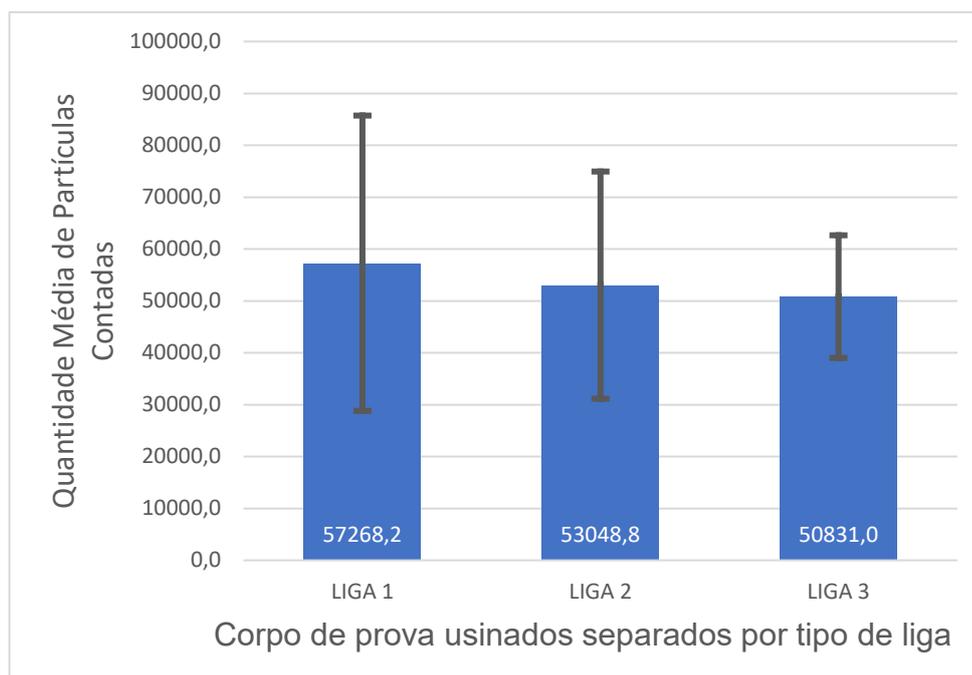
Fonte: Autor, 2023.

Analisando o gráfico da Figura 35, nota-se que a LIGA 2 exibe a maior média total, totalizando 66.608,2, porém apresenta um desvio padrão de 18.499,6; em seguida, pela ordem de maior quantidade, a LIGA 3 apresenta 64.907,0 partículas encontradas em média, com um desvio padrão de 15.922,6; já para a LIGA 1 o valor médio da quantidade de partículas é de 62.245,2 com um desvio padrão de 7.901,1. Essas médias totais representam a soma cumulativa das partículas em todas as faixas de tamanho para cada liga analisada.

Percebe-se pelo gráfico da Figura 31 que embora a LIGA 2 tenha a maior quantidade de partículas, a dispersão indicada pelo desvio padrão é maior, já a LIGA 1, com a menor quantidade, possui a menor dispersão.

Na Figura 36 pode-se observar os valores da média total das quantidades de partículas medidas para os corpos de prova usinados.

Figura 36 – Quantidades de partículas para cada liga de ferro fundido testada

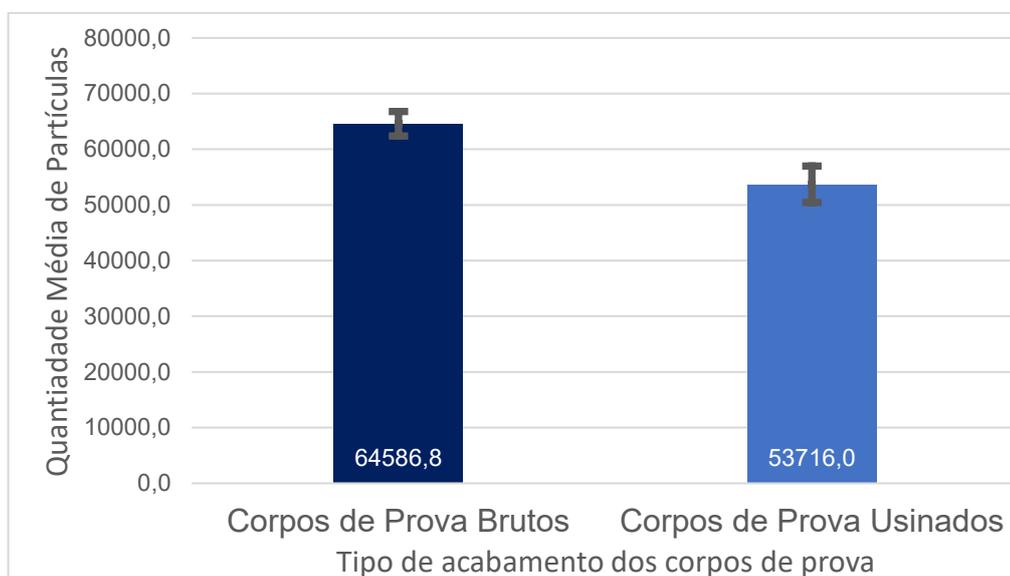


Fonte: Autor, 2023.

