IPCA INSTITUTO POLITÉCNICO DO CÁVADO E DO AVE

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLO ESTATÍSTICO NOS REQUISITOS DE LIMPEZA TÉCNICA DE COMPONENTES PARA O SETOR AUTOMÓVEL NUMA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO INJETADA

Arícia Gomes Barthon da Motta

Orientador

António Miguel de Sousa Rocha

Coorientador

Bruno Xavier Martins de Sousa

Dissertação apresentada
ao Instituto Politécnico do Cávado e do Ave
para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

maio, 2026

IPCA INSTITUTO POLITÉCNICO DO CÁVADO E DO AVE

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLO ESTATÍSTICO NOS REQUISITOS DE LIMPEZA TÉCNICA DE COMPONENTES PARA O SETOR AUTOMÓVEL NUMA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO INJETADA

Arícia Gomes Barthon da Motta

Orientador

António Miguel de Sousa Rocha

Coorientador

Bruno Xavier Martins de Sousa

Dissertação apresentada
ao Instituto Politécnico do Cávado e do Ave
para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

maio, 2026

DECLARAÇÃO

Nome: Arícia Gomes Barthon da Motta

Endereço eletrónico: a27428@alunos.ipca.pt

Título da Dissertação: Implementação de controlo estatístico nos requisitos de limpeza técnica de componentes para o setor automóvel numa indústria de fundição injetada

Subtítulo da Dissertação:

Orientador: António Miguel de Sousa Rocha

Coorientador: Bruno Xavier Martins de Sousa

Ano de conclusão: 2026

Designação do Curso de Mestrado: Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial

Nos exemplares das Dissertações /Projetos/ Relatórios de Estágio de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de Provas Públicas, e dos quais é obrigatoriamente enviado exemplares para depósito legal, deve constar uma das seguintes declarações:

☒ É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

☐ É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO/TRABALHO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

☐ DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA DISSERTAÇÃO/TRABALHO

Instituto Politécnico do Cávado e do Ave,13/05/2026

Assinatura: 

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLO ESTATÍSTICO NOS REQUISITOS DE LIMPEZA TÉCNICA DE COMPONENTES PARA O SETOR AUTOMÓVEL NUMA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO INJETADA

RESUMO

O setor automóvel desempenha um papel fundamental na economia e na criação de emprego; contudo, encontra-se a atravessar uma fase de transformação intensa e acelerada. A transição para a mobilidade elétrica e para a condução autónoma exige componentes mais complexos e sensíveis, com requisitos mais rigorosos, como a limpeza técnica. O cumprimento destes requisitos constitui um desafio, especialmente para pequenas e médias empresas, exigindo métodos eficazes de controlo e monitorização. Este estudo propõe a implementação do controlo estatístico do processo (SPC) aplicado aos requisitos de limpeza técnica de componentes para o setor automóvel, com o objetivo de reforçar a monitorização dos processos, apoiar a tomada de decisão baseada em dados e contribuir para a compreensão do comportamento das partículas em ambiente industrial. Foram aplicadas ferramentas estatísticas, incluindo estatística descritiva, testes de hipóteses, análise baseada em regressão e cartas de controlo, para avaliar o comportamento do processo e identificar padrões de variabilidade e contaminação. A utilização de sistemas de gestão de dados baseados em registos em papel limitou o alcance e a robustez do conjunto de dados. Ainda assim, o estudo demonstra a viabilidade e a relevância de técnicas de SPC aos requisitos de limpeza técnica, mesmo em ambientes com recursos limitados. Os resultados fornecem conhecimentos tecnicamente fundamentados sobre o comportamento das partículas na produção industrial, evidenciando variabilidade intrínseca e suscetibilidade a eventos pontuais de elevada contagem de partículas. Foram observadas melhorias estatisticamente significativas em classes granulométricas específicas, incluindo reduções da variabilidade do processo e do valor médio de partículas após ações de melhoria direcionadas.

Palavras-chave: Limpeza técnica; Indústria automóvel; Controlo estatístico do processo

IMPLEMENTING STATISTICAL CONTROL FOR TECHNICAL CLEANLINESS IN DIE-CAST AUTOMOTIVE COMPONENTS

ABSTRACT

The automotive sector plays a crucial role in the economy and job creation; however, it is undergoing a phase of intense and rapid transformation. The transition towards electric mobility and autonomous driving demands more complex and sensitive components, leading to stricter requirements, such as technical cleanliness. Meeting these requirements is challenging, especially for small and medium-sized enterprises. In this context, companies must establish effective methods to control and monitor processes, ensuring compliance with technical cleanliness standards. This study proposes the implementation of statistical process control (SPC) in technical cleanliness requirements for automotive components, aiming to enhance process monitoring, support data-driven decision-making, and contribute to the understanding and control of particle behaviour in an industrial environment. To achieve this, a critical component was analysed. Statistical tools, including descriptive statistics, hypothesis testing, regression-based analysis and control charts were applied to evaluate process behaviour and identify patterns of variability and contamination. In addition, microscopic analysis was conducted to provide a detailed characterization of particles and to support root cause analysis. The use of paper-based data management by the company restricted the scope and robustness of the available dataset, highlighting practical limitations commonly faced in industrial contexts. Nevertheless, the study demonstrates the feasibility and value of applying SPC techniques to technical cleanliness requirements even in resource-limited environments. The results provide grounded insights into the behaviour of technical cleanliness requirements within industrial production, highlighting their inherent variability and susceptibility to high particle-count events. Statistically significant improvements were observed for specific particle size classes, including reductions in process variability and mean particle levels, as evidenced by control chart analysis after targeted improvement actions.

Keywords: Technical cleanliness, Automotive industry, Statistical process control

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio, incentivo e contributo de várias pessoas e instituições, às quais deixo o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que me orientou, fortaleceu e sustentou ao longo de todo este percurso académico, especialmente nos momentos mais desafiantes.

À minha mãe, Indiara Dias, expresso um agradecimento profundo por me ter orientado desde cedo para a importância dos estudos. A sua exigência, constante ao longo da minha formação, revelou-se fundamental e é hoje reconhecida com gratidão pelo impacto que teve no meu percurso académico e pessoal. Ao meu padrasto, David Felipe, agradeço o apoio e a disponibilidade ao longo do meu percurso académico, bem como o suporte prestado em momentos importantes.

Ao meu marido, Fábio Freitas, deixo um agradecimento muito especial pelo apoio incondicional, incentivo contínuo e compreensão demonstrada ao longo deste trabalho e da nossa vida. A sua paciência perante as longas horas dedicadas ao estudo e à escrita, bem como as renúncias feitas para que este objetivo pudesse ser alcançado, foram determinantes. Obrigada pelas palavras de encorajamento e por saber que posso sempre contar consigo.

Agradeço à empresa onde este estudo foi desenvolvido, pela disponibilização dos dados, pela abertura à introdução do tema em reuniões internas e pela flexibilidade concedida para formações e divulgação do tema, criando condições essenciais para a realização deste trabalho.

Ao orientador na empresa, Bruno Xavier, agradeço por ter aceitado este desafio, por todo o suporte, compreensão nos momentos difíceis e pelo acompanhamento prestado. Ao orientador académico do IPCA, António Rocha, agradeço pelas reuniões de orientação, pelos conselhos e pelo contributo crítico, fundamentais para a tomada de diversas decisões no âmbito desta dissertação.

Ao IPCA, agradeço por todo o conhecimento transmitido e pelas experiências proporcionadas ao longo do curso. Estendo este agradecimento a todos os docentes do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, cujos ensinamentos permitiram uma compreensão mais madura e integrada da gestão e da engenharia industrial.

Agradeço à minha colega de trabalho Ritiele Medina por todo o apoio prestado, pelas inúmeras análises realizadas para esta dissertação, sempre com elevado rigor e profissionalismo, bem como pelas trocas de ideias, discussões técnicas e apoio constante, dentro e fora deste projeto.

Por fim, agradeço a todos os que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo o meu sincero agradecimento.

Não to mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o SENHOR, teu Deus, é contigo por onde quer que andares.

Josué 1:9

ÍNDICE

RESUMO I
ABSTRACT II
AGRADECIMENTOS III
DEDICATÓRIA IV
ÍNDICE V
ÍNDICE DE FIGURAS VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS X
ÍNDICE DE TABELAS XI
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO DA LITERATURA 2
2.1 NORMAS E PADRÕES EM LIMPEZA TÉCNICA 2
2.2 MODELAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DE SISTEMAS DINÂMICOS 3
2.3 AUTOMAÇÃO E COMPONENTES DE ALTA TENSÃO 4
2.4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 4
2.5 MONTAGEM, EMBALAGEM E LOGÍSTICA 5
2.6 ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM 5
2.7 FABRICO ADITIVO 6
2.8 REFABRICO E SUSTENTABILIDADE 6
2.9 MÉTODOS DE LIMPEZA 7
2.10 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 8
3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO 10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 13
4.1 AUDITORIA DE LIMPEZA TÉCNICA 13
4.2 COMPREENSÃO DO NEGÓCIO 16
4.3 COMPREENSÃO DOS DADOS 16
4.4 PREPARAÇÃO DOS DADOS 18
4.5 DESENVOLVIMENTO ESTATÍSTICO 18
4.5.1 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS 18
4.5.2 ESTATÍSTICAS INFERENCIAIS 21
4.5.2.1 Massa 21
4.5.2.2 Total (Metálico e não metálico) 23
4.5.2.2.1 Maiores ou iguais a 150µm e menores do que 200µm 25
4.5.2.2.2 Maiores ou iguais a 200µm e menores do que 400µm 26
4.5.2.2.3 Maiores ou iguais a 400µm e menores do que 600µm 28
4.5.2.2.4 Maiores ou iguais a 600µm 29
4.5.2.2.5 Interpretação dos Fatores Significativos e Relações com o Processo Produtivo 30
4.5.2.3 Partículas consideradas metálicas 44
4.5.2.3.1 Maiores ou iguais a 150µm e menores do que 200µm 46
4.5.2.3.2 Maiores ou iguais a 200µm e menores do que 400µm 47
4.5.2.3.3 Maiores ou iguais a 400µm e menores do que 600µm 49

4.5.2.3.4 Maiores ou iguais a 600µm 51

4.5.2.3.5 Interpretação dos Fatores Significativos e Relações com o Processo Produtivo 52

4.6 CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA DAS PARTÍCULAS FORA DE ESPECIFICAÇÃO COMO SUPORTE À ANÁLISE DE CAUSA RAIZ 58

4.7 AÇÕES DE MELHORIA 66

4.8 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS 69

4.9 CARTAS DE CONTROLO ANTES E DEPOIS 71

4.9.1 MASSA 71

4.9.2 TOTAL (METÁLICO E NÃO METÁLICO) 72

4.9.3 PARTÍCULAS CONSIDERADAS METÁLICAS 76

5. CONCLUSÕES 81

ANEXOS 84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Análise bibliométrica gerada pelo programa VOSviewer para o termo “technical cleanliness” e sua relação com outros termos em publicações científicas. 8
Figura 2 - Resultado global da auditoria de limpeza técnica 14
Figura 3 - Resultado por área da auditoria de limpeza técnica 15
Figura 4 - Diagnósticos dos resíduos para a variável "Massa" 23
Figura 5 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm 25
Figura 6 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 200 µm e menores do que 400 µm 27
Figura 7 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 400 µm e menores do que 600 µm 28
Figura 8 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 600 µm 29
Figura 9 - Mapa de calor dos valores de qui-quadrado (teste de Wald) por faixa granulométrica para partículas metálicas e não metálicas 30
Figura 10 - Contagem média de partículas metálicas e não metálicas por cavidade e classe granulométrica face aos critérios de aceitação 31
Figura 11 - Diagrama de causa e efeito das fontes de variabilidade na contagem de partículas metálicas e não metálicas entre cavidades 32
Figura 12 - Tendência não linear da contagem de partículas metálicas e não metálicas ao longo do ciclo de produção 33
Figura 13 - Diagrama de causa e efeito da variação não linear da contagem de partículas ao longo dos ciclos do molde 33
Figura 14 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da inspeção e classe granulométrica 34
Figura 15 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da inspeção e classe granulométrica após ajuste de representatividade amostral 34
Figura 16 - Comparações múltiplas entre dias da semana pelo teste de Tukey 35
Figura 17 - Diagrama de causa e efeito dos picos de contagem de partículas metálicas e não metálicas em dias específicos da semana 36
Figura 18 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da lavagem e classe granulométrica 36
Figura 19 - Diagrama de causa e efeito da flutuação de contagem de partículas metálicas e não metálicas em dias específicos de lavagem na semana 37
Figura 20 - Diagrama de causa e efeito das causas potenciais de partículas metálicas associadas a defeitos visuais 39

Figura 21 - Efeito do Intervalo entre a lavagem e a inspeção na contagem de partículas metálicas e não metálicas 39
Figura 22 - Diagrama de causa e efeito das causas potenciais de partículas metálicas associadas a defeitos visuais 40
Figura 23 - Efeito da MFI na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas 40
Figura 24 - Diagrama de causa e efeito das causas potenciais relacionadas à elevada incidência de partículas metálicas e não metálicas nas amostras produzidas na MFI 32 41
Figura 25 - Efeito da MFI na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas 42
Figura 26 - Efeito conjunto entre MFI, operador de inspeção e tempo entre lavagem e inspeção na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas 43
Figura 27 - Efeito do operador de injeção na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas (operadores com ≥ 5 amostras) 44
Figura 28 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm 46
Figura 29 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm (Modelo reduzido) 46
Figura 30 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 200 µm e menores do que 400 µm 48
Figura 31- Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 200 µm e menores do que 400 µm (Modelo reduzido) 48
Figura 32 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 400 µm e menores do que 600 µm 50
Figura 33- Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 600 µm 51
Figura 34 - Mapa de calor dos valores de qui-quadrado (teste de Wald) por faixa granulométrica para partículas metálicas 52
Figura 35 - Contagem média de partículas metálicas por cavidade e classe granulométrica face aos critérios de aceitação 53
Figura 36 - Tendência não linear da contagem de partículas metálicas ao longo do ciclo de produção 54
Figura 37 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da lavagem e classe granulométrica 55
Figura 38 - Efeito conjunto entre MFI e operador de injeção na contagem de partículas metálicas por classe de partículas 57
Figura 39 - Imagens de duas faces de uma partícula metálica de alumínio com dimensão superior ao limite especificado (> 600 µm) 58

Figura 40 - Partículas metálicas porosas 59
Figura 41 - Comparação entre a morfologia da partícula metálica porosa com a morfologia da superfície do componente na área das bolsas de ar 60
Figura 42 – Evidências no componente de cisalhamento com a embalagem 60
Figura 43 - Partículas não metálicas provenientes da embalagem 61
Figura 44 - Partículas não metálicas azuis 61
Figura 45 - Fonte de partículas azuis 61
Figura 46 - Partícula azul não metálica aderida a um mau enchimento na peça 62
Figura 47 - Partícula de madeira 62
Figura 48 – Filtro com supersaturação de fibras (a) e aglomeração de partículas e fibras (b) 63
Figura 49 - Fibras azuis 63
Figura 50 - Partículas metálicas com elevada probabilidade de serem provenientes de atividades de retrabalho 64
Figura 51 - Partículas metálicas com morfologia característica de limalhas provenientes do processo de maquinação. 64
Figura 52 – Diferenças entre rebarbas provenientes do processo de maquinação e aquelas originadas de operações de retrabalho manual 65
Figura 53 - Material de sensibilização e formação em limpeza técnica (Páginas 1-3) 66
Figura 54 - Material de sensibilização e formação em limpeza técnica (Páginas 4-6) 67
Figura 55 - Carta de controlo I–AM da massa de partículas antes e após a implementação das ações de melhoria 71
Figura 56 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica de 150–200 µm, antes e após as ações de melhoria 72
Figura 57 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica de 200–400 µm, antes e após as ações de melhoria 73
Figura 58 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica de 400–600 µm, antes e após as ações de melhoria 74
Figura 59 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica maior ou igual a 600 µm, antes e após as ações de melhoria 75
Figura 60 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica de 150–200 µm, antes e após as ações de melhoria 76
Figura 61 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica de 200–400 µm, antes e após as ações de melhoria 77
Figura 62 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica de 400–600 µm, antes e após as ações de melhoria 78
Figura 63 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica maior ou igual a 600 µm, antes e após as ações de melhoria 79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção científica em limpeza técnica no setor automóvel: evolução na última década e projeção para a próxima 9
Gráfico 2 - Resultado gráfico por área da auditoria de limpeza técnica 14
Gráfico 3 - Probabilidade normal da variável “Massa” 21
Gráfico 4 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável "Massa" 22
Gráfico 5 - Probabilidade normal para as classes granulométricas de partículas metálicas e não metálicas 24
Gráfico 6 – Análise do impacto do estado da peça na contaminação por partículas metálicas e não metálicas 38
Gráfico 7 - Probabilidade normal para as classes granulométricas de partículas metálicas e não metálicas 45
Gráfico 8 – Análise do impacto do estado da peça na contaminação por partículas metálicas 56
Gráfico 9 - Relação entre o *lead time* e a quantidade de partículas metálicas 56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de Quantidade de Partículas por Classe e Faixa Granulométrica do Componente em Estudo 10
Tabela 2 - Lista de variáveis com descrição e tipologia 16
Tabela 3 - Estatística descritiva do banco de dados antes da implementação de melhorias e da remoção do molde 2. 19
Tabela 4 - Posição estatística dos requisitos de limpeza técnica face à distribuição histórica das partículas 20
Tabela 5 - Resultados da análise de variância da variável "Massa" transformada 22
Tabela 6 - Comparação de ajuste de modelos de contagem para partículas totais via critério AIC 25
Tabela 7 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 150 micrómetros e menores do que 200 micrómetros 26
Tabela 8 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 200 micrómetros e menores do que 400 micrómetros 27
Tabela 9 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 400 micrómetros e menores do que 600 micrómetros 29
Tabela 10 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 600 micrómetros 30
Tabela 11 - Comparação de ajuste de modelos de contagem para partículas metálicas via critério AIC 45
Tabela 12 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 150 micrómetros e menores do que 200 micrómetros 47
Tabela 13 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 200 micrómetros e menores do que 400 micrómetros 49
Tabela 14 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 400 micrómetros e menores do que 600 micrómetros 50
Tabela 15 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 600 micrómetros 52
Tabela 16 - Estatística descritiva do banco de dados após implementação de melhorias 70

1. INTRODUÇÃO

A indústria automóvel tem vindo a enfrentar uma transformação significativa, impulsionada, em grande parte, pela transição para a mobilidade elétrica. Esta transição tem conduzido ao desenvolvimento de componentes mais complexos e sensíveis, o que, por sua vez, implica a definição de requisitos de qualidade cada vez mais rigorosos. Neste contexto, a limpeza técnica assume um papel crítico, uma vez que a presença de partículas contaminantes pode comprometer o desempenho, a durabilidade e a segurança dos componentes, especialmente em sistemas de elevada sensibilidade (Hermanns, 2019; Jordão & Fernandes, 2022; Lutz, 2018; Moita, 2023; Pečman & Luptak, 2021).