Pela Figura 36 é possível perceber que embora a LIGA 1 apresente a maior quantidade média de partículas, com 57.268,2, possui também a maior dispersão, seu desvio padrão é de 28.460,8. Para a LIGA 2, essa quantidade média é de 53.048,8, com um desvio padrão de 21.894,3 e para a LIGA 3 esses valores são de 50.831,0 para a quantidade média de partículas encontradas e 11819,8 para o desvio padrão.

Uma outra comparação que é possível realizar com os dados gerados, é entre as quantidades médias totais entre os corpos de prova usinados em relação aos brutos, exibido na Figura 37. Como esperado, devido as análises do trabalho mostrarem que as quantidades de partículas para os corpos de prova brutos são maiores, com as leituras dos gráficos das figuras 35 e 36, a quantia média total de partículas metálicas dos corpos de prova brutos é menor em relação aos usinados.

Figura 37 – Gráfico comparativo entre as quantidades médias totais de partículas entre corpos de prova brutos e usinados



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 37, o gráfico ilustra a média da quantidade total de partículas metálicas, sendo que nos corpos de prova brutos, esse valor é na ordem de 64.586,8 com um desvio padrão de 2.199,05, contrastando com o valor correspondente de 53.716,0 para os corpos de prova usinados, com um desvio padrão de 3.270,05. Essa representação visual enfatiza a diferença significativa na quantidade média de partículas entre as duas condições de amostragem.

5. CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas pelos testes de *cleanliness*, utilizando como base as regras de operação e ambiente estabelecidos pela norma VDA 19, e comparando as características entre as ligas e o tipo de usinagem, pode-se obter algumas conclusões e resultados.

Primeiramente, quanto aos testes realizados pela gravimetria, observa-se uma tendência geral em todas as ligas, de os corpos de prova brutos exibirem valores de massas médias de membranas superiores em comparação com os usinados. Isso é evidente nas Ligas 1, 2 e 3, indicando que o processo de usinagem influencia a quantidade de material particulado retido na membrana de celulose.

A análise com relação à ocupação da membrana também segue uma tendência consistente, com as partículas metálicas provenientes dos corpos de prova brutos ocupando uma porcentagem maior da superfície da membrana em comparação com as partículas dos usinados. Isso sugere que as partículas relevantes para o teste, na faixa de 5 a 1000 micrômetros, tendem a ser mais abundantes nos corpos de prova brutos.

A média das quantidades de partículas metálicas, entre as cinco membranas nos corpos de prova brutos, revela que a LIGA 2 apresenta aproximadamente 2,85% a mais em comparação com as Ligas 3, já em comparação com a LIGA 1 essa média é 6,55% maior. Esse resultado sugere que, sem a etapa de usinagem, peças fabricadas com a LIGA 2 tendem a liberar uma maior quantidade de grafita durante o processo de inspeção *cleanliness*, em comparação com as Ligas 1 e 3.

Já nos corpos de prova usinados, a ordem das médias das quantidades é alterada. A LIGA 1 exibe a maior média, superando a LIGA 2 em 7,37% e a LIGA 3 em 11,24%. Com base nesse teste, antecipa-se que peças usinadas com a liga de ferro fundido 1 liberem uma quantidade superior de partículas durante o teste de *cleanliness* em comparação com as outras ligas.

Ao somar as médias das três ligas, notamos que os corpos de prova não usinados liberaram uma quantidade superior de partículas metálicas em relação aos usinados, com uma diferença média de 16,83%. É relevante observar que as maiores quantidades de partículas estão concentradas na faixa de 5 a 15 μm , conforme esperado devido à liberação de grafita, devido as propriedades de formação do material.

Com base nos resultados apresentados, é possível inferir que as discrepâncias nas médias das quantidades totais entre as ligas não evidenciam uma diferença substancial. A variação máxima de 6,55% entre a quantidade mais elevada e a mais baixa de partículas liberadas nos corpos brutos indica uma relativa uniformidade. No entanto, ao analisar os materiais usinados, observa-se uma diferença mais expressiva, atingindo um máximo de 11,24%.

Este último valor pode ser considerado significativo no contexto da seleção da liga para o projeto de uma peça que será submetida ao processo de limpeza técnica ou inspeção de *cleanliness*. Nesse cenário, a atenção aos parâmetros do processo de produção da peça e características da análise que será realizada tornam-se cruciais, uma vez que a elevada liberação de partículas de metal aumenta a probabilidade de saturação de elementos filtrantes, como os de celulose.

Formas de contornar esse problema de saturação são descritos tanto na norma VDA 19 quanto na ISO 16232, como por exemplo, o uso de filtragem em cascata, usando mais de uma membrana filtrante, posicionando uma sobre a outra, ou utilizar um líquido intermediário, usando-o para espalhar as partículas dispostas sobre a superfície da celulose, facilitando a leitura do microscópio.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, torna-se evidente que o emprego de peças de ferro fundido nodular no estado bruto tende a resultar na liberação de uma quantidade superior de partículas em comparação com o mesmo material quando usinado. Esse resultado apresenta benefícios significativos no contexto do design de componentes automotivos, pois a informação se torna crucial ao fabricar um item utilizando as ligas estudadas, especialmente quando as especificações exigem inspeção *cleanliness*. Isso facilita a previsibilidade na abordagem do problema da saturação das membranas filtrantes, simplificando a análise microscópica e por consequência, na avaliação da sujidade da peça.

O objetivo principal deste trabalho foi analisar comparativamente, por meio de inspeção por *cleanliness* e do acúmulo de partículas metálicas dispostas na membrana de celulose, qual das ligas testadas teria a maior probabilidade de liberação de grafita que interferissem no resultado do teste. Como visto, a LIGA 1 para peças que não são usinados possui a maior quantidade de partículas liberadas, enquanto a LIGA 3 quando usinada possui a menor quantidade.

Para este estudo foram desconsideradas algumas propriedades que podem interferir diretamente na quantidade de partículas liberadas, como por exemplo, a

massa da peça analisada. Dessa forma, seguem algumas sugestões que podem ser consideradas para um futuro trabalho que envolvam as operações aqui descritas:

1. Realizar o procedimento considerando a diferença de massa das peças testadas, uma vez que ao elevar a massa, espera-se um aumento da quantidade de partículas metálicas liberadas, desta forma será possível avaliar a influência dessa propriedade na saturação das membranas.
2. Alterar o método de extração de partículas, utilizando uma combinação de procedimentos. Dessa forma, pode entender o comportamento das partículas ao serem expostas a outras formas de extração. Como por exemplo, analisar se o uso de ultrassom em determinadas faixas de vibração pode gerar uma quantidade maior de partículas para as mesmas peças utilizadas neste trabalho.
3. Utilizar outros métodos de análise, como espectroscopia de raios X por dispersão em energia, para caracterizar com maior precisão as partículas encontradas sobre o elemento filtrante, e com isso modificar as características da liga, dessa forma, prever a quantidade liberada de partículas em determinadas peças.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Oswaldo Luis; VILELLA, Ronaldo Castro; BUTTON, Sérgio Tonini. **PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E PLANEJAMENTO DE PROCESSOS**. Campinas: Unicamp, 2004. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7834395/mod_resource/content/2/apostila_Fundamentos_Fabricacao_agostinho.pdf. Acesso em: 29 nov. 2023.

APROLAB. **MEMBRANA DE FIBRA DE VIDRO 1,2 UM (GF/C) PCTE C/ 100 UNID**. Disponível em: <http://www.aprolab.com.br/filtracao/membrana-de-filtracao/gf-c>. Acesso em: 20 out. 2023.

CESTARI, Enrico. **ANALISI DELLA CONTAMINAZIONE INDUSTRIALE**. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Tecnica e Gestione Dei Sistemi Industriali, Università Degli Studi di Padova, Padova, 2017. Disponível em: https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/23468/1/Cestari_Enrico_1104576.pdf. Acesso em: 16 set. 2023.

CHARRE, Madeleine Durand. **Microstructure of steels and cast irons**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York 2004.

DEROSE, James; BARBERO, David R.; SCHEFFLER, Kay. **Cleanliness of Automotive Components and Parts**: importance of the iso 16232 standard and vda 19 guidelines for manufacturing processes in the automotive industry. 2022. Elaborada por Leica. Disponível em: <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/applied/cleanliness-of-automotive-components-and-parts/>. Acesso em: 21 out. 2023.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8580**: Manufacturing processes - Terms and definitions, division. Berlin: Din, 2022. 25 p.