Apesar da crescente importância deste requisito, muitas empresas, particularmente no setor da fundição injetada, enfrentam dificuldades na monitorização e controlo eficaz da limpeza técnica. Estas dificuldades estão frequentemente associadas à ausência de ferramentas estatísticas adequadas e à falta de análise sistemática dos dados recolhidos, o que limita a capacidade de identificar causas de variabilidade e implementar melhorias sustentadas.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surge da necessidade de reforçar o controlo e a compreensão dos requisitos de limpeza técnica numa empresa do setor automóvel, contribuindo para a melhoria da qualidade dos processos produtivos e para a tomada de decisão baseada em dados.

Assim, o principal objetivo desta dissertação consiste na implementação de controlo estatístico do processo (SPC) aplicado aos requisitos de limpeza técnica de componentes produzidos numa indústria de fundição injetada. Como objetivos específicos, destacam-se: a análise do estado atual do processo, a identificação de fontes de variabilidade, a aplicação de ferramentas estatísticas para monitorização do processo, a implementação de ações de melhoria com base em análise de causa e a determinação da eficácia das melhorias implementadas.

Em termos metodológicos, foi adotada uma abordagem de investigação-ação, suportada pela metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar). O estudo baseou-se na recolha e análise de dados experimentais ao longo do tempo, incluindo a aplicação de estatística descritiva e inferencial, modelação estatística e utilização de cartas de controlo, complementadas por análise microscópica de partículas fora de especificação.

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução, onde se enquadra o tema, a motivação, os objetivos e a abordagem metodológica. O Capítulo 2 corresponde à revisão crítica da literatura, onde são analisados os principais conceitos, tecnologias, tendências e lacunas associadas à limpeza técnica na indústria automóvel. O Capítulo 3 descreve a metodologia de investigação adotada, incluindo os procedimentos de recolha e análise de dados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a sua discussão, com base na aplicação das ferramentas estatísticas e na análise do processo. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir, são analisados trabalhos relevantes na área da limpeza técnica, com o objetivo de identificar as principais contribuições, tendências e lacunas presentes na literatura. Esta análise, articulada com a análise bibliométrica, permite uma compreensão mais abrangente do estado da arte e reforça a relevância do tema desenvolvido nesta dissertação.

2.1 NORMAS E PADRÕES EM LIMPEZA TÉCNICA

A limpeza técnica ganhou destaque nos anos 1990, após partículas muito pequenas terem provocado falhas em sistemas automóveis, levando ao desenvolvimento de normas como a *Verband der Automobilindustrie* 19 (VDA 19), em 2004, norma alemã para inspeção de contaminações em processos de fabrico, e a *International Organization for Standardization* 16232 (ISO 16232), em 2007, com enfoque internacional. A segunda parte da VDA 19 foi publicada em 2010 e abordou a limpeza na área de montagem de componentes. Com o avanço da mobilidade elétrica, a diretriz *Zentralverband Elektrotechnik-und Elektronikindustrie* (ZVEI), desde 2013, passou a orientar práticas específicas para componentes eletrónicos, como circuitos e conectores, reforçando a importância crescente da limpeza técnica no setor automóvel (*ISO 16232*, 2018; *ZVEI*, 2019; *VDA 19.1*, 2015).

Especificações de limpeza tradicionalmente impõem limites rigorosos para partículas metálicas, considerando o risco de curto-circuitos elétricos, muitas vezes exagerando nos requisitos, tornando-os tecnicamente e comercialmente inviáveis. Os requisitos para células de bateria são ainda mais exigentes, já que partículas condutoras acima de 30 µm podem danificar separadores e causar fuga térmica, embora ainda faltem métodos padrão confiáveis para prevenir a contaminação (Brag & Rochowicz, 2021; ZVEI, 2019).

Os autores (Faber et al., 2021) apresentaram o estado atual do conhecimento sobre a análise de limpeza técnica de componentes. Também são discutidos importantes aspetos de garantia de qualidade e controlo de qualidade na avaliação da limpeza técnica.

Os autores relatam que existem diferentes especificações entre os diferentes OEM e que por vezes estas especificações e as definições de partículas são distintas da linguagem utilizada nas normas VDA e ISO. Além disso, também a divisão das partículas e os requisitos relativos aos seus tamanhos permitidos são diferentes e fornecem exemplos de diferentes requisitos e definições.

Ainda neste tópico, os autores (Brag & Rochowicz, 2021), referem que os engenheiros de projeto estabelecem requisitos de limpeza para os componentes, com o objetivo de evitar falhas causadas por partículas contaminantes. Contudo, a quantidade de contaminação que um componente pode suportar antes de falhar ainda é amplamente desconhecida. Como resultado, os requisitos de limpeza são estabelecidos de forma mais rigorosa do que provavelmente necessário, provocando um grande esforço da cadeia de fornecimento para alcançar o nível de limpeza exigido, enquanto soluções alternativas no *design* do produto não são implementadas.

2.2 MODELAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DE SISTEMAS DINÂMICOS

Neste artigo, os autores (Shaik & Rodrigues, 2018) apresentam uma estratégia de pesquisa experimental que combina modelação computacional avançada com análise de sistemas dinâmicos para estudar como decisões específicas de otimização de *layout* e limpeza técnica podem beneficiar um sistema de fabrico de peças automóveis, especialmente em termos de qualidade do produto e crescimento financeiro.

Os resultados esperados incluem variações nos níveis de qualidade, ocupação do espaço, conhecimento dos trabalhadores, impactos financeiros, níveis de inventário e limpeza técnica da empresa.

As questões de pesquisa abordadas neste artigo são as seguintes: A otimização do *layout* da fábrica tem um efeito no crescimento financeiro da empresa? A otimização do *layout* da fábrica cria espaço para novos projetos e máquinas na empresa? Existe algum efeito na qualidade do produto devido à implementação da limpeza técnica? A qualidade do produto afeta os níveis de inventário? A formação dos funcionários em limpeza técnica tem um efeito nos níveis de limpeza técnica da fábrica? O Lucro Operacional da empresa é afetado pela implementação da otimização do *layout* da fábrica e pela limpeza técnica?

O estudo propõe um modelo de otimização do *layout* da fábrica com a implementação da limpeza técnica, utilizando uma abordagem de modelação dinâmica de sistemas. Para isso, foram definidos seis submodelos, cada um abordando diferentes fatores que influenciam o desempenho da empresa: modelo de inventário/produção, modelo de qualidade, modelo de otimização do *layout*, modelo de limpeza técnica, modelo financeiro e modelo de comportamento humano.

A modelação matemática do sistema utiliza equações diferenciais para representar as interações entre variáveis e a evolução do sistema ao longo do tempo. Os modelos são simulados sob diferentes condições iniciais, permitindo a análise dos impactos de mudanças estruturais, como alterações no *layout* ou novas práticas de limpeza técnica.

Os autores estabeleceram 4 políticas para influenciar tanto o espaço fabril quanto os níveis de limpeza da fábrica. Estas políticas são os cenários testados na simulação e foram formuladas com base na viabilidade e nos padrões técnicos da segunda parte da norma VDA 19 para limpeza técnica. Um modelo foi desenvolvido para analisar como cada política afeta os níveis de produtividade, qualidade e aspetos financeiros da empresa.

Os valores das políticas foram aplicados aos valores numéricos do *layout* atual da planta. Foram gerados quatro conjuntos diferentes de valores para as diferentes políticas, os quais foram utilizados como entrada para o modelo de dinâmica de sistemas. O modelo foi então simulado com esses quatro conjuntos de dados por um período de 8,000 dias, equivalente a 22 anos. Este período longo de simulação reflete a natureza de longo prazo do projeto de alcançar as classes de limpeza conforme os padrões da segunda parte da VDA 19, que requerem melhoria contínua.

Os autores concluíram que o aumento do nível de limpeza também resultou numa melhoria na qualidade do produto, resultando em menos produtos defeituosos e menos atrasos. Estes dados indicam que uma combinação de 30% de otimização do *layout* da planta e implementação de limpeza técnica mantendo a classe de limpeza 7, resulta em melhorias na qualidade do produto, reduzindo reclamações e aumentando a satisfação

dos clientes. Além disso, prevê-se um crescimento financeiro significativo, aproximando-se dos 48 mil milhões de euros até o final do vigésimo segundo ano.

2.3 AUTOMAÇÃO E COMPONENTES DE ALTA TENSÃO

Embora os autores (Olbrich & Lackinger, 2022) se concentrem em analisar o estado da arte, os desafios atuais e os campos de atuação para alcançar um maior nível de automação no processo de fabrico de chicotes elétricos de alta tensão automóveis, os autores também destacam as exigências rigorosas em relação aos critérios de limpeza técnica, sendo um fator que afeta diretamente a segurança e a funcionalidade dos componentes de alta tensão. Para garantir a conformidade com esse critério, a automação dos processos de fabrico é necessária, pois facilita a repetibilidade, a reprodutibilidade e a rastreabilidade dos dados

As perguntas de investigação neste trabalho foram as seguintes: Onde e por que o fabrico de chicotes de alta tensão é complexa? Como a indústria e a ciência estão abordando essas complexidades por meio de soluções de automação e métodos já desenvolvidos? Quais são os desafios e obstáculos para uma maior automação, conforme destacado pelos resultados de pesquisas selecionadas? Quais são as lacunas de pesquisa que necessitam de uma investigação aprofundada para aumentar o nível de automação de forma sustentável na indústria?

Os autores (Schleicher & Damak, 2022) com uma estratégia de pesquisa de levantamento, abordam a importância da limpeza técnica na cadeia de abastecimento de componentes automóveis de alta tensão e defendem que a prevenção da contaminação é crucial em todas as etapas da produção e montagem, seguindo normas como VDA 19, ISO 16232 e diretrizes ZVEI. Além disso, os autores enfatizam que os requisitos estabelecidos pelos fabricantes de equipamentos originais (OEM) devem ser rigorosamente seguidos ao longo de toda a cadeia de abastecimento. Os autores realizaram um levantamento e revisão da literatura sobre o tema da limpeza técnica e relacionaram este tema com problemas causados por partículas contaminantes em componentes de alta tensão, além de explorarem as lacunas que existem no suporte ao design dos componentes de alta tensão com vista à prevenção, desde o projeto do componente, de curtos-circuitos por contaminação por partículas.

Os autores, além de buscarem compreender a visão de limpeza das OEM em aplicações automóveis e módulos de alta potência, também procuram responder aos seguintes questionamentos: Qual é o impacto da aplicação da limpeza técnica nos padrões utilizados pelas OEM e como isto corresponde à mudança presente e futura dos requisitos reivindicados pelas OEM? Este também tem impacto na confiabilidade ou durabilidade dos componentes?

2.4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Neste estudo, os autores (Zwinkau et al., 2020) propuseram um método de classificação utilizando redes neurais treinadas com um conjunto de dados de 70,000 imagens identificadas. Este método alcançou uma precisão de 97,7% na classificação binária de partículas metálicas e não metálicas, com desempenho comparável à microscopia de luz polarizada de última geração, conforme os padrões VDA 19 e ISO 16232.

O trabalho dos autores se enquadra melhor na estratégia de pesquisa de experimentação, que se concentra na realização de experimentos controlados para testar hipóteses ou desenvolver métodos inovadores, como no caso do método de classificação proposto utilizando redes neurais.

Embora o modelo tenha mostrado alta precisão, ainda existem problemas de classificação incorreta de partículas metálicas escuras. Além disso, a necessidade de uma base de dados grande e bem identificadas é um desafio.

2.5 MONTAGEM, EMBALAGEM E LOGÍSTICA

Os autores (Pedrosa et al., 2023) investigaram o impacto dos processos logísticos e de montagem na contaminação por partículas metálicas em produtos eletrónicos, especificamente antenas automóveis, buscando soluções para mitigar esse problema. Utilizando métodos como lavagem sob pressão e ultrassom, as partículas foram removidas de antenas e componentes, selecionados aleatoriamente, sendo posteriormente analisadas por microscopia ótica. Partículas não conformes resultaram em ajustes nos processos de embalagem e soldagem durante a montagem do produto, com uma nova análise demonstrando a eficácia das medidas implementadas na redução da contaminação. Este estudo evidencia a influência dos fatores investigados e a eficácia das soluções aplicadas, destacando a importância contínua da limpeza técnica para garantir a qualidade e desempenho dos componentes eletrónicos na indústria automóvel.

Em outro trabalho relacionado a este tópico, os autores (Pečman & Luptak, 2021) apresentam um caso de estudo que investigou as melhores soluções de embalagem para proteger componentes eletrónicos durante o transporte, considerando a qualidade e o custo. Foram testados diferentes métodos de embalagem (a granel, em saco plástico de polietileno e em filme extensível de polietileno de baixa densidade) para cabos de 1,5 mm de diâmetro e 220 mm de comprimento, avaliando sua conformidade com os requisitos de limpeza técnica após um transporte de 370 km. Os resultados mostraram que apenas o empacotamento em saco plástico atendeu às especificações de limpeza técnica, destacando a importância da escolha adequada de embalagem para manter a limpeza dos componentes durante o transporte.

O caso de estudo oferece uma análise detalhada sobre a proteção de componentes eletrónicos durante o transporte, utilizando diferentes métodos de embalagem, fornecendo uma solução viável para a embalagem dos cabos.

2.6 ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Os autores (Panusch et al., 2021) implementaram algoritmos avançados de processamento de imagem para melhorar o reconhecimento de partículas na inspeção técnica de limpeza dos componentes. A inspeção, realizada conforme as normas ISO 16232 e VDA 19, normalmente envolve a deteção, medição, contagem e classificação de partículas usando um microscópio de luz incidente e programa de avaliação, seguido de uma revisão manual dos resultados. Os algoritmos propostos incluem profundidade de campo alargada, forma a partir do foco, remoção periódica de ruído e um algoritmo robusto de costura de imagens. A combinação destes algoritmos permite um maior grau de automação, melhorando a precisão da informação recebida pelo

examinador humano e reduzindo significativamente a necessidade de interação e intervenção humana durante a inspeção de limpeza técnica.

Esta abordagem abre possibilidades para mais casos de uso e reduz a necessidade de examinadores especialmente formados. Uma área de interesse é aproximar as inspeções de limpeza dos processos de produção, reduzindo o tempo de espera das inspeções. Isso permite um maior fluxo de trabalho, que, juntamente com ciclos de melhoria mais rápidos, possibilita uma intervenção mais rápida em casos de excedência dos limites. Outras áreas de pesquisa incluem as possibilidades de integração automatizada da inspeção de limpeza no sistema de produção e o papel dos algoritmos de processamento de imagem na redução do esforço e da interação humana.

O estudo de (Panusch et al., 2021) utiliza uma estratégia de pesquisa experimental, focada na inovação e na validação de soluções técnicas específicas para melhorar a precisão e a automação de processos de inspeção técnica.

2.7 FABRICO ADITIVO

O trabalho de (Koblenzer, 2017) explora de forma teórica as tendências atuais na indústria automóvel e o seu impacto nos processos de limpeza de peças. O autor enfatiza que a remoção de partículas tradicionais está a mudar para a remoção de filmes de óleo ou graxa, devido a novos requisitos de fabrico, como a eletrificação do trem de força e a condução autónoma.

Este artigo destaca um tema que recebe pouca atenção de outros autores na área da limpeza técnica, que é a relação da limpeza técnica com o fabrico de estruturas complexas através do fabrico aditivo. O fabrico aditivo representa um desafio adicional para garantir padrões de limpeza técnica, pois produtos produzidos por meio de fabrico aditivo frequentemente possuem estruturas de poros abertos com áreas de difícil acesso, o que tornará difícil garantir que padrões específicos de limpeza sejam atendidos.

O autor conclui que os fabricantes de máquinas de limpeza industrial precisam adaptar-se rapidamente a esses novos requisitos, aproveitando experiências de outros setores industriais, enfatizando que não serão apenas as máquinas que precisarão ser modificadas. As qualificações dos funcionários, seus conhecimentos básicos e a compreensão dos processos técnicos tornar-se-ão cada vez mais importantes.

2.8 REFABRICO E SUSTENTABILIDADE

O autor (Krotil, 2019) discute a importância e o processo de refabrico de componentes de veículos comerciais após seu ciclo de vida de 15 a 20 anos. Isso requer o *design* de um processo de recondicionamento eficaz em termos de custo e qualidade. A motivação deste trabalho advém da do facto de que a demanda por limpeza técnica na produção de peças industriais aumentou. O refabrico visa fornecer peças de reposição de alta qualidade e custo-efetivas com níveis de limpeza e funcionalidade equivalentes aos produtos novos. O refabrico pode economizar até 80% nos custos de fabrico e reduzir o consumo de material em até 90%.

O processo envolve a remoção de contaminantes em peças de veículos usados para restaurá-las à condição quase original. Isso envolve um ciclo de controlo holístico onde a contaminação inicial e os requisitos de limpeza são avaliados para otimizar o processo de recondicionamento.

Análises detalhadas do estado das peças ajudam a identificar áreas críticas e contaminantes, orientando o *design* de processos de limpeza eficazes. Tecnologias como fluorescência induzida por laser e espectroscopia de raios X são usadas para avaliar o estado inicial das peças.

Neste artigo, cadeias de processos de limpeza foram desenvolvidas para peças como compressores de cabeçote, módulos de válvula de recirculação de gases de escape e sensores de pressão para reduzir o consumo de material e energia. Por exemplo, a limpeza de um cabeçote do cilindro utiliza um processo de limpeza em três estágios: ultrassom, jateamento e um segundo ultrassom. Este método mostrou-se adequado para remover quase completamente as contaminações filmogénicas, a carbonização, além de resíduos de tinta e agentes de jateamento. Entretanto, para a válvula de recirculação de gases de escape, um processo de dois estágios consistindo de imersão e jateamento com uma passivação subsequente é mais apropriado.

2.9 MÉTODOS DE LIMPEZA

Os autores (Sitko et al., 2008) investigaram a eficiência dos métodos de limpeza no setor da montagem eletrónica, focando particularmente a importância da limpeza devido aos avanços na tecnologia que levam a resoluções mais baixas e a maiores exigências de fiabilidade em aplicações como os setores automóvel, médico e militar.

O estudo procurou colmatar a falta de informação sobre a escolha do método de limpeza adequado e organização de parâmetros para resultados ótimos em circuitos e montagens eletrónicas.

Os autores desenvolveram um novo método para medir a eficiência da limpeza através da avaliação ótica, fornecendo uma avaliação numérica objetiva da limpeza de conjuntos eletrónicos. Este método foi utilizado para avaliar e comparar diferentes processos de limpeza, servindo como ferramenta para a otimização do recém-desenvolvido sistema de limpeza por pulverização.

Foram realizadas várias experiências para comparar a eficiência da agitação ultrassónica com outros métodos, como a pulverização ao ar e sob imersão, com o objetivo de compreender o impacto das condições físicas na eficiência da limpeza. O método de avaliação ótica forneceu uma forma objetiva e quantitativa de avaliar a eficiência da limpeza, oferecendo uma medição mais precisa em comparação com os métodos tradicionais. Métodos contrastantes, como apenas a inspeção visual ou análise química, podem não fornecer o mesmo nível de precisão e objetividade na avaliação da eficiência da limpeza que o método ótico desenvolvido pelos autores.

A revisão da literatura revelou que, apesar da crescente exigência por elevados níveis de limpeza técnica na indústria automóvel, os estudos sobre o impacto desses requisitos nos processos produtivos ainda são limitados. A maioria das pesquisas concentra-se nos métodos de inspeção, mas há uma lacuna significativa na aplicação do controlo estatístico do processo (SPC) para monitorização e melhoria contínua dos requisitos de limpeza técnica em ambientes industriais.

Neste contexto, o presente estudo visa colmatar esta lacuna, propondo a implementação de técnicas estatísticas na monitorização da limpeza técnica em componentes automóveis, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada dos padrões de contaminação. Os resultados fornecem diretrizes para melhorar processos produtivos, reduzir desperdícios e melhorar a conformidade dos componentes com os requisitos de limpeza técnica, fortalecendo a competitividade das empresas do setor automóvel.

Com o objetivo de complementar a revisão da literatura, foi realizada uma análise bibliométrica para caracterizar a produção científica sobre limpeza técnica na indústria automóvel e identificar tendências de investigação.

2.10 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Efetuou-se uma pesquisa em janeiro de 2025 pelos termos "technical cleanliness" e "automotive industry", combinados com o operador boleano "and", na ferramenta de pesquisa Google *Scholar,* que retornou cerca de 108 resultados. Um valor pequeno, quando comparado com cerca de 1,110,000 resultados na pesquisa pelo termo "automotive industry". Patentes e revisões foram desmarcadas das opções para que não contabilizassem nestes resultados.

Adicionalmente, como pode ser visto na *Figura 1*, efetuou-se uma análise bibliométrica com o auxílio do programa *VOSviewer* na busca pelo termo "technical cleanliness", a fim de identificar tendências e relações entre diferentes termos num conjunto de publicações científicas sobre este tema.

É importante destacar que nesta análise bibliométrica, foram considerados apenas os termos que ocorreram pelo menos três vezes nas publicações.

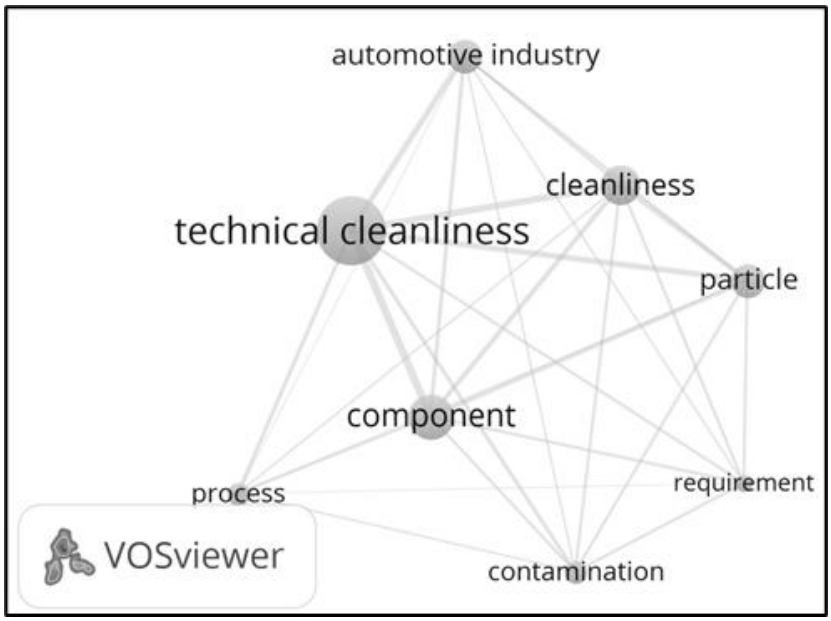


Figura 1 - Análise bibliométrica gerada pelo programa VOSviewer para o termo "technical cleanliness" e sua relação com outros termos em publicações científicas.

No resultado acima, cada círculo representa um termo chave ou palavra-chave nas publicações. O tamanho de cada círculo indica a frequência do termo. Por exemplo, "technical cleanliness" é o termo mais proeminente, sendo o tema central nas publicações analisadas.

As linhas que conectam os círculos representam termos que aparecem em simultâneo nas mesmas publicações, ou seja, os termos interligados tendem a aparecer juntos nos mesmos documentos. Por exemplo, é possível observar que a indústria automóvel está diretamente relacionada com o tema da limpeza técnica. Além disso, a espessura e a intensidade da cor das linhas refletem a força da relação, sendo que as linhas mais espessas indicam uma conexão mais forte. Assim, os dados sugerem que a relação entre a indústria automóvel e a limpeza técnica é significativa.

No âmbito da revisão da literatura, procedeu-se a uma pesquisa sistemática na plataforma *Google Scholar*, utilizando os termos "technical cleanliness" e "automotive", com o objetivo de avaliar a evolução do interesse científico associado à temática da limpeza técnica na indústria automóvel, conforme demonstrado no *Gráfico 1*.

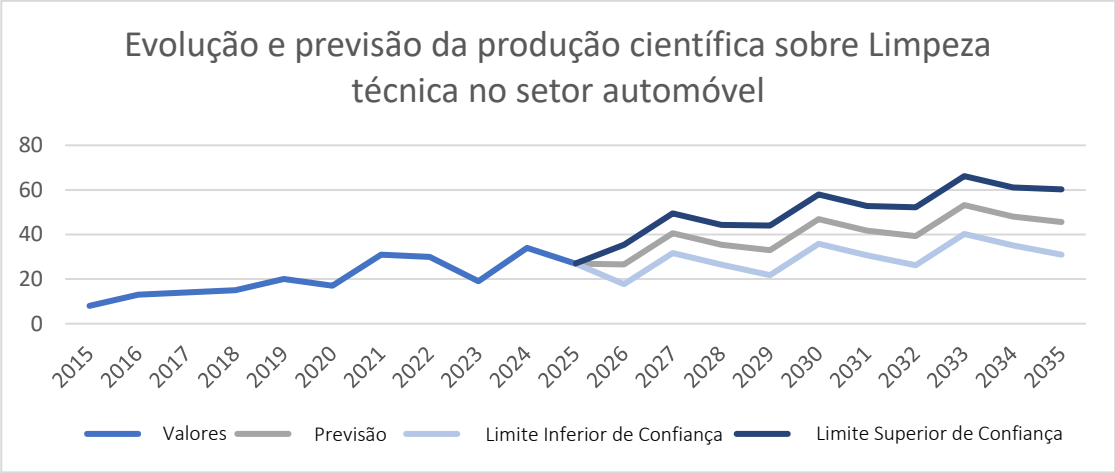


Gráfico 1 - Produção científica em limpeza técnica no setor automóvel: evolução na última década e projeção para a próxima

A análise evidencia que, embora a produção científica nesta área tenha aumentado de forma gradual ao longo da última década, o volume total de publicações permanece relativamente limitado quando comparado com outros domínios consolidados da engenharia e da gestão industrial. A projeção realizada através da ferramenta *Forecast Sheet* do Excel sugere que a tendência futura se mantém positiva, mas ainda moderada, com intervalos de confiança que refletem incerteza quanto ao ritmo de crescimento. Estes resultados indicam que, apesar de a limpeza técnica estar a ganhar relevância no setor automóvel, ainda existe uma clara necessidade de expandir a investigação académica e aplicada sobre o tema, de modo a acelerar o desenvolvimento de conhecimento, normalização, metodologias de controlo e tecnologias de suporte. Reforçar a produção científica e promover estudos mais aprofundados é essencial para impulsionar a maturidade da indústria neste domínio, melhorar a robustez dos processos e suportar decisões técnicas alinhadas com as exigências de qualidade dos sistemas automóveis atuais.

3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

A estratégia de pesquisa utilizada foi a investigação-ação suportada pela metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar). A metodologia de investigação-ação é adequada neste contexto pelo seu foco na ação prática dentro da organização, sendo ideal para responder a questões diretamente aplicáveis ao ambiente de trabalho e não apenas para a criação de conhecimento teórico. Ao enfatizar a colaboração contínua e o impacto real na organização, esta metodologia não só resolve problemas imediatos, mas também cria implicações que podem ser aplicadas além do projeto específico em questão, ampliando sua utilidade para o futuro.

Para este estudo, selecionou-se um componente com base na sua relevância crítica para o processo produtivo, no histórico de não conformidades associadas à limpeza técnica, na elevada variabilidade dos resultados de contaminação por partículas e no impacto económico decorrente de reclamações do cliente, bem como na disponibilidade de dados e acessibilidade ao processo para aplicação da metodologia DMAIC.

Os requisitos relativos à quantidade de partículas aplicáveis ao componente em estudo encontram-se definidos na *Tabela 1*, na qual são especificados os limites máximos admissíveis por classe de tamanho de partícula, distinguindo-se o total de partículas e o subconjunto de partículas metálicas.

Tabela 1 - Requisitos de Quantidade de Partículas por Classe e Faixa Granulométrica do Componente em Estudo

Classe	Tamanho de partícula (µm)	Total	Metálicas
G	150 - 200	146	36
H	200 - 400	72	21
I	400 - 600	16	5
	> 600	0	0

Para cada classe, são definidos dois limites distintos: o número máximo total de partículas permitidas e o número máximo de partículas metálicas. O valor correspondente ao total de partículas resulta da soma das partículas metálicas e não metálicas identificadas em cada classe dimensional. As partículas metálicas são tratadas de forma diferenciada por serem consideradas mais críticas devido ao seu potencial impacto funcional. Verifica-se ainda que, para partículas com dimensão superior ou igual a 600 µm, não é permitida qualquer ocorrência, independentemente da sua natureza, sendo a deteção de uma única partícula acima deste limiar suficiente para classificar o componente como não conforme.

As amostras são recolhidas pelo laboratório em embalagens plásticas, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma VDA 19.1. Cada análise é realizada com apenas uma única amostra do componente. A recolha das amostras é efetuada após a embalagem, com uma frequência de três vezes por semana. O horizonte temporal do estudo é de natureza longitudinal, uma vez que, ao longo de 11 meses, é acompanhada a evolução dos resultados dos ensaios realizados em cada componente. Este tipo de estudo permite a observação de variações e alterações nas amostras ao longo do tempo.

A abordagem metodológica adotada baseia-se na aplicação integrada de estatística descritiva, estatística inferencial e análise gráfica avançada, sendo complementada por análise microscópica das partículas fora de especificação, com o objetivo de compreender os fatores que influenciam a geração de partículas ao longo do processo produtivo.

Numa fase inicial, é realizada uma análise estatística descritiva das amostras recolhidas antes da implementação das ações de melhoria, permitindo a caracterização do comportamento inicial do processo, a identificação da variabilidade existente e a evidência das classes granulométricas e das variáveis mais críticas face aos requisitos de limpeza técnica.

Posteriormente, são aplicados métodos de estatística inferencial com o objetivo de identificar associações, tendências e possíveis dependências entre as variáveis operacionais do processo e os indicadores de contaminação por partículas, nomeadamente massa, contagem total e contagem de partículas metálicas por classe dimensional. A análise é conduzida com base em modelos estatísticos adequados à natureza dos dados, incluindo regressão linear com transformação da variável resposta e modelos de regressão para dados de contagem, em particular regressão binomial negativa, de forma a lidar com a não normalidade e com a superdispersão dos dados.

Importa salientar que a identificação de associações estatísticas não é interpretada, de forma isolada, como evidência de causalidade. A interpretação dos resultados baseia-se na plausibilidade técnica dos efeitos observados e na coerência com o conhecimento do processo produtivo.

Por fim, a eficácia das ações de melhoria implementadas é avaliada através da utilização de cartas de controlo antes e depois das intervenções, permitindo a análise da evolução da estabilidade e da variabilidade do processo ao longo do tempo, mantendo uma interpretação orientada para o contexto industrial e para a tomada de decisão baseada em dados.

As ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste estudo incluíram o Microsoft Excel, o Minitab e o RStudio, selecionadas de forma complementar em função das necessidades analíticas de cada etapa.

Para garantir uma abordagem estruturada e orientada à melhoria contínua, o estudo é desenvolvido com base na metodologia DMAIC. Esta metodologia permite uma análise sistemática dos processos, identificando oportunidades de melhoria e assegurando a implementação organizada, multidisciplinar e economicamente sustentável das soluções propostas (Cleto & Quinteiro, 2011).

Enquanto o método DMAIC é aplicado com foco na estrutura de melhoria contínua, o método CRISP-DM (*Cross-Industry Standard Process for Data Mining*) é adotado como abordagem complementar no interior das fases Medir e Analisar do ciclo DMAIC, permitindo uma análise sistemática, estruturada e reprodutível dos dados recolhidos. O modelo CRISP-DM é utilizado como enquadramento metodológico complementar, adaptado ao contexto da engenharia de qualidade e da melhoria de processos industriais. As suas fases são interpretadas à luz da análise estatística e técnica dos dados de processo, não como um projeto de mineração de dados clássico, mas como uma estrutura sistemática para compreensão do problema, preparação dos dados, modelação estatística, avaliação dos resultados e implementação de ações corretivas. Esta adaptação assegura

coerência metodológica com a abordagem DMAIC, reforçando a aplicação do princípio de *Data-Driven Decision Making* (DDDM) no contexto industrial.

O CRISP-DM surgiu no final da década de 1990 como resposta à crescente necessidade de estruturar o processo de extração de conhecimento a partir de grandes volumes de dados. Publicado formalmente em 1999, o modelo foi desenvolvido por um consórcio de especialistas provenientes de diferentes organizações industriais e académicas, com o apoio da União Europeia, resultando numa metodologia independente de ferramentas, amplamente documentada e aplicável a diversos setores industriais (Kurgan & Musilek, 2006).

O modelo CRISP-DM estrutura a análise de dados em seis fases essenciais. Adaptado a este estudo, a fase de compreensão do negócio define os objetivos do estudo e os requisitos do processo a partir da perspetiva organizacional. A compreensão dos dados envolve a recolha inicial, a caracterização dos dados disponíveis e a identificação de problemas de qualidade e padrões relevantes. A preparação dos dados consiste na seleção, tratamento e transformação das variáveis de modo a torná-las adequadas à análise. Na fase de modelação, são aplicados e ajustados modelos estatísticos apropriados à natureza dos dados e aos objetivos definidos. A avaliação verifica a robustez dos modelos e a coerência dos resultados face aos objetivos do processo. Por fim, a fase de implementação traduz os resultados analíticos em ações práticas de melhoria e suporte à tomada de decisão no contexto industrial (Kurgan & Musilek, 2006; Mariscal et al., 2010)

A integração entre a análise estatística, a análise gráfica exploratória e a caracterização microscópica das partículas sustentam a necessidade do princípio de DDDM, assegurando que as conclusões e as decisões sejam fundamentadas em evidência quantitativa e técnica robusta, e não apenas em perceções empíricas do processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta secção apresenta e discute de forma estruturada os resultados obtidos ao longo do trabalho desenvolvido, com foco na avaliação do estado de limpeza técnica do componente em estudo e na análise dos fatores com maior impacto no seu controlo. Os resultados são apresentados de acordo com a metodologia definida, integrando dados provenientes da auditoria de limpeza técnica, da análise estatística e da caracterização das partículas identificadas.

4.1 AUDITORIA DE LIMPEZA TÉCNICA

A auditoria realizada baseou-se na proposta de auditoria presente na atual versão amarela da (*VDA 19.1,* 2025), sendo os registos completos apresentados no Anexo I. Embora o enfoque original da norma seja direcionado para a avaliação da limpeza técnica, o modelo foi ajustado para o chão de fábrica e para as condições específicas da empresa em estudo, permitindo uma aplicação prática e coerente com o ambiente operacional observado.

A auditoria teve como finalidade avaliar as práticas operacionais com potencial para afetar o estado da limpeza técnica da peça em estudo, considerando as condições reais de produção observadas no dia da auditoria. Assim, foi possível identificar, de forma clara e objetiva, as áreas prioritárias para intervenção, evitando inicialmente alterações extensas em toda a fábrica. A intenção foi concentrar esforços nas zonas com maior necessidade de melhoria, permitindo que a implementação de ações seja progressiva, orientada por impacto e sustentada por evidência. Assim, a auditoria serviu como ponto de partida para estabelecer prioridades, fundamentar decisões e orientar a sequência lógica de melhorias no processo de controlo da limpeza técnica.

A auditoria de limpeza técnica foi estruturada com base em três tipos possíveis de resultado para cada item avaliado: OK, NOK e Oportunidade de Melhoria. O ficheiro Excel utiliza dois parâmetros essenciais para o cálculo do estado por área e do resultado global da auditoria: a percentagem de itens OK e a percentagem de itens classificados como Oportunidade de Melhoria. Esta abordagem possibilita que as ações de melhoria sejam direcionadas e progressivas, começando pelas áreas mais críticas em vez de resultar em alterações generalizadas que poderiam gerar custos elevados e dispersão de recursos. A auditoria, portanto, fornece um diagnóstico estratégico e quantificado, alinhado com os princípios da (*VDA 19.2*, 2010), que recomenda a identificação sistemática de potenciais de limpeza e a priorização objetiva das ações. Com base nesses valores, aplica-se uma lógica ponderada.

O sistema atribui aos itens OK peso total e aos itens classificados como oportunidade de melhoria metade do peso. Isto significa que a auditoria reconhece que oportunidades de melhoria não têm o mesmo impacto negativo que uma não conformidade, mas ainda assim reduzem a robustez de processo, justificando um peso intermédio. Itens NOK não contribuem para o indicador, assumindo peso zero, o que reflete a sua criticidade.

Se o resultado for igual ou superior a 80%, considera-se que a área apresenta comportamento muito bom. Se o valor for igual ou superior a 50% mas inferior a 80%, considera-se que a área requer atenção. Esta faixa

representa processos que funcionam, mas com fragilidades que, se não forem tratadas, podem evoluir para problemas críticos.

Para valores inferiores a 50%, considera-se que a área requer ação imediata. Esta classificação indica grande proporção de itens NOK ou combinação significativa de NOK com oportunidades de melhoria. Neste estado, o processo apresenta fragilidades que comprometem diretamente a limpeza técnica e que podem afetar a peça, devendo ser tratadas com prioridade.

Como pode ser visto na *Figura 2*, o resultado global da auditoria mostrou que o processo, na sua condição atual, requer atenção. A análise evidenciou que apenas 44,26% dos itens são totalmente conformes e uma presença relevante de 36,07% de não conformidades, acompanhada de 16,97% em oportunidades de melhoria.

RESULTADO GLOBAL	OK	NOK	OPORTUNIDADE DE MELHORIA
REQUER ATENÇÃO	44,26%	36,07%	19,67%

Figura 2 - Resultado global da auditoria de limpeza técnica

Este desempenho demonstra que, no conjunto das áreas observadas, o sistema de limpeza técnica apresenta fragilidades estruturais que ultrapassam pontos isolados e refletem a necessidade de atenção. O diagnóstico global indica que o processo não assegura, de forma consistente, as condições necessárias para garantir a estabilidade da limpeza técnica da peça, reforçando a importância de execução das ações corretivas e preventivas identificadas durante a auditoria.