DIAS, João Pedro Lourenço. **CARACTERIZAÇÃO, ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS NO PROCESSO PRODUTIVO DE UMA ANTENA AUTOMÓVEL**. 2021. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/20098>. Acesso em: 11 nov. 2023.

DURAKOVIC, Benjamin. **Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art**. 5. ed. Sarajevo: Periodicals Of Engineering And Natural Sciences, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323705387_Design_of_experiments_application_concepts_examples_State_of_the_art. Acesso em: 30 jul. 2023.

DZETZIT, Alexandra; NAGIT, Gheorghe. Research on importance of *cleanliness* in manufacturing reliable products for automotive. In: INNOVATIVE MANUFACTURING ENGINEERING & ENERGY INTERNATIONAL CONFERENCE – IMANE&E 2017, 21., 2017, Online. **Article**. [S.L.]: Matec Web Conf., 2017. v. 112, p. 1-6. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/26/mateconf_imane2017_09017/mateconf_imane2017_09017.html. Acesso em: 14 out. 2023.

ELSISAN. **Linha de lavagem por aspersão**. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/elsisan/product-216153-2284263.html>. Acesso em: 09 set. 2023.

FONTES, Tânia. **GESTÃO INTEGRADA EM OPERAÇÕES DE LIMPEZA INDUSTRIAL DE PEÇAS METÁLICAS**. 2001. 11 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2001. Disponível em: <https://bdigital.ufp.pt/handle/10284/8307>. Acesso em: 30 nov. 2023.

HOLZAPFEL, Y.; KRECK, G. **Technical cleanliness: Determining particulate cleanliness in fields ranging from the automotive industry to medical device technology**. 2014. Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA. Disponível em: <https://www.reinraum.de/news.html?id=2364>. Acesso em: 09 set. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16232**: Road vehicles - *Cleanliness* of components and systems. 1 ed. Vernier: Iso, 2018. 178 p.

MATOS, Stelvia Vigolvino. Alternativas de minimização de resíduos da indústria de fundição. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 19, n. 19, p. 1742-1753, dez. 1997.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Marshall: John Wiley & Sons, 2012. 730 p.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. Processos de fabricação. Fundação, Florianópolis, jan./01. 2007.

OLIVEIRA, Ivanir Luiz. **FUNDIÇÃO**. Curitiba: PPGEM, 2020. Color.

OPRIME, Pedro Carlos; PUREZA, Vitória Maria Miranda; OLIVEIRA, Samuel Conceição de. Sequenciamento sistemático de experimentos fatoriais como alternativa à ordem aleatória. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 24, n. 1, p. 108-122, fev. 2017. Disponível em: <https://www.gestaoeproducao.com/article/doi/10.1590/0104-530X1266-16>. Acesso em: 15 set. 2023

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO. **A COVID-19 e a indústria automóvel**. Lisboa: OIT, 2020. 6 p. Disponível em: https://www.ilo.org/lisbon/publicações/WCMS_754378/lang--pt/index.htm. Acesso em: 08 mai. 2023.

ORŁOWICZ, A.W.; MRÓZ, M.; TUPAJ, M.; TRYTEK, A.. Materials Used in the Automotive Industry. **Archives Of Foundry Engineering**. Rzeszów, p. 75-78. 23 fev. 2015.

PISCANI, Francesco. **The Increasing Importance of Technical *Cleanliness***. 2017. Publicada por Evident. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/insight/increasing-importance-technical-cleanliness/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

RIOSULENSE. **Entenda o que é o downsizing dos motores**. 2021. Disponível em: <https://rio.expert/blog/gestao/entenda-o-que-e-o-downsizing-dos-motores/>. Acesso em: 08 maio 2023.

SANTOS, Adalberto Bierrenbach de Souza. EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULARES. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 55., 2000, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Congresso Anual da Abm, 2000. p. 1-21. Disponível em: <https://old.foundrygate.com/upload/artigos/Efeitos%20da%20Composi%C3%A7%C3%A3o%20qu%C3%ADmica%20na%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20Ferro%20Fundido%20Nodulares.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SCHULZ, Doris. **VDA 19 and its Impact on European Manufacturing and Cleaning**. 2013. Disponível em: <https://www.pfonline.com/articles/vda-19-and-its-impact-on-european-manufacturing-and-cleaning>. Acesso em: 08 mai. 2023.

TÂMEGA, Fábio. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Educacional S.A., 2017. 204 p. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Arquivos%20FTP%202020/Bibliografia/LIVRO_processo_de_fundicao.pdf. Acesso em: 14 out. 2023.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípio de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Edgar Blücher, 2000.

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE. **VDA 19: Quality Management In The Automotive Industry: Inspection of Technical *Cleanliness***. 2 ed. Berlim: Qmc, 2015. 297 p.