Uma vez identificado o estado global da produção da peça em estudo, o próximo passo é aprofundar a análise e determinar quais as áreas que devem ser priorizadas na implementação de ações de melhoria. Esta análise pode ser observada no *Gráfico 2* e na *Figura 3*.

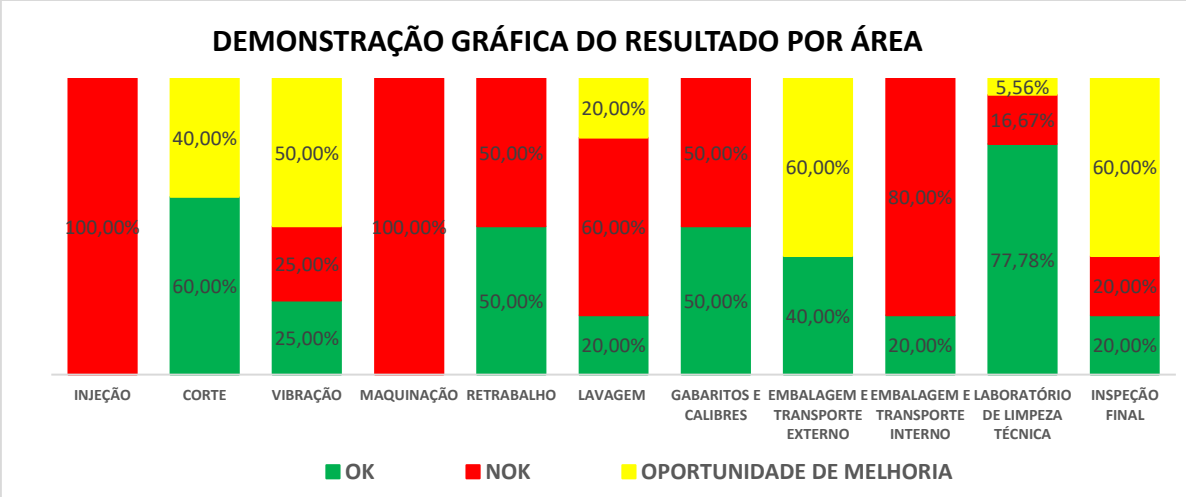


Gráfico 2 - Resultado gráfico por área da auditoria de limpeza técnica

	RESULTADO POR ÁREA	OK	NOK	OPORTUNIDADE DE MELHORIA
INJEÇÃO	REQUER AÇÃO IMEDIATA	0,00%	100,00%	0,00%
CORTE	MUITO BOM	60,00%	0,00%	40,00%
VIBRAÇÃO	REQUER ATENÇÃO	25,00%	25,00%	50,00%
MAQUINAÇÃO	REQUER AÇÃO IMEDIATA	0,00%	100,00%	0,00%
RETRABALHO	REQUER ATENÇÃO	50,00%	50,00%	0,00%
LAVAGEM	REQUER AÇÃO IMEDIATA	20,00%	60,00%	20,00%
GABARITOS E CALIBRES	REQUER ATENÇÃO	50,00%	50,00%	0,00%
EMBALAGEM E TRANSPORTE EXTERNO	REQUER ATENÇÃO	40,00%	0,00%	60,00%
EMBALAGEM E TRANSPORTE INTERNO	REQUER AÇÃO IMEDIATA	20,00%	80,00%	0,00%
LABORATÓRIO DE LIMPEZA TÉCNICA	MUITO BOM	77,78%	16,67%	5,56%
INSPEÇÃO FINAL	REQUER ATENÇÃO	20,00%	20,00%	60,00%

Figura 3 - Resultado por área da auditoria de limpeza técnica

A avaliação por área revelou um desempenho heterogéneo ao longo do fluxo produtivo, evidenciando pontos críticos e zonas já estabilizadas em termos de risco para a limpeza técnica.

O processo de injeção apresentou o resultado mais crítico, enquadrando-se na categoria que requer ação imediata, dado que nenhum dos itens verificados estava em conformidade. Os processos de maquinação, lavagem, e a área de embalagem e transporte interno exibiram, consecutivamente, resultados que exigem ação imediata.

As áreas de vibração, retrabalho, gabaritos e calibres, embalagem e transporte externo, assim como a etapa de inspeção final, foram classificadas como requerendo atenção. Estas áreas não apresentam um cenário crítico, mas demonstram inconsistências que necessitam de ajustes para evitar o agravamento de fontes de contaminação e garantir conformidade ao longo da cadeia produtiva.

Em contraste, duas áreas demonstraram desempenho robusto. A área de corte e o laboratório de limpeza técnica foram classificadas como muito boas, indicando um nível adequado de controlo e práticas alinhadas com os requisitos da limpeza técnica. Estes setores constituem referências internas para a consolidação de boas práticas.

Para complementar a auditoria, procedeu-se a uma análise estatística abrangente, estruturada segundo o modelo CRISP-DM. Esta abordagem metodológica permitiu explorar os dados de forma sistemática e rigorosa,

identificar padrões e relações entre variáveis do processo e a incidência de partículas, e, consequentemente, apoiar decisões mais fundamentadas em dados do desempenho real do processo.

4.2 COMPREENSÃO DO NEGÓCIO

No âmbito desta etapa, estabeleceu-se como premissa fundamental que as análises e as ações de melhoria devem seguir os princípios definidos nas normas VDA19.1 e VDA19.2, nomeadamente "tão limpo quanto necessário, e não tão limpo quanto possível" e a priorização das intervenções "do interior para o exterior". Estes princípios orientam o projeto no sentido de focar os recursos nos aspetos que efetivamente influenciam a funcionalidade da peça, evitando investimentos desproporcionados ou soluções de limpeza excessivas que não acrescentem valor.

O foco desta etapa é estabelecer com precisão o que se pretende resolver e quais indicadores devem ser analisados. Para isso, foram considerados como *inputs* para análise os dados de limpeza técnica recolhidos ao longo de onze meses, os registos de produção correspondentes, análises microscópicas das partículas acima de especificação, e os resultados da auditoria aos setores que intervêm no processo.

Como *outputs*, esta fase produziu: a definição precisa do problema a analisar; a identificação das variáveis relevantes do processo (molde, cavidade, *lead time*, dia da semana, operadores, intervalos temporais, entre outras); e o estabelecimento das perguntas estatísticas a investigar, tais como a existência de correlação entre variáveis operacionais e o aumento da massa ou contagem de partículas. Esta estrutura assegura que as etapas seguintes do CRISP-DM se desenvolvam de forma alinhada com as necessidades reais do processo produtivo.

4.3 COMPREENSÃO DOS DADOS

Esta etapa do CRISP-DM consiste na análise exploratória do banco de dados disponibilizado pelo processo industrial. O banco de dados inclui variáveis categóricas e numéricas, relacionadas a características das peças, do processo de produção e dos operadores, conforme detalhado na *Tabela 2.*

Tabela 2 - Lista de variáveis com descrição e tipologia

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	TIPO
AMOSTRA	Número identificador da amostra.	Categórica (nominal)
CONTENTOR	Código sequencial do contentor onde a peça analisada foi armazenada após injeção.	Numérica (inteira)
MFI	Número da máquina de fundição injetada que injetou a amostra analisada.	Categórica (nominal)
CAVIDADE	Número da cavidade do molde que injetou a amostra analisada.	Categórica (nominal)
MOLDE	Identificação do molde.	Categórica (nominal)
CONTADOR	Valor registado no contador da MFI no início do turno, correspondente ao número	Numérica (inteira)

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	TIPO
	acumulado de ciclos efetuados pelo molde desde o início da sua utilização.	
OPERADOR_INJ	Código do operador responsável pela operação de injeção da peça.	Categórica (nominal)
DIA_SEMANA_LAVAGEM	Dia da semana em que a peça foi lavada.	Categórica (nominal)
DIA_SEMANA_INSP	Dia da semana em que a peça foi inspecionada.	Categórica (nominal)
OP_INSP	Código do operador que realizou a inspeção final da peça.	Categórica (nominal)
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	Número de dias decorridos entre a lavagem da peça e a realização da inspeção final.	Numérica (inteira)
LEAD_TIME	Tempo total decorrido, em dias, entre a injeção da peça e a embalagem.	Numérica (inteira)
ESTADO_PEÇA	Resultado visual da inspeção final.	Categórica (nominal)
MASSA_PARTICULAS	Massa total de partículas no filtro de análise, em gramas.	Numérica (contínua)
TOTAL	Somatório de partículas metálicas e não metálicas nos intervalos analisados	Numérica (inteira)
TOTAL _150_200	150µm ≤ partículas metálicas e não metálicas < 200µm	Numérica (inteira)
TOTAL_200_400	200µm ≤ partículas metálicas e não metálicas < 400µm	Numérica (inteira)
TOTAL_400_600	400µm ≤ partículas metálicas e não metálicas < 600µm	Numérica (inteira)
TOTAL_600	Contagem de partículas metálicas e não metálicas ≥ 600 µm	Numérica (inteira)
TOTAL_METAL	Somatório de partículas metálicas nos intervalos analisados	Numérica (inteira)
TOTAL_METAL_150_200	150µm ≤ partículas metálicas < 200µm	Numérica (inteira)
TOTAL_METAL_200_400	200µm ≤ partículas metálicas < 400µm	Numérica (inteira)
TOTAL_METAL_400_600	400µm ≤ partículas metálicas < 600µm	Numérica (inteira)
TOTAL_METAL_600	Partículas metálicas ≥ 600 µm	Numérica (inteira)

4.4 PREPARAÇÃO DOS DADOS

A fase de preparação dos dados tem como objetivo assegurar que o conjunto de dados se encontre limpo, consistente e estruturado de forma adequada para análises estatísticas. Esta etapa é fundamental para aumentar a fiabilidade dos resultados e permitir a extração de informações relevantes para a gestão do processo industrial.

Nesta fase, procedeu-se à identificação e tratamento de valores ausentes e erros de registo, uma vez que as folhas de produção de cada peça analisada eram preenchidas manualmente pelos operadores e transferidas para o banco de dados manualmente. Para garantir a fiabilidade do banco de dados, verificou-se a consistência das informações com o Registo de Produção (RP), assegurando a veracidade dos dados e preenchendo ou corrigindo os valores em falta sempre que possível. Amostras com dados ausentes e com impossibilidade de verificação pelo RP foram descartadas das análises.

Esta abordagem permitiu reduzir a ocorrência de inconsistências e minimizar o impacto de eventuais erros humanos na análise, garantindo que o conjunto de dados utilizado nas fases subsequentes fosse completo, coerente e representativo do processo industrial estudado.

Para assegurar a robustez dos modelos preditivos, foi realizada a identificação e remoção do molde 2 do banco de dados, que apresentou apenas duas observações válidas no período analisado, dimensão amostral insuficiente para estimar variabilidade e realizar comparações estatisticamente robustas entre grupos, sendo uma delas um valor atípico.

4.5 DESENVOLVIMENTO ESTATÍSTICO

Esta etapa consiste na aplicação de técnicas estatísticas descritivas e inferenciais, bem como na exploração gráfica das relações entre variáveis do processo e os resultados de limpeza técnica.

4.5.1 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS

A análise estatística descritiva realizada sobre as 64 amostras recolhidas antes da implementação das ações de melhoria permite caracterizar o comportamento inicial do processo e identificar os principais pontos de fragilidade relativamente à limpeza técnica da peça. Os resultados podem ser consultados na *Tabela 3*.

Tabela 3 - Estatística descritiva do banco de dados antes da implementação de melhorias e da remoção do molde 2.

Estatísticas	massa de partículas (g)	Total	total [150; 200[	total [200; 400[	total [400; 600[	total [600; ∞	Total metálico	total metálico [150; 200[	Total Metálico [200; 400[	Total Metálico [400; 600[	Total Metálico [600;∞
Média	1,6	282	138	121	14	8	85	32	41	7	5
Contagem de entradas	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
Mediana	1,5	233	114	95	11	8	55	20	28	4	4
Desvio-padrão	0,8	191	88	91	11	6	90	39	44	7	5
Mínimo	0,1	52	24	21	1	0	4	0	2	0	0
Máximo	3,8	917	443	434	68	36	566	270	245	42	25
Q1 (25%)	0,9	137	72	53	7	4	28	10	13	2	2
Q2 (50%)	1,5	233	114	95	11	8	55	20	28	4	4
Q3 (75%)	1,9	371	173	166	17	12	117	45	57	9	6
Amplitude Interquartil (AIQ)	1,0	234	101	113	10	8	89	35	44	7	4
Assimetria	0,9	1	1	1	2	2	3	4	2	3	2
Curtose	0,6	2	2	2	8	5	12	23	7	9	8

Os dados revelam que a massa de partículas, que possui um requisito máximo de 1,5 g por amostra, apresenta uma média de 1,6 g e uma mediana de 1,5 g, valores muito próximos entre si, mas acompanhados por um desvio-padrão elevado (0,8 g), indicando uma variabilidade acentuada. A amplitude dos valores observados é igualmente significativa, com um mínimo de 0,1 g e um máximo de 3,8 g, evidenciando que o processo produzia peças com massa total de partículas por amostra tanto muito leve quanto substancialmente acima dos limites especificados. A assimetria positiva (0,9) demonstra a presença de caudas mais longas à direita, sugerindo a ocorrência de valores elevados. Além disso, com base no valor do segundo quartil (Q2), pode-se determinar que aproximadamente 50% das amostras apresentam valores iguais ou inferiores ao limite máximo especificado

O comportamento das contagens de partículas segue o mesmo padrão de elevada variabilidade. A categoria total apresenta uma média de 282 partículas, mas com um desvio-padrão de 191 partículas e valores que variam entre 52 e 917, o que evidencia a instabilidade do processo. A análise por intervalos mostra que, nos intervalos [150;200[e [200;400[, as medianas são respetivamente 114 e 95 partículas, mas com amplitudes interquartis muito elevadas, demonstrando que as flutuações entre lotes eram substanciais. As categorias acima de 400 µm evidenciam assimetrias e curtoses mais elevadas do que as categorias abaixo de 400 µm, refletindo a presença de eventos raros mas severos, que podem estar associados a causas especiais.

No caso das partículas metálicas, os resultados são ainda mais pronunciados. O total metálico apresenta uma média de 85 partículas e um desvio-padrão de 90, praticamente equivalente à própria média, sinal claro de dispersão extrema. As assimetrias e curtoses elevadas, especialmente na classe [150;200[, reforçam a existência de ocorrências isoladas de elevada contaminação, com impacto desproporcionado no desempenho global do processo. Estes padrões são típicos de processos sem controlo robusto das fontes de contaminação, com possível presença de partículas provenientes de retrabalhos, desgaste de ferramentas ou etapas de movimentação.

Com o objetivo de quantificar a diferença entre o desempenho histórico do processo e os requisitos de limpeza definidos pelo cliente, foi elaborada a *Tabela 4.* Esta tabela relaciona os limites especificados para cada classe de tamanho de partícula com a posição correspondente na distribuição estatística por quartis das amostras recolhidas, permitindo identificar de forma clara quais as classes mais críticas e com maior necessidade de intervenção.

Tabela 4 - Posição estatística dos requisitos de limpeza técnica face à distribuição histórica das partículas

Tamanho de partícula (µm)	Requisito total	Quartil (Q)	Requisito metálicas	Quartil (Q)
[150; 200[	146	Entre Q2 e Q3	36	Entre Q2 e Q3
[200; 400[	72	Entre Q1 e Q2	21	Entre Q1 e Q2
[400; 600[	16	Entre Q2 e Q3	5	Entre Q2 e Q3
[600; ∞	0	Menor que Q1	0	Menor que Q1

Quando um requisito se posiciona entre Q2 e Q3, como ocorre para as classes [150; 200[e [400; 600[, nas partículas totais e metálicas, significa que o limite definido é compatível com o desempenho de, aproximadamente, 50 a 75% das amostras analisadas, sugerindo que o processo raramente excede esse valor e que o cumprimento é estatisticamente viável sem alterações profundas. Na classe [200; 400[, cujos requisitos se situam entre Q1 e Q2, tanto para totais quanto para metálicas, apenas cerca de 25 a 50% das amostras se encontravam dentro da especificação, indicando maior pressão sobre o processo produtivo e maior probabilidade de incumprimento.

Quando o limite especificado se situa abaixo do primeiro quartil da distribuição, como ocorre na classe [600; ∞, isto indica que mais de 75% das amostras históricas se encontrava fora da especificação, pelo que a exigência é estatisticamente incompatível com o desempenho prévio do processo.

A caracterização descritiva permitiu compreender a distribuição e variabilidade dos resultados de limpeza; contudo, para compreender de que forma os fatores de processo influenciam esses resultados, é necessário avançar para uma análise relacional.

4.5.2 ESTATÍSTICAS INFERENCIAIS

Nesta secção, recorrem-se a métodos de estatística inferencial orientados a identificar associações, tendências e possíveis dependências entre variáveis operacionais e os indicadores de limpeza. O objetivo é avaliar se determinados fatores do processo apresentam relação sistemática com a geração de partículas e em que medida essas relações podem orientar decisões de melhoria.

Importa salientar que a existência de correlação não estabelece, por si só, uma relação causal. A interpretação dos resultados será baseada na plausibilidade técnica, na análise temporal dos dados e na consistência dos padrões observados, em conformidade com os princípios metodológicos aceites em engenharia industrial.

4.5.2.1 Massa

A avaliação da normalidade da variável dependente constitui uma etapa imperativa no rigor metodológico da análise estatística, visto que a natureza da distribuição dos dados determina a fundamentação para a escolha entre métodos de inferência. A normalidade foi avaliada por meio do gráfico de probabilidade normal e do teste de Anderson–Darling, conforme *Gráfico 3.*

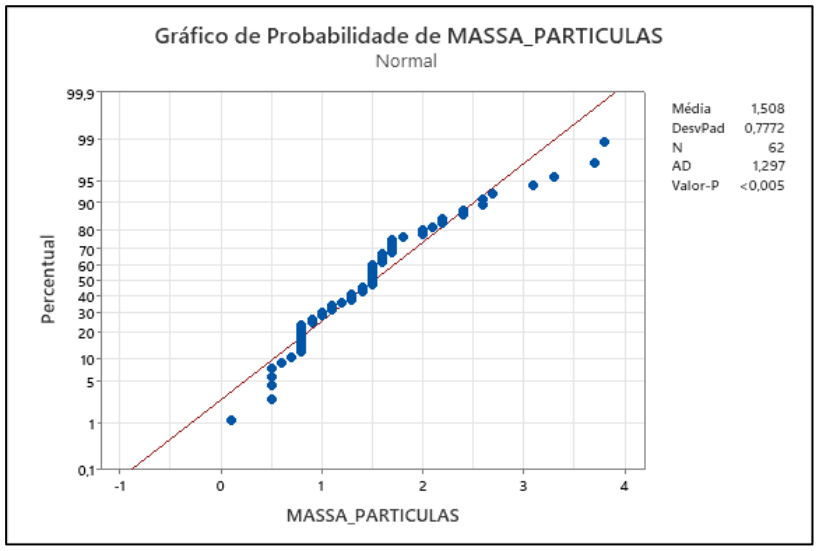


Gráfico 3 - Probabilidade normal da variável "Massa"

Considerando a rejeição da hipótese de normalidade dos dados brutos ao nível de significância de 5% pelo teste de Anderson–Darling, tornou-se necessário adotar uma abordagem que assegurasse o cumprimento dos pressupostos estatísticos dos modelos a aplicar. Neste contexto, foram consideradas alternativas metodológicas, incluindo a utilização de transformações da variável resposta, uma vez que os pressupostos de normalidade se aplicam aos resíduos do modelo e não aos dados originais. Assim, após a aplicação da transformação adequada, procedeu-se à utilização de métodos paramétricos, cuja validade foi confirmada através da análise dos diagnósticos dos resíduos.

Com base no pressuposto acima, foi aplicada uma transformação de Box-Cox à variável resposta, por meio de um procedimento de seleção *stepwise* adotando nível de significância de 0,15 para a entrada e saída de

variáveis, integrando simultaneamente preditores contínuos e categóricos, com parâmetro λ de 0,5 e intervalo de confiança a 95%. O modelo global revelou-se estatisticamente significativo ($p < 0,001$), explicando cerca de 56,30% da variabilidade da massa transformada, embora o R^2 ajustado indique um poder explicativo moderado quando considerada a complexidade do modelo ($R^2aj = 54,04\%$).

De acordo com a *Tabela 5,* o fator com maior influência sobre a massa de partículas é o total de partículas, evidenciado pelo maior valor de soma de quadrados ajustada, pelo valor F mais elevado e pelo menor valor-p ($p < 0,001$). Ainda assim, a análise de variância do modelo ajustado indica que as variáveis de intervalo entre lavagem e inspeção ($p = 0,016$) e total de partículas metálicas com dimensão maior ou igual a 600 µm ($p = 0,021$) também apresentam efeitos estatisticamente significativos ao nível convencional de 5%.

Tabela 5 - Resultados da análise de variância da variável "Massa" transformada

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	3,4184	1,13947	24,91	0,000
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	1	0,2796	0,2796	6,11	0,016
TOTAL_PARTICULAS	1	0,9173	0,91733	20,06	0,000
TOTAL_METAL_600	1	0,2585	0,25847	5,65	0,021
Erro	58	2,6528	0,04574		
Total	61	6,0713			

O *Gráfico 4* de Pareto dos efeitos padronizados confirma estes resultados, destacando o total de partículas como o efeito dominante, ultrapassando claramente o limiar crítico de significância, seguido pelas restantes variáveis mencionadas. Do ponto de vista físico, este resultado é coerente, uma vez que a massa acumulada no filtro depende diretamente da quantidade, dimensão e densidade das partículas retidas.

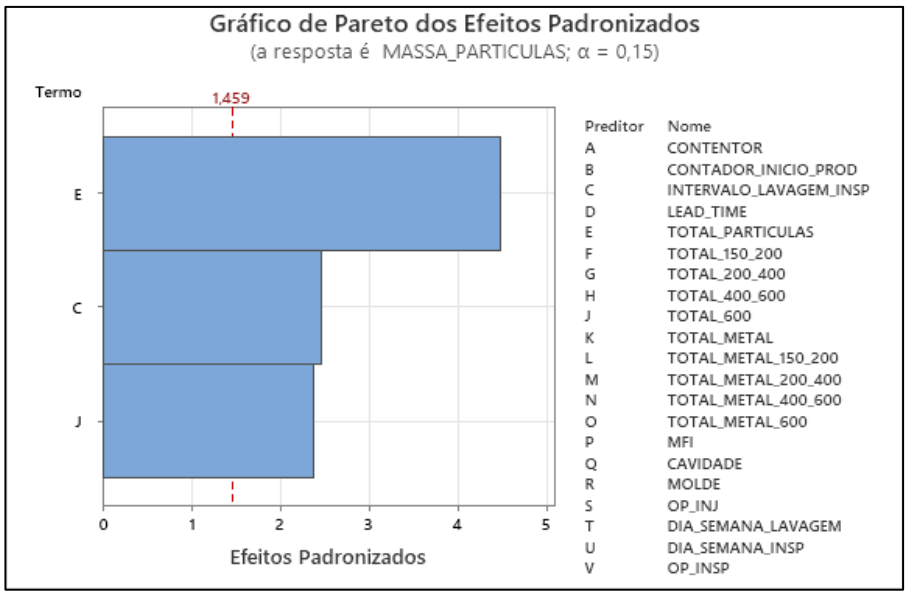


Gráfico 4 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável "Massa"

A utilização de um nível de significância mais permissivo no gráfico de Pareto ($\alpha = 0,15$) teve como objetivo apoiar a fase exploratória e de seleção de variáveis, não alterando, contudo, as conclusões do modelo final. Em síntese, embora várias variáveis apresentem influência estatisticamente significativa sobre a massa, o total de

partículas destaca-se como o principal preditor, exercendo um efeito claramente dominante no comportamento da resposta.

Os diagnósticos dos resíduos, conforme *Figura 4,* confirmam que a transformação aplicada foi adequada e que os pressupostos do modelo são razoavelmente satisfeitos. O gráfico de probabilidade normal exibe resíduos alinhados à bissetriz, indicando que a distribuição dos erros é aproximadamente normal, enquanto o histograma reforça a simetria e a centralidade da variância. Adicionalmente, o gráfico de resíduos versus valores ajustados demonstra uma dispersão aleatória em torno do eixo zero, sem padrões sistemáticos ou funis, o que evidencia a homocedasticidade do modelo. Por fim, a disposição dos resíduos no gráfico de ordem de observação não revela autocorrelação, assegurando que as observações permanecem independentes após o tratamento estatístico realizado para mitigar a não normalidade original da amostra.

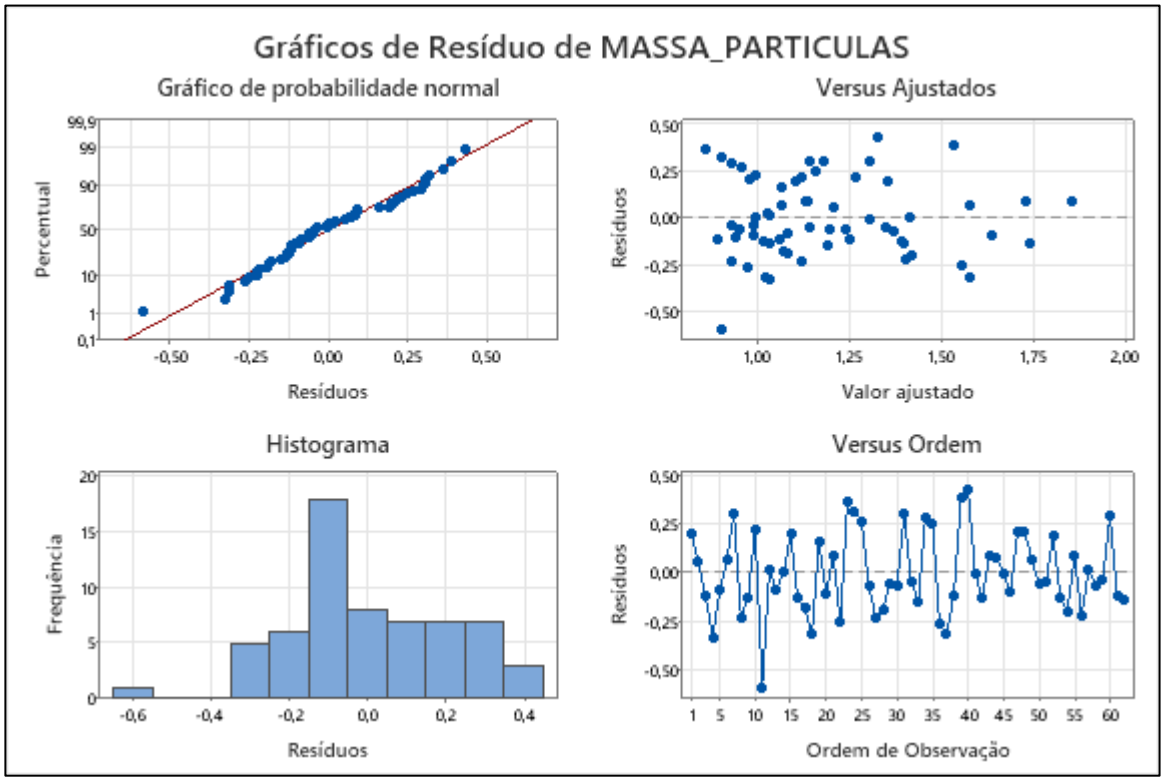


Figura 4 - Diagnósticos dos resíduos para a variável "Massa"

Os resultados evidenciam que a massa de partículas constitui um indicador agregado, resultante da interação entre a quantidade, o tamanho e a natureza das partículas extraídas do componente. Adicionalmente, os resultados sugerem que partículas de maior dimensão assumem maior influência na massa total, não sendo o efeito cumulativo de partículas de menor granulometria equivalente ao da ocorrência de partículas com dimensão igual ou superior a 600 µm. A análise direta das partículas permite, contudo, uma compreensão mais detalhada da origem da contaminação. Com base nestas evidências, as análises causais subsequentes foram orientadas para a contagem e classificação das partículas.

4.5.2.2 Total (Metálico e não metálico)

Este tópico dedica-se à análise das partículas totais, sem distinção entre metálicas e não metálicas, das classes G (maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm), H (maiores ou iguais a 200 µm e menores do que

400µm), I (maiores ou iguais a 400 µm e menores do que 600µm) e maiores ou iguais a 600 µm, dando continuidade à abordagem inferencial iniciada no tópico anterior.

A análise exploratória evidenciou que apenas a classe de partículas maiores ou iguais a 600 µm apresenta distribuição normal, conforme indicado pelo *Gráfico 5* de probabilidade normal e pelos testes de Anderson–Darling.

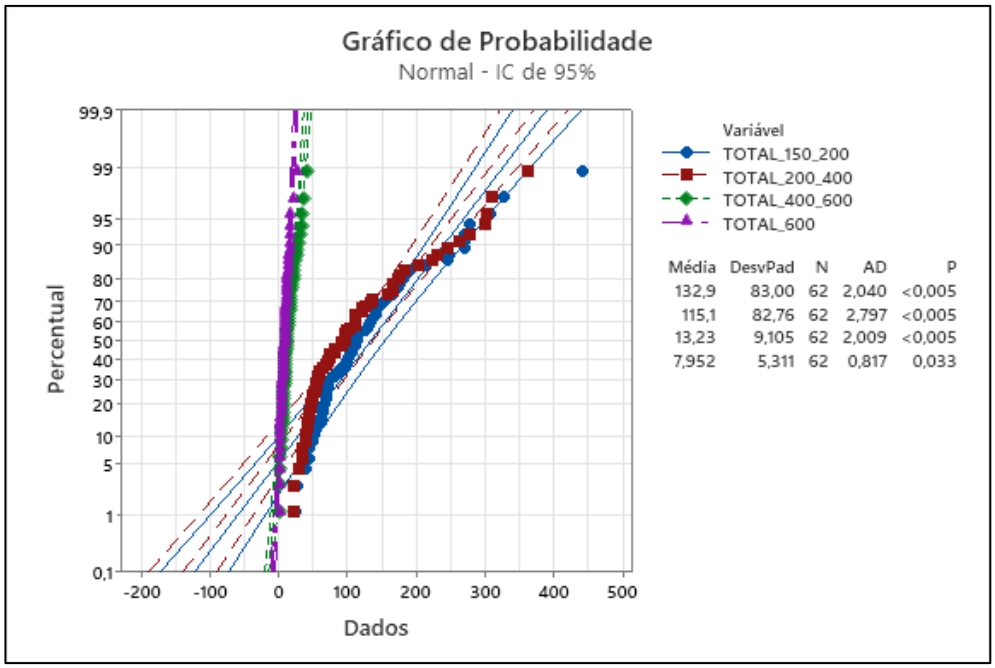


Gráfico 5 - Probabilidade normal para as classes granulométricas de partículas metálicas e não metálicas

Embora o programa Minitab tenha sido fundamental para o tratamento preliminar e testes de normalidade, a natureza de contagem e a sobredispersão extrema das variáveis de resposta exigiram uma abordagem estatística não suportada completamente pelo Programa Minitab. Objetivando parametrizar adequadamente a Regressão Binomial Negativa e fornecer critérios de verossimilhança como o Critério de Informação de Akaike (AIC), a análise foi migrada para o ambiente R (RStudio), garantindo a robustez necessária para a modelagem dos dados.

A etapa crucial para a modelagem estatística consistiu na seleção do método que melhor representasse o comportamento das partículas totais. Para tanto, realizou-se um teste de comparação entre os modelos de Poisson e Binomial Negativa, utilizando o AIC como métrica de desempenho. O AIC avalia a qualidade do ajuste do modelo, sendo que menores valores indicam uma maior capacidade de representação dos dados com o mínimo de perda de informação. Os resultados, consolidados na *Tabela 6*, revelam superioridade da Regressão Binomial Negativa em todas as faixas granulométricas. A magnitude da diferença observada (Δ AIC), que atingiu o ápice de 2.958,77 na classe de 200-400 µm, sugere que a alta variabilidade e a sobredispersão dos dados inviabilizam o uso de modelos lineares convencionais ou de Poisson, exigindo uma abordagem que considere o parâmetro de dispersão adicional para assegurar a validade das inferências estatísticas.

Tabela 6 - Comparação de ajuste de modelos de contagem para partículas totais via critério AIC

Classe Granulométrica	AIC (Poisson)	AIC (Binomial Negativa)	Δ AIC (Diferença)	Veredito Estatístico
G	3246,82	704,31	**2542,51**	Binomial Negativa
H	3657,12	698,35	**2958,77**	Binomial Negativa
I	617,55	432,16	**185,40**	Binomial Negativa
≥600	450,40	374,87	**75,53**	Binomial Negativa

4.5.2.2.1 Maiores ou iguais a 150µm e menores do que 200µm

Para identificar a influência de todos os preditores disponíveis na contagem de partículas metálicas e não metálicas para a faixa dimensional de 150-200 µm, foi ajustado um modelo binomial negativo saturado. Este modelo contemplou de forma abrangente as variáveis de máquina, ferramenta, processo e o fator humano. Devido à natureza dos dados de contagem e à necessidade de tratar a variabilidade e a superdispersão dos dados, desenvolveu-se um modelo de Regressão Binomial Negativa no programa R (RStudio), utilizando a função glm.nb do pacote MASS. Esta abordagem permitiu uma análise rigorosa da contribuição de cada fator para a contaminação final.

A avaliação da qualidade do ajuste, realizada através do diagnóstico de resíduos simulados do pacote DHARMa, demonstrou que o modelo é estatisticamente adequado para a análise. Como observado nos gráficos de resíduos da *Figura 5* de diagnóstico, o teste de Kolmogorov-Smirnov não apresentou desvios significativos, o que indica que a distribuição escolhida captura corretamente a forma dos dados. O teste de dispersão e o teste de valores atípicos ratificam a estabilidade do ajuste e a ausência de problemas significativos nas predições do modelo.

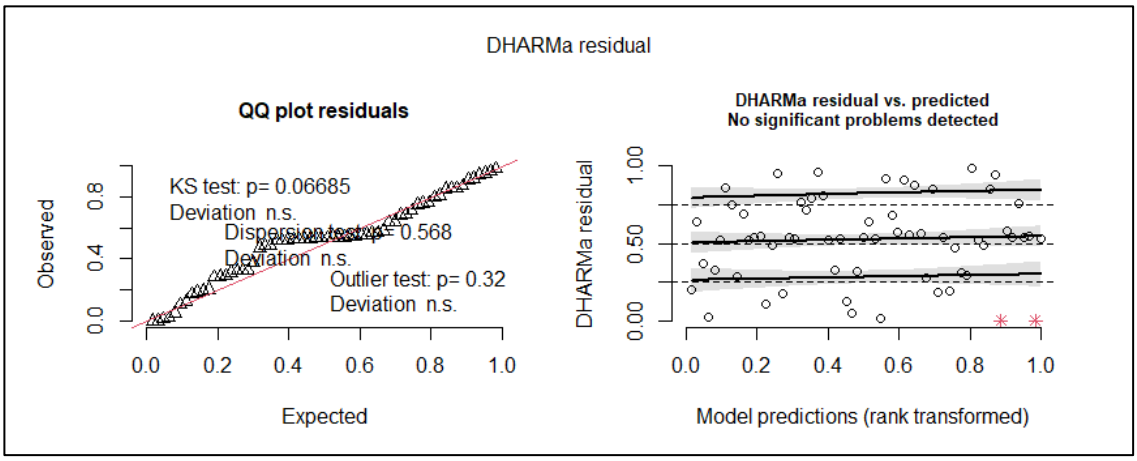


Figura 5 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm

Após a verificação dos resíduos, optou-se, portanto, pela manutenção do modelo com todas as variáveis, que garantiu resíduos simulados conformes e sem anomalias, assegurando que as inferências sejam fiáveis. Para extrair a importância real de cada fator, aplicou-se o Teste de Wald (Anova Tipo II), que avalia o impacto de cada grupo de variáveis na variabilidade da contaminação, que pode ser visto na *Tabela 7*.

Tabela 7 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 150 micrómetros e menores do que 200 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
CAVIDADE	6	76,5211	<0,001	Altamente significativo
OP_INJ	18	83,9266	<0,001	Altamente significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	34,3968	<0,001	Altamente significativo
MFI	2	12,4784	0,001951	Significativo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	8,0590	0,004528	Significativo
DIA_SEMANA_INSP	3	11,5398	0,009138	Significativo
OP_INSP	3	4,4710	0,214894	Controlo
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	1	1,8761	0,170779	Controlo
ESTADO_PEÇA	1	1,1057	0,293019	Controlo
LEAD_TIME	1	0,0592	0,807730	Controlo
MOLDE	-	-	-	Sobreposta (Singularidade)

Esta tabela informa que, para a classe de partículas analisada, o processo é governado por uma hierarquia clara de causas: Cavidade, Operador de Injeção e Dia de Lavagem são os fatores críticos de controlo imediato (p - valor inferior a 0,001). Variáveis como MFI, Contador de Produção e o Dia de Inspeção também exercem influência significativa, embora secundária. As restantes variáveis (como *Lead Time* e Estado da Peça), apesar de não apresentarem significância isolada, atuam como variáveis de controlo necessárias para o equilíbrio matemático do modelo, permitindo-nos concluir com elevada confiança quais os pontos do processo que devem ser alvo de ações corretivas. A variável Molde apresentou singularidade por colinearidade com a Cavidade e, por redundância, não será processada isoladamente nas análises seguintes.

4.5.2.2.2 Maiores ou iguais a 200µm e menores do que 400µm

Dando continuidade à investigação dos fatores determinantes da contaminação, procedeu-se à análise da faixa dimensional compreendida entre 200 e 400 µm. A mesma metodologia utilizada anteriormente manteve-se. A *Figura 6* apresenta o diagnóstico de resíduos gerado pelo pacote DHARMa indica que, de forma geral, o modelo apresenta ajuste global aceitável, embora com sinais pontuais de limitação estrutural. No QQ plot dos resíduos, observa-se boa concordância entre os quantis observados e esperados, corroborada pelo teste de Kolmogorov–Smirnov não significativo (p = 0,1208). Isto indica que os resíduos seguem a distribuição esperada sob o modelo, não havendo evidência de violação global das suposições. Adicionalmente, os testes de dispersão, desvio e valores atípicos não foram significativos, sugerindo ausência de sobredispersão relevante e de observações influentes. No entanto, no gráfico de resíduos DHARMa versus valores ajustados, verifica-se a presença de desvios de quantis, destacados pelas curvas vermelhas, com o teste combinado de quantis ajustados significativo. Este resultado indica que, apesar do bom comportamento médio dos resíduos, o modelo não captura completamente a estrutura dos dados ao longo de todo o intervalo de predição, sugerindo heterogeneidade residual dependente do nível da resposta.

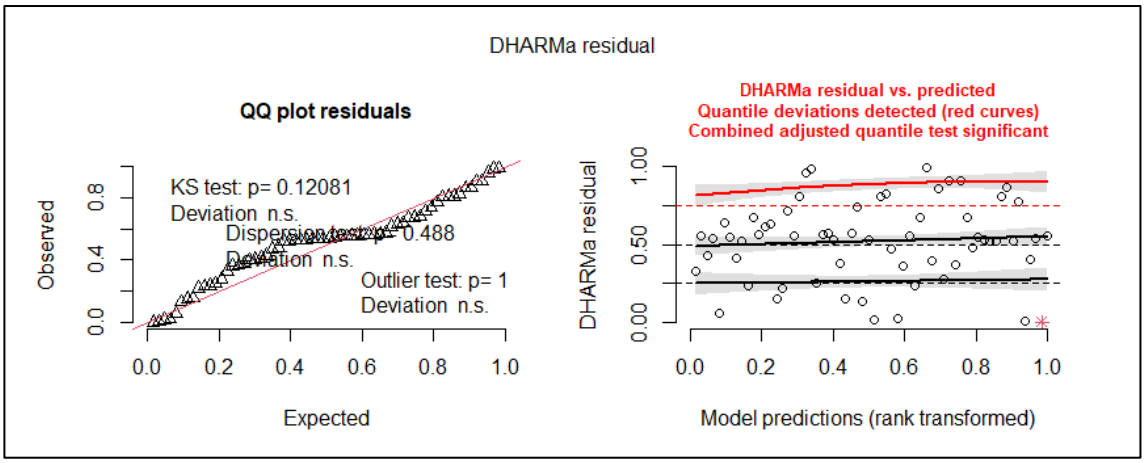


Figura 6 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 200 µm e menores do que 400 µm

Em síntese, a regressão pode ser considerada estatisticamente aceitável e válida para inferência exploratória e identificação de efeitos principais.

A avaliação da relevância dos preditores foi conduzida por meio do Teste de Wald (Anova Tipo II), cujos resultados estão sintetizados na *Tabela 8*. Os dados apresentados a seguir revelam não apenas a persistência de causas raízes identificadas em faixas menores, mas também a emergência de novos fatores críticos que ganham relevância estatística à medida que a granulometria das partículas aumenta.

Tabela 8 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 200 micrómetros e menores do que 400 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
MFI	2	16,1651	< 0,001	Altamente significativo
CAVIDADE	6	79,9514	< 0,001	Altamente significativo
OP_INJ	18	74,4844	< 0,001	Altamente significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	27,8676	< 0,001	Altamente significativo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	10,5370	0,0011	Muito significativo
DIA_SEMANA_INSP	3	11,8056	0,008	Significativo
INTERVALO_LAVAGEM	1	5,6088	0,0178	Significativo
OP_INSP	3	2,2351	0,525	Controlo
LEAD_TIME	1	0,2717	0,6022	Controlo
ESTADO_PEÇA	1	0,6187	0,4315	Controlo

A cavidade, o dia da semana da lavagem e o operador de injeção mantiveram-se como fatores com influência estatisticamente significativa para esta classe de partículas. O operador de inspeção, o *lead time* e o estado da peça permaneceram como variáveis de controlo no modelo, contribuindo para a explicação do fenômeno, porém com impacto marginal na incidência de partículas. A MFI apresentou maior influência neste grupo de partículas quando comparada ao grupo anteriormente analisado, assim como o intervalo entre inspeção e lavagem, o qual demonstrou maior significância estatística neste grupo. O dia da semana da inspeção também se manteve significativo, embora com efeito de menor magnitude.

4.5.2.2.3 *Maiores ou iguais a 400µm e menores do que 600µm*

A análise da classe de partículas compreendida entre 400 e 600 µm foi conduzida seguindo rigorosamente a mesma abordagem metodológica aplicada às classes granulométricas anteriormente estudadas. Foram utilizados modelos de regressão adequados a dados de contagem, com particular enfoque na Regressão Binomial Negativa, previamente validada como a distribuição mais apropriada para representar a variabilidade e a sobredispersão dos dados. A avaliação da qualidade do ajuste e a identificação dos fatores determinantes da contaminação basearam-se nos mesmos critérios estatísticos e procedimentos de diagnóstico, assegurando a consistência e a comparabilidade dos resultados ao longo das diferentes classes granulométricas analisadas.

Os diagnósticos de resíduos realizados com o pacote DHARMa, conforme *Figura 7*, indicam que o modelo de Regressão Binomial Negativa apresenta ajuste global adequado, com ausência de sobredispersão residual e de observações influentes. O teste de Kolmogorov–Smirnov não revelou desvios significativos da distribuição esperada dos resíduos. Contudo, a análise dos resíduos em função dos valores ajustados evidencia desvios pontuais nos quantis extremos, sugerindo limitações estruturais locais do modelo. Ainda assim, estas limitações não comprometem a validade inferencial do modelo, que se mostra adequado para a identificação de fatores críticos e para a análise exploratória do fenómeno em estudo.

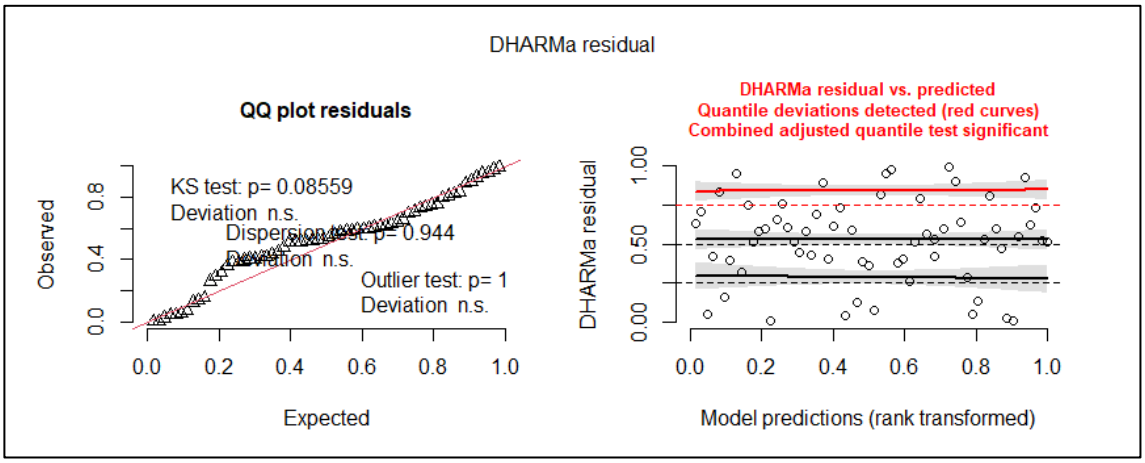


Figura 7 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 400 µm e menores do que 600 µm

Os resultados do Teste de Wald (Anova Tipo II) para a classe de partículas podem ser consultados na *Tabela 9*. Os resultados evidenciam que o operador de injeção é o fator com maior impacto estatístico sobre a contagem de partículas, apresentando significância extremamente elevada, o que indica forte dependência do fenómeno em relação à atuação humana no processo de injeção. De forma consistente, o dia da semana da lavagem também se revelou extremamente significativo, sugerindo variações sistemáticas associadas à organização temporal. A cavidade apresentou igualmente impacto extremamente significativo, indicando a influência estrutural do estado físico da ferramenta na geração de partículas nesta faixa granulométrica. O dia da semana da inspeção demonstrou influência estatisticamente significativa, indicando que o momento da inspeção afeta a deteção ou a incidência de partículas, embora com menor magnitude relativa. A MFI apresentou também significância estatística, evidenciando relação com a máquina utilizada e a incidência de partículas. O intervalo entre lavagem, o operador de inspeção, o contador de início de produção, o *lead time* e o estado da peça não demonstraram impacto estatisticamente relevante, sendo, no entanto, mantidos no modelo como variáveis de controlo, contribuindo para a estabilidade do ajuste e para a correta estimação dos efeitos dos fatores dominantes.

Tabela 9 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 400 micrómetros e menores do que 600 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
OP_INJ	18	61,9966	< 0,001	Altamente significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	23,8761	0,0002293	Altamente significativo
CAVIDADE	6	24,2813	0,0004635	Altamente significativo
DIA_SEMANA_INSP	3	9,9808	0,0187304	Significativo
MFI	2	7,6385	0,0219444	Significativo
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	1	3,4767	0,0622388	Controlo
OP_INSP	3	5,4716	0,1403496	Controlo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	2,0685	0,1503645	Controlo
LEAD_TIME	1	0,4397	0,5072756	Controlo
ESTADO_PEÇA	1	0,0336	0,8546607	Controlo

Para uma variável, ser considerada variável de controlo, sem significância estatística, não implica necessariamente que o fator não tenha qualquer efeito no processo, mas sim que, à luz dos dados disponíveis e do modelo ajustado, não foi possível demonstrar uma influência estatisticamente relevante.

4.5.2.2.4 Maiores ou iguais a 600µm

Os diagnósticos de resíduos simulados para as faixas de partículas maiores apresentaram conformidade no teste de Kolmogorov-Smirnov, indicando a adequação da distribuição Binomial Negativa, conforme *Figura 8*. Embora o teste de dispersão tenha indicado desvios significativos nesta faixa, fenômeno esperado devido à maior frequência de contagens nulas nestes grupos, a ausência de valores atípicos e a estabilidade das predições centrais validam o uso do modelo para a identificação dos fatores críticos.

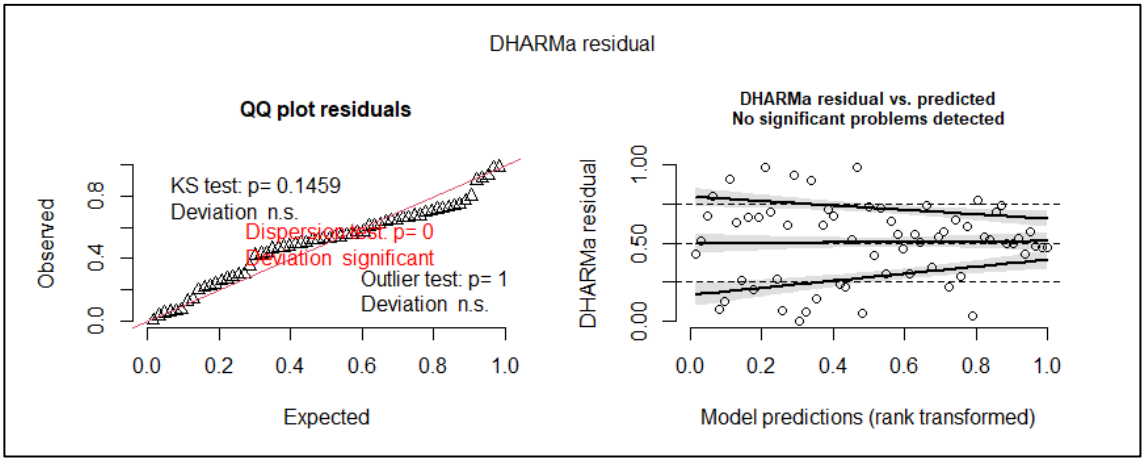


Figura 8 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas totais maiores ou iguais a 600 µm

A análise estatística revela uma mudança importante na dinâmica do processo em comparação aos intervalos menores. Conforme detalhado na *Tabela 10*, o operador de injeção assume o papel de principal fator crítico. Em sequência, a cavidade reafirma sua relevância no processo, indicando que a ocorrência de partículas de grande porte está estritamente vinculada ao manuseio operacional e às condições específicas da ferramenta.

Tabela 10 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas e não metálicas maiores ou iguais a 600 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
OP_INJ	18	43,1672	0,0007578	Altamente significativo
CAVIDADE	6	19,8832	0,0029051	Muito significativo
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	1	5,868	0,0154183	Significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	12,072	0,0338149	Significativo
ESTADO_PEÇA	1	4,2014	0,0403901	Significativo
OP_INSP	3	6,2335	0,1007844	Controlo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	1,1447	0,2846618	Controlo
MFI	2	2,2429	0,3258105	Controlo
DIA_SEMANA_INSP	3	3,0056	0,3907672	Controlo
LEAD_TIME	1	0,4659	0,4948786	Controlo

De acordo com os dados da *Tabela 10*, observa-se a emergência de variáveis que anteriormente atuavam apenas como controlo e a perda de significância estatística da variável MFI. O estado da peça tornou-se estatisticamente significativo, sugerindo que defeitos visuais no produto estão agora correlacionados com a presença de resíduos metálicos maiores. Adicionalmente, o dia da lavagem e o intervalo entre este processo e a inspeção mantêm influência sobre o resultado final.

4.5.2.2.5 Interpretação dos Fatores Significativos e Relações com o Processo Produtivo

A *Figura 9* sintetiza, por meio de um mapa de calor, o padrão de significância estatística dos fatores de processo associados à contaminação por partículas metálicas ao longo das diferentes faixas granulométricas analisadas. A intensidade da coloração representa a magnitude do teste de Wald (Qui-quadrado), utilizada como métrica para expressar o quanto cada variável contribui para explicar a variabilidade da resposta dentro de cada classe granulométrica.

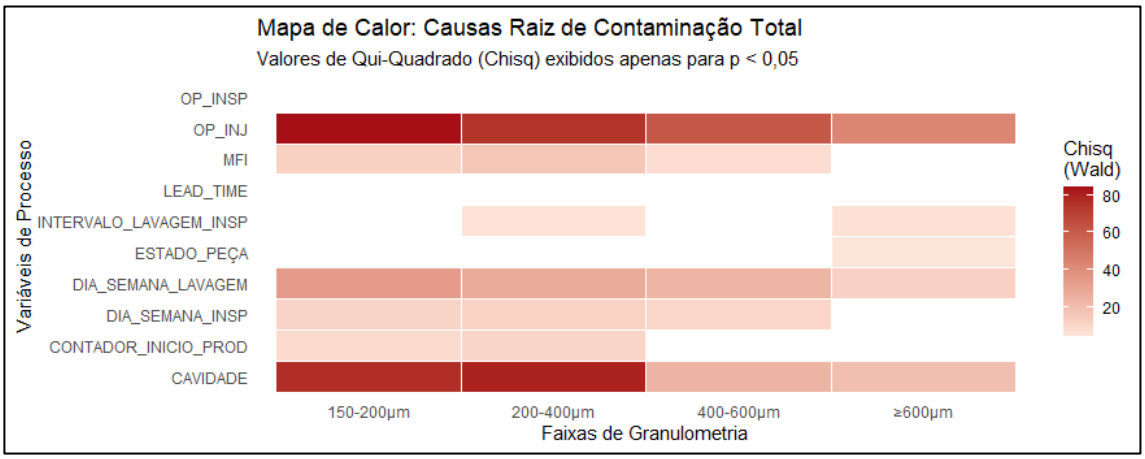


Figura 9 - Mapa de calor dos valores de qui-quadrado (teste de Wald) por faixa granulométrica para partículas metálicas e não metálicas

Após as análises de regressão terem indicado quais são as variáveis com maior significância em cada intervalo de partículas analisado, o passo seguinte é entender para qual direção estas variáveis afetam a contagem de partículas. Para isso, procedeu-se à análise gráfica do efeito das variáveis de acordo com sua significância em cada faixa, com base no mapa de calor da *Figura 9*.

A *Figura 10* apresenta a média da contagem de partículas por cavidade, acompanhada do desvio padrão superior, estratificada por classe granulométrica. As linhas verticais tracejadas em vermelho indicam os limites máximos admissíveis de partículas para cada faixa de tamanho. Cada painel sintetiza o desempenho médio individual das cavidades, permitindo a comparação direta entre os diferentes moldes e os critérios de aceitação estabelecidos para a contaminação particulada.

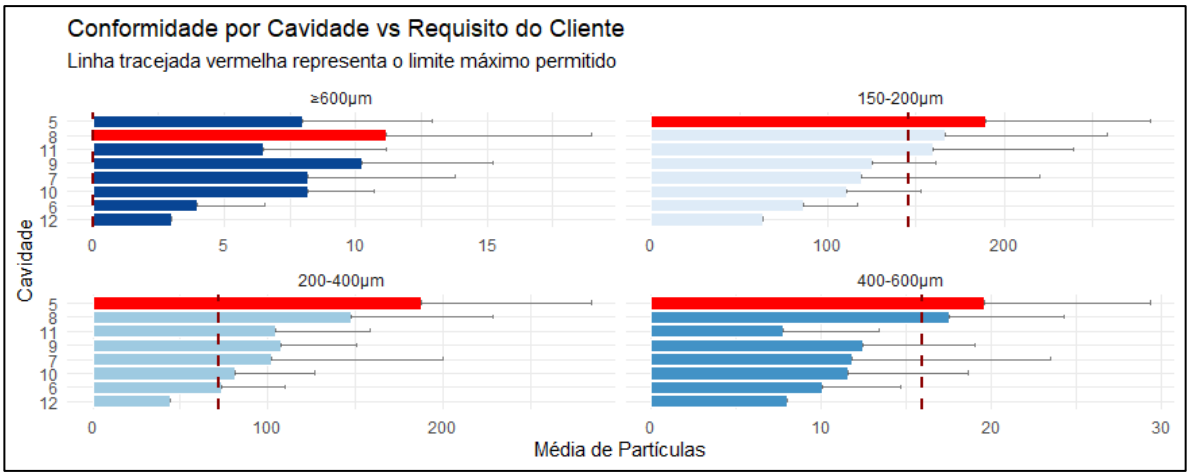


Figura 10 - Contagem média de partículas metálicas e não metálicas por cavidade e classe granulométrica face aos critérios de aceitação

De forma geral, observa-se elevada dispersão na contagem de partículas entre as diferentes cavidades analisadas, evidenciando a variabilidade intrínseca do processo. Considerando que a numeração do molde é crescente com a sua idade (moldes com numeração mais elevada são mais novos) e que cada molde possui duas cavidades, verifica-se que a cavidade 12, pertencente ao molde mais recente e correspondente também à cavidade 11, apresenta menor média de contagem de partículas e menor variabilidade. Essa cavidade permanece dentro dos limites especificados em todas as classes granulométricas, com exceção da classe mais restritiva, que não admite partículas superiores a 600 µm.

As maiores contagens médias de partículas foram observadas na cavidade 5, para partículas entre 150 e 600 µm, e na cavidade 8, para partículas superiores a 600 µm. Ambas pertencem aos 2 moldes mais antigos avaliados, sugerindo uma possível associação entre desgaste do molde e aumento da geração de partículas, especialmente nas faixas granulométricas mais críticas.

A análise gráfica em conjunto com as linhas tracejadas de especificação confirma os resultados previamente obtidos na análise por quartis da *Tabela 4*. Observa-se que menos de 25% das amostras atendem ao requisito de nulidade para partículas superiores a 600 µm, o que é visualmente corroborado pelo facto de que nenhuma cavidade se aproxima de forma consistente desse limite, evidenciando que se trata de um critério particularmente exigente para a realidade atual do processo.

Para as faixas entre 150–200 µm e 400–600 µm, a estatística descritiva indicava que entre 50% e 75% das amostras atendiam às especificações, resultado que se reflete no gráfico, onde um número maior de cavidades apresenta médias abaixo dos limites máximos permitidos. Em contrapartida, a faixa entre 200–400 µm destaca-

se como a segunda mais crítica, atrás apenas das partículas maiores que 600 µm, concentrando um número elevado de cavidades acima da especificação, comportamento igualmente evidenciado na análise descritiva.

Outro aspecto relevante é a assimetria de comportamento entre cavidades de um mesmo molde A cavidade 11, apesar de pertencer ao mesmo molde da cavidade 12, não reproduz o mesmo comportamento, apresentando média e desvio padrão abaixo do limite apenas na faixa entre 400 e 600 µm. Esse contraste reforça a evidência de que cavidades de um mesmo molde podem responder de forma distinta às condições de processo. Tendência semelhante, ainda que menos pronunciada, é observada em outros moldes, sugerindo que o fator "cavidade" exerce influência mais determinante do que o fator "molde" isoladamente.

Esse resultado aponta para a existência de mecanismos localizados, capazes de afetar apenas uma cavidade, tais como diferenças no ajuste da operação de corte, desgaste ou posicionamento assimétrico da ferramenta de corte, ou ainda ineficiências no fechamento do molde que favoreçam a formação localizada de rebarbas, entre outros, conforme indicação da *Figura 11*, com um diagrama de Ishikawa para possíveis causas. Tais fatores devem ser investigados de forma aprofundada, dado seu potencial impacto direto na geração de partículas metálicas.

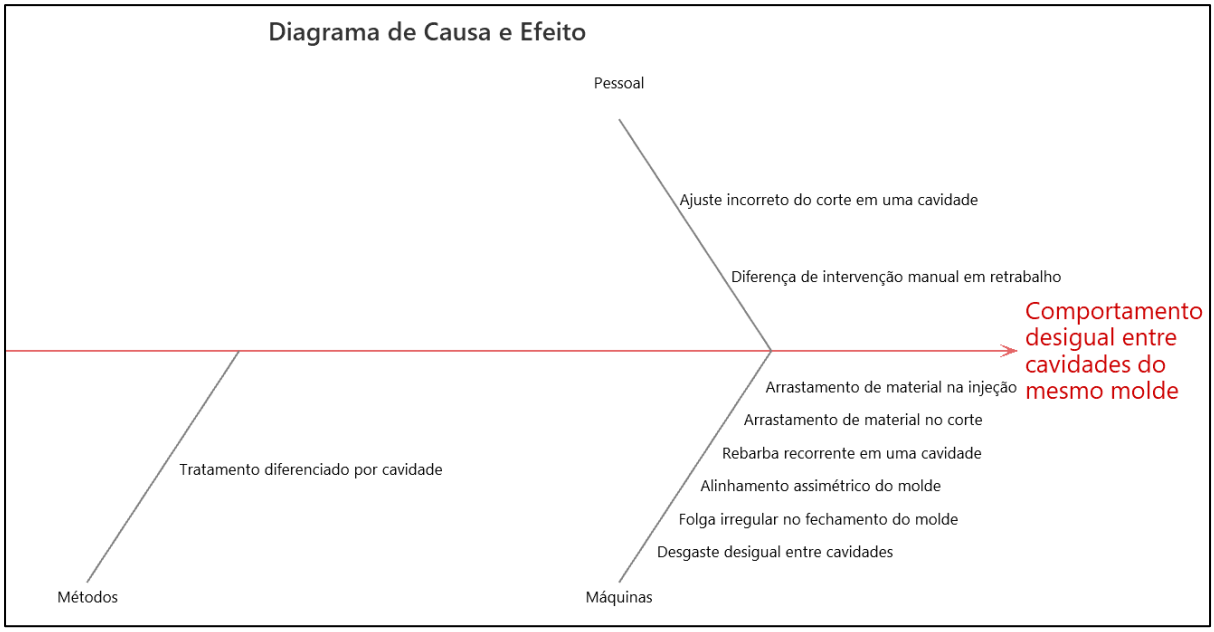


Figura 11 - Diagrama de causa e efeito das fontes de variabilidade na contagem de partículas metálicas e não metálicas entre cavidades

A *Figura 12* evidencia uma tendência não linear na contagem de partículas metálicas ao longo do ciclo de produção, tanto para a classe granulométrica de 150–200 µm quanto para 200–400 µm, conforme indicado pelas curvas suavizadas *Locally estimated weighted scatterplot smoothing* (LOESS). Em ambos os casos, observa-se um padrão oscilatório, caracterizado por fases de aumento progressivo na contagem de partículas seguidas por reduções parciais.

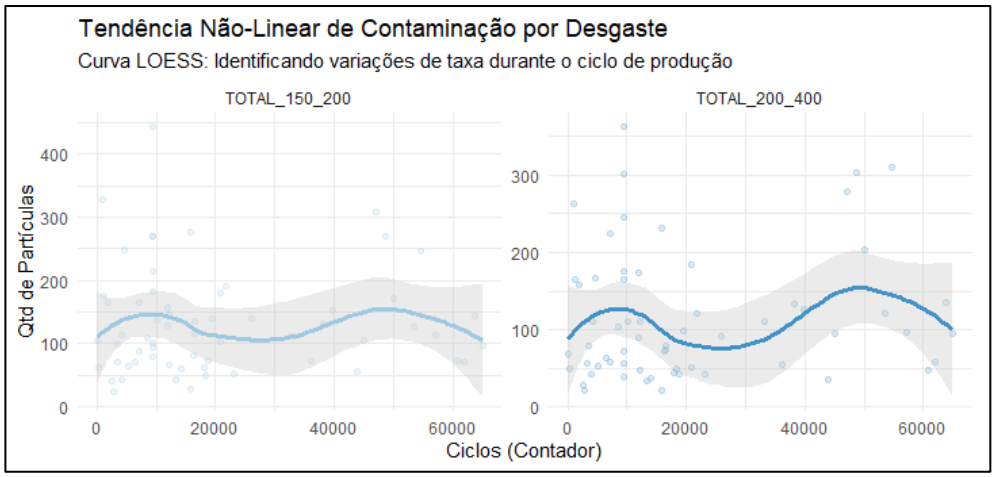


Figura 12 - Tendência não linear da contagem de partículas metálicas e não metálicas ao longo do ciclo de produção

Esse comportamento é consistente com um processo de desgaste acumulativo do molde, no qual a geração de partículas metálicas tende a aumentar à medida que os ciclos avançam, refletindo abrasão local, formação de rebarba e desprendimentos metálicos. As quedas periódicas na curva sugerem a ocorrência de ações de manutenção preventiva, capazes de mitigar temporariamente os efeitos do desgaste, reduzindo a taxa de geração de partículas.

A amplitude das oscilações demonstra evidência de que as manutenções em máquina promovem apenas uma redução parcial da contaminação, sem restabelecer integralmente as condições iniciais do processo. Por outro lado, a redução mais acentuada observada após determinados picos pode estar associada a manutenções corretivas mais profundas.

A definição de janelas ótimas de manutenção pode ser aprimorada com base nos pontos de inflexão da curva LOESS, antecipando intervenções antes do atingimento de níveis críticos de partículas, e fatores sugestivos como possíveis causas, conforme indicado na *Figura 13,* devem ser investigados.

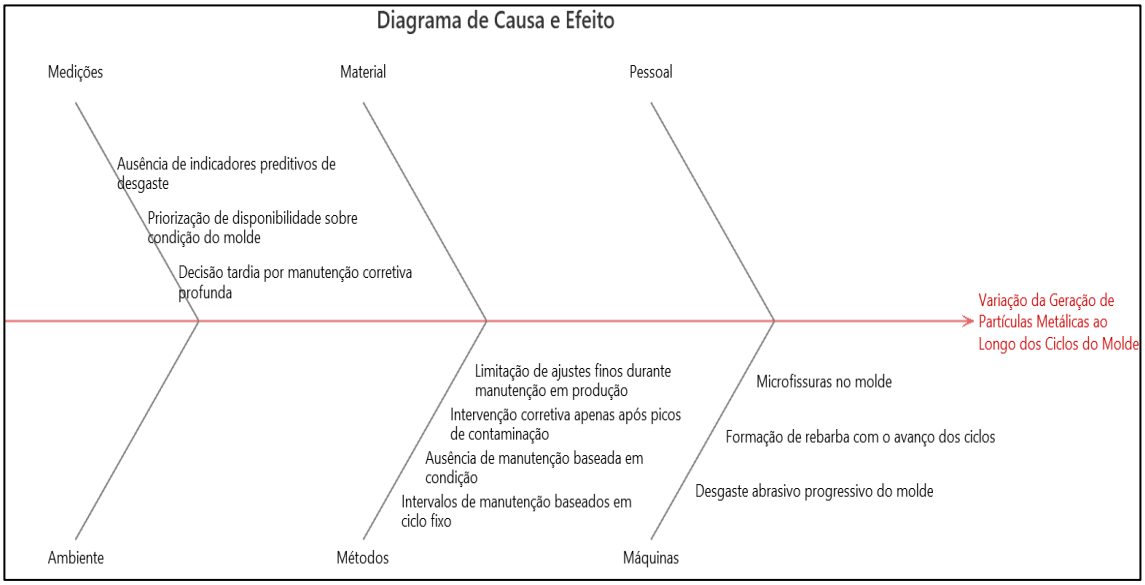


Figura 13 - Diagrama de causa e efeito da variação não linear da contagem de partículas ao longo dos ciclos do molde

A *Figura 14* apresenta a média da contagem de partículas, estratificada por dia da inspeção e por classe granulométrica, com as hastes representando o desvio padrão associado a cada estimativa. O gráfico permite

avaliar, de forma comparativa, o comportamento temporal da contaminação ao longo da semana, evidenciando não apenas diferenças nas médias, mas também a variabilidade do processo em cada faixa de tamanho de partícula.

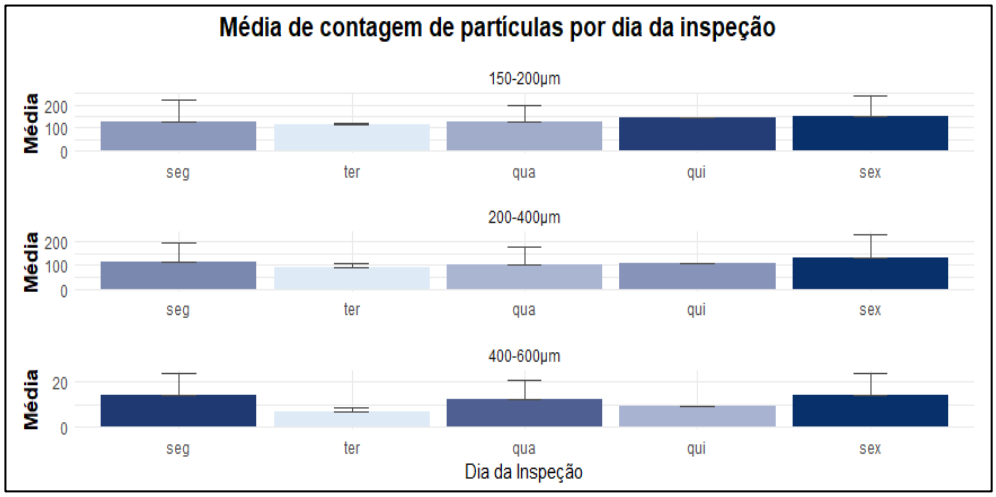


Figura 14 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da inspeção e classe granulométrica

Inicialmente, os dados brutos sugeriam uma oscilação acentuada, com uma aparente queda de contaminação às terças-feiras e picos às sextas-feiras.

Contudo, uma análise de densidade amostral revelou que tais variações estavam fortemente correlacionadas à escassez de dados nesses dias específicos (n=2 para terça-feira e n=1 para quinta-feira), o que inviabilizava a representatividade estatística dessas médias. Após a remoção destes dias com baixo número de ocorrências, é possível observar que, de facto, há sim uma tendência de diminuição de partículas do início da semana para o meio da semana e um aumento do meio da semana para o fim da semana de trabalho, culminando nas médias mais altas em todos os limites analisados na sexta-feira, como pode ser visto na *Figura 15.*

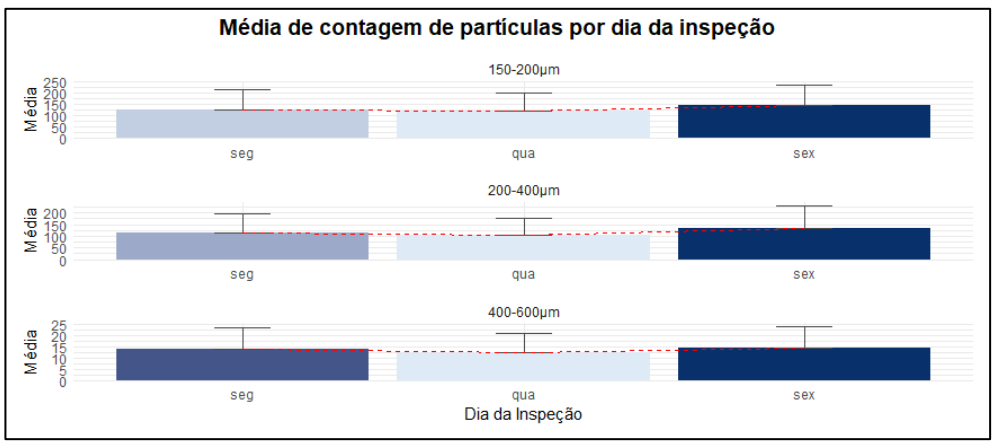


Figura 15 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da inspeção e classe granulométrica após ajuste de representatividade amostral

Apesar da tendência visual, estas diferenças podem não ser estatisticamente significativas, sendo necessário realizar o teste de Tukey, que foi performado considerando todas as amostras, inclusive os dias de terça-feira e quinta-feira, conforme *Figura 16.*

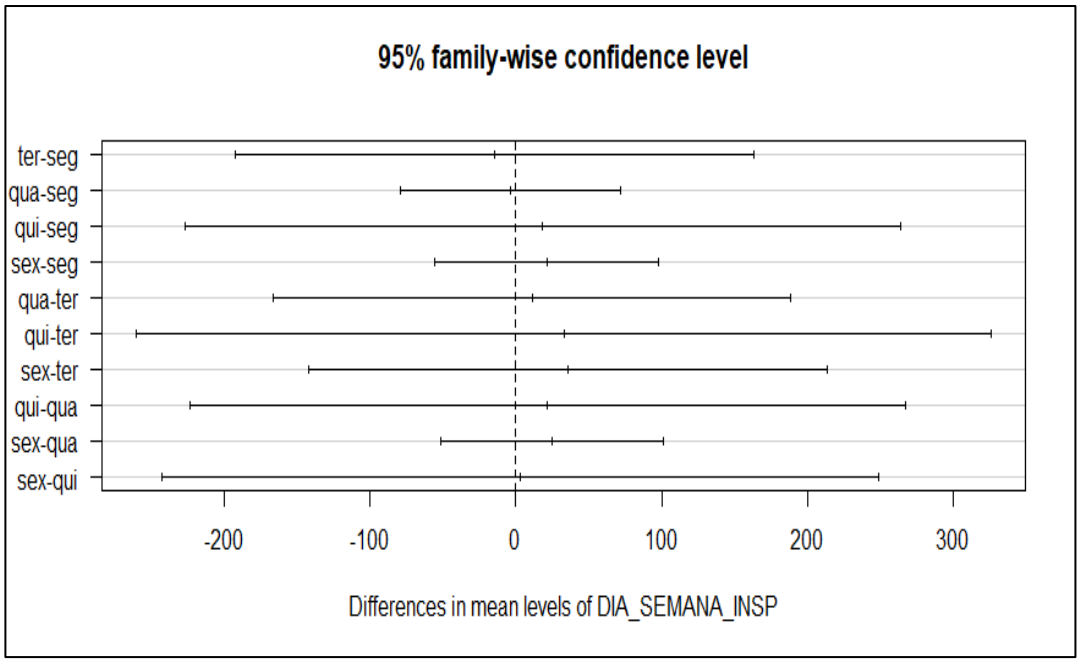


Figura 16 - Comparações múltiplas entre dias da semana pelo teste de Tukey

Cada linha horizontal corresponde à diferença estimada entre um par de dias da semana, sendo o ponto central a estimativa da diferença média e o segmento o respetivo intervalo de confiança a 95%, ajustado para o erro do tipo I familiar. A linha vertical tracejada em zero representa a hipótese nula de ausência de diferença entre as médias.

Observa-se que todos os intervalos de confiança intercetam o zero, indicando que, ao nível de 5% e após correção para múltiplas comparações, não há evidência estatisticamente significativa de diferenças nas médias de contagem de partículas entre quaisquer pares de dias de inspeção. Apesar disso, nota-se uma tendência sistemática em algumas comparações envolvendo a sexta-feira, cujas estimativas pontuais são, em geral, positivas quando comparadas a outros dias, sugerindo médias mais elevadas. No entanto, a elevada amplitude dos intervalos reflete variabilidade considerável e limita o poder para discriminar diferenças estatisticamente robustas.

Sabe-se que os modelos de regressão aplicados anteriormente apresentam maior robustez analítica para os dados de contagem em estudo do que o teste de comparações múltiplas de Tukey, razão pela qual este último foi utilizado com carácter exploratório. A análise conjunta e crítica de ambos os resultados converge para a interpretação de que o efeito associado à variável em questão fraco, mas emerge como um fator contextual relevante que merece monitorização. Além disso, o efeito pode não significativo par a par, mas ainda assim relevante como sinal operacional.

Diante disso, apresenta-se a seguir um diagrama de Ishikawa, no qual são elencados os principais fatores potenciais que podem contribuir para a variação observada na contagem de partículas, conforme ilustrado na *Figura 17.*

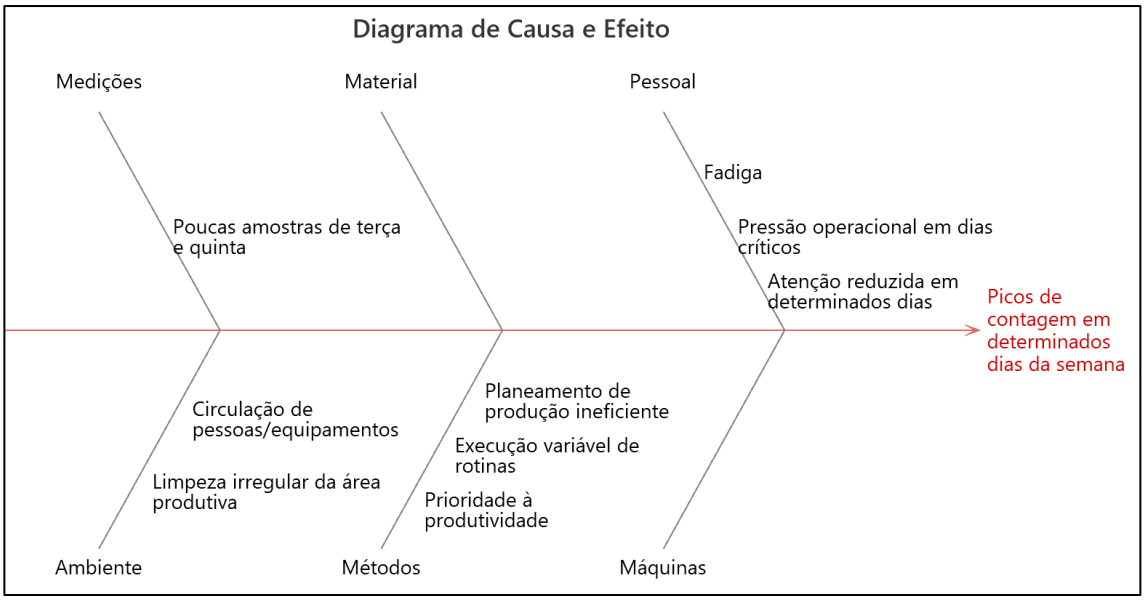


Figura 17 - Diagrama de causa e efeito dos picos de contagem de partículas metálicas e não metálicas em dias específicos da semana

A *Figura 18* apresenta a distribuição da contagem de partículas por dia da semana de lavagem, estratificada pelas diferentes classes granulométricas analisadas. O gráfico utiliza diagramas de caixa para representar a mediana, os quartis e a dispersão dos dados, sendo os pontos destacados m vermelho indicativos de observações extremas. Esta abordagem permite uma avaliação exploratória da variabilidade e do comportamento central da contagem de partículas em função do dia da lavagem.

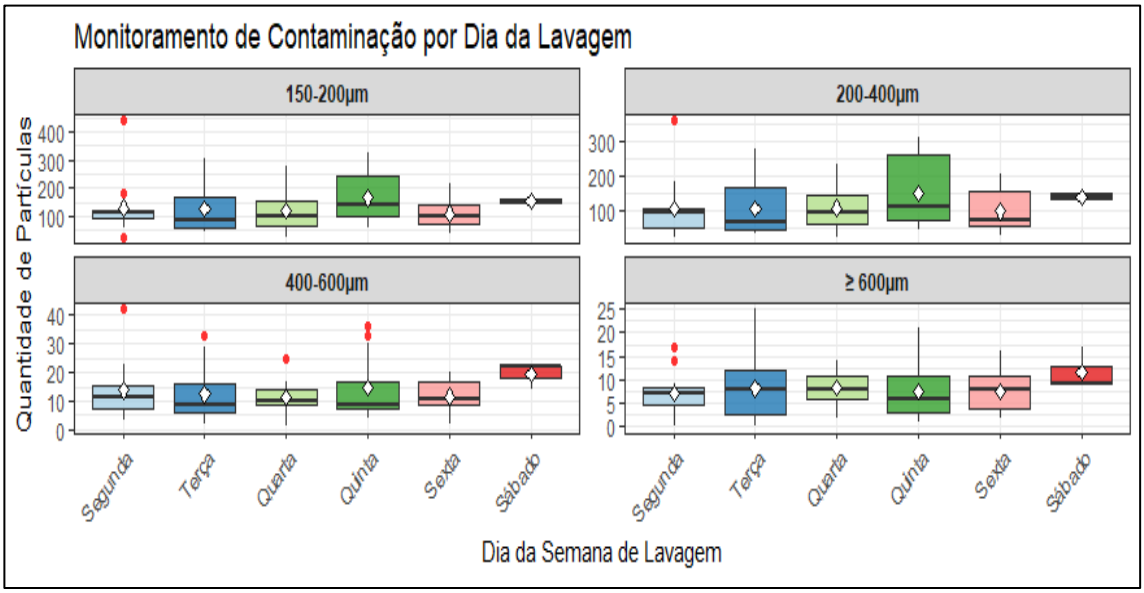


Figura 18 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da lavagem e classe granulométrica

A análise do gráfico revela que a contagem de partículas apresenta padrões de variação ao longo da semana que se repetem de forma consistente nas diferentes classes granulométricas. As classes de 150–200 µm e 200-400 µm apresentam comportamento semelhante entre si, com redução da média de partículas de quinta-feira para sexta-feira e posterior aumento até o sábado. As classes de 400–600 µm e ≥ 600 µm também apresentam similaridade entre si, diferindo das classes anteriormente citadas num ponto específico: De quinta-feira para sexta-

feira, observa-se aumento da média de partículas e consecutivo aumento no sábado. Para além dessas diferenças pontuais, observa-se um padrão geral de comportamento semelhante entre todas as classes analisadas.

Do ponto de vista produtivo, estes resultados indicam que o dia da lavagem não atua como um fator causal isolado, mas reflete condições operacionais dinâmicas do processo, tais como acúmulo de resíduos ao longo da semana, estabilidade dos procedimentos de limpeza e carga operacional. Observa-se que o sábado apresenta, em todas as classes granulométricas, níveis médios de contagem de partículas superiores aos observados durante os dias úteis. Este comportamento sugere a possibilidade de condições operacionais diferenciadas neste dia, as quais podem incluir alterações nos turnos, nas rotinas de lavagem ou na dinâmica de supervisão.

No entanto, tais interpretações devem ser tratadas como hipóteses operacionais, uma vez que o desenho dos dados não permite isolar ou confirmar o efeito específico de fatores organizacionais ou humanos associados ao trabalho ao sábado. Assim, o gráfico fornece subsídios importantes para a identificação de janelas temporais mais suscetíveis à variabilidade, e salienta a necessidade de um estudo de causas mais aprofundado, explicando possíveis causas como as descritas na *Figura 19* no diagrama de causa e efeito.

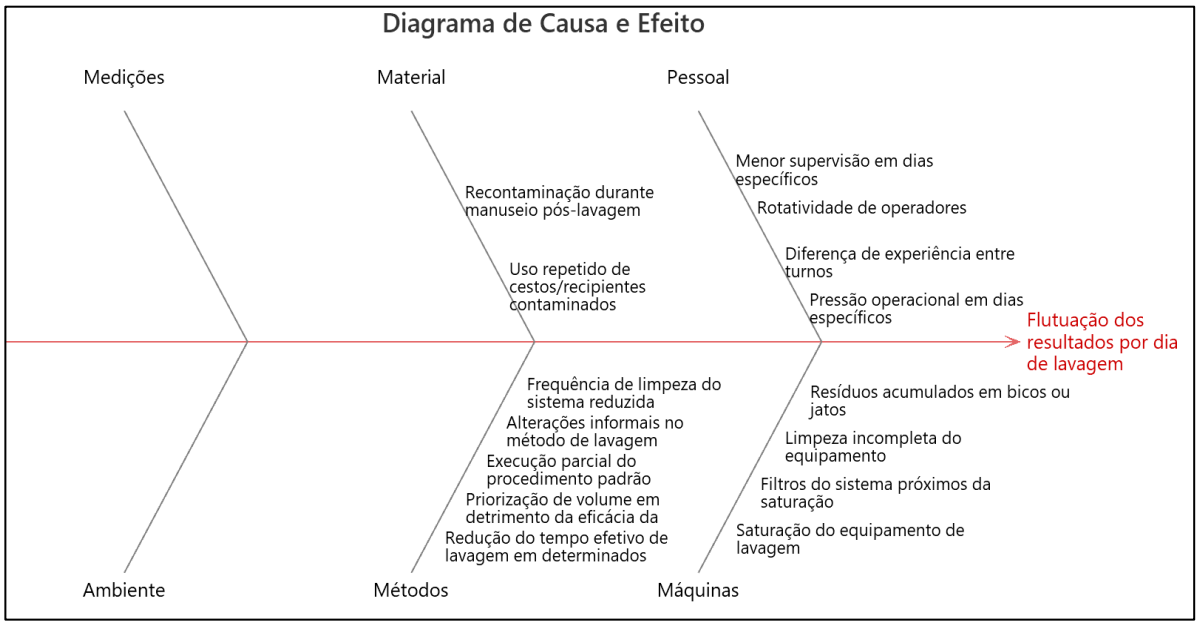


Figura 19 - Diagrama de causa e efeito da flutuação de contagem de partículas metálicas e não metálicas em dias específicos de lavagem na semana

O *Gráfico 6* apresenta a distribuição da contagem de partículas ≥ 600 µm em função do estado visual da peça, comparando amostras classificadas com defeitos visuais e sem defeitos visuais. O gráfico de caixas evidencia a mediana, a dispersão interquartílica e a presença de valores extremos, permitindo uma avaliação simultânea do nível médio de contaminação e da variabilidade associada a cada condição.

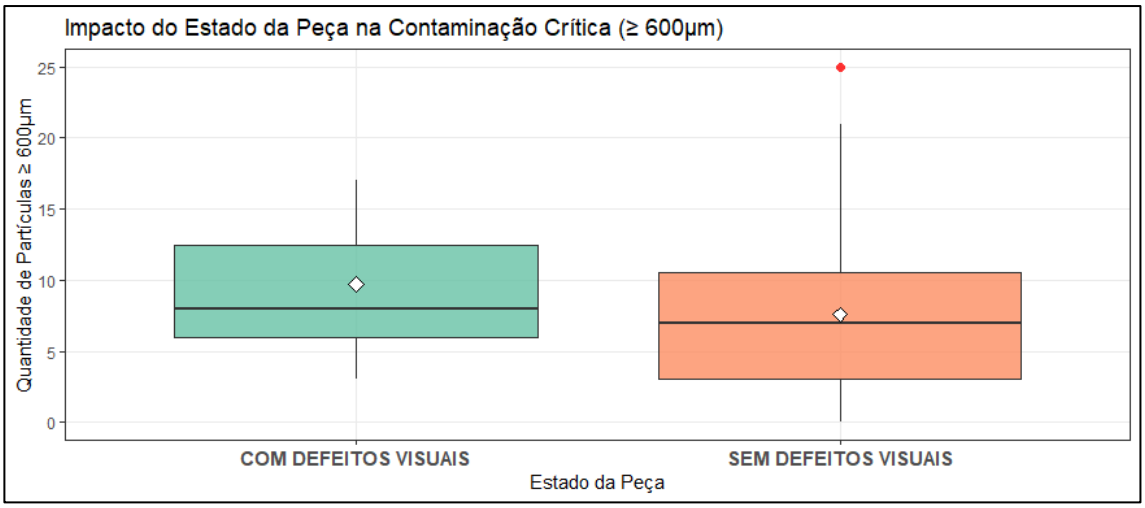


Gráfico 6 – Análise do impacto do estado da peça na contaminação por partículas metálicas e não metálicas

Observa-se que peças com defeitos visuais tendem a apresentar mediana ligeiramente superior e menor dispersão relativa, enquanto as peças sem defeitos visuais exibem maior variabilidade e ocorrência de valores extremos elevados, apesar de uma mediana inferior.

Embora o diagrama de caixa apresente sobreposição entre as distribuições de contagem de partículas para peças com e sem defeitos visuais, essa representação deve ser interpretada com cautela, uma vez que o número de observações associadas a peças com defeitos visuais é substancialmente inferior ao de peças visualmente conformes. Essa assimetria amostral reduz o poder discriminatório da análise gráfica e amplifica a influência de valores extremos, dificultando a identificação visual de diferenças sistemáticas entre os grupos. Em contraste, a Regressão Binomial Negativa, ao modelar a contagem de partículas sob uma estrutura probabilística adequada à sobredispersão e ao controlar simultaneamente os demais fatores de processo, indicou que a variável exerce efeito estatisticamente significativo sobre a ocorrência de partículas críticas. Esse resultado sugere que defeitos visuais não atuam apenas como manifestações estéticas isoladas, mas refletem condições locais de instabilidade do processo que aumentam a propensão à geração de partículas desta dimensão.

As peças classificadas como “com defeitos visuais” correspondem a componentes que apresentavam não conformidades que, a priori, não eram consideradas relevantes para a contagem de partículas, uma vez que se tratava predominantemente de defeitos de natureza estética ou dimensional, incluindo ocorrências como mau enchimento, rugosidade acima da especificação em áreas maquinadas e pinos empenados.

Até o momento da análise, apenas defeitos como a presença de rebarbas passíveis de desprendimento e a ocorrência de sujidade visível eram reconhecidos como não conformidades simultaneamente associadas à reprovação visual da peça e ao seu potencial risco de geração de partículas.

Nesse contexto, apresenta-se na *Figura 20* um diagrama de Ishikawa, no qual são sistematizadas as principais causas potenciais associadas ao aparecimento de partículas metálicas superiores a 600 µm em peças com defeitos visuais.

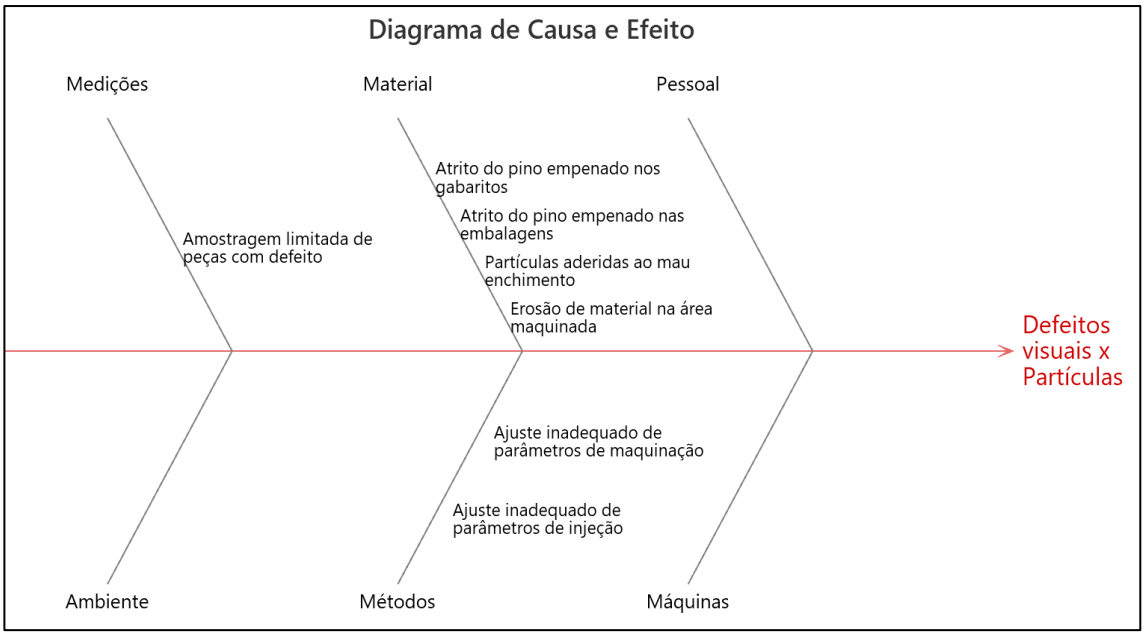


Figura 20 - Diagrama de causa e efeito das causas potenciais de partículas metálicas associadas a defeitos visuais

A figura 21 demonstra o efeito do intervalo entre a lavagem e a inspeção na contagem de partículas e apresenta a relação entre o tempo de espera (em dias) e a contagem de partículas. A linha de tendência vermelha demonstra que, para as duas classes analisadas, à medida que o intervalo entre a lavagem e a inspeção final aumenta, ocorre uma redução gradual e consistente no volume de contaminantes detetados. Os pontos representam as medições reais, e a área sombreada em cinza indica o intervalo de confiança da estimativa.

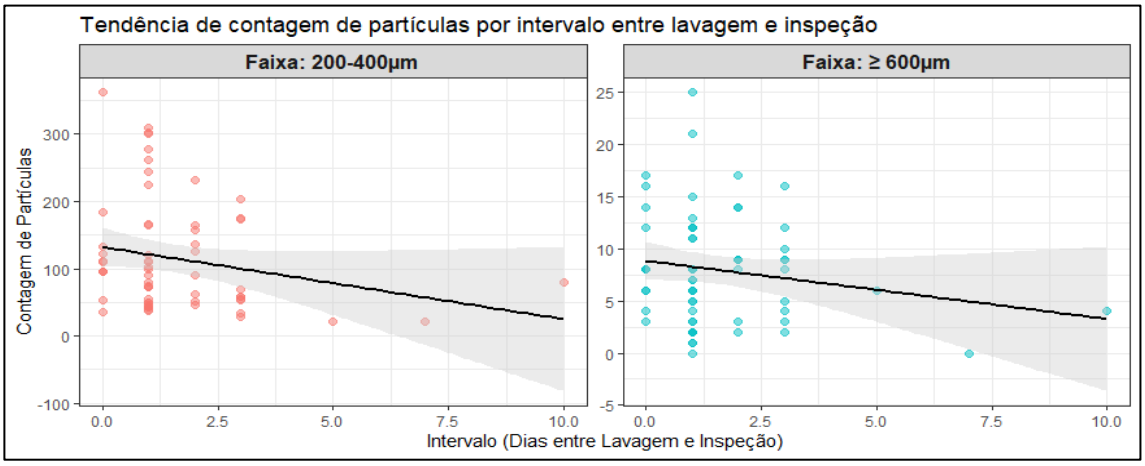


Figura 21 - Efeito do Intervalo entre a lavagem e a inspeção na contagem de partículas metálicas e não metálicas

Na ausência de um *Value Stream Map* (VSM) que permita identificar e avaliar, de forma estruturada, quais os tempos observados entre as etapas de lavagem e inspeção estão em conformidade com um planeamento previamente definido. Não existe, portanto, um tempo de referência formalmente estabelecido pela produção para o intervalo entre essas operações.

Nesse contexto, não é possível determinar se as peças que apresentaram maiores intervalos entre lavagem e inspeção percorreram trajetos não previstos no fluxo produtivo ou se foram foram processadas num ritmo consistentemente estruturado e equilibrado de produção. De igual forma, não se pode assegurar que as peças com intervalos mais curtos correspondam necessariamente a um processamento mais eficiente e assertivo, uma vez

que esses tempos reduzidos também podem estar associados à omissão de etapas, à priorização operacional sob condições de pressão produtiva que podem gerar manuseios inadequados, potencialmente geradores de impactos acidentais, contaminação ou desprendimento de partículas.

Assim, a ausência de um mapeamento formal do fluxo limita a interpretação causal dos resultados observados, reforçando a necessidade de cautela na atribuição de efeitos exclusivamente ao fator temporal e destacando a importância de uma análise integrada do processo

Para isso, definiu-se na *Figura 22* um diagrama de causa e efeito para possíveis causas deste comportamento.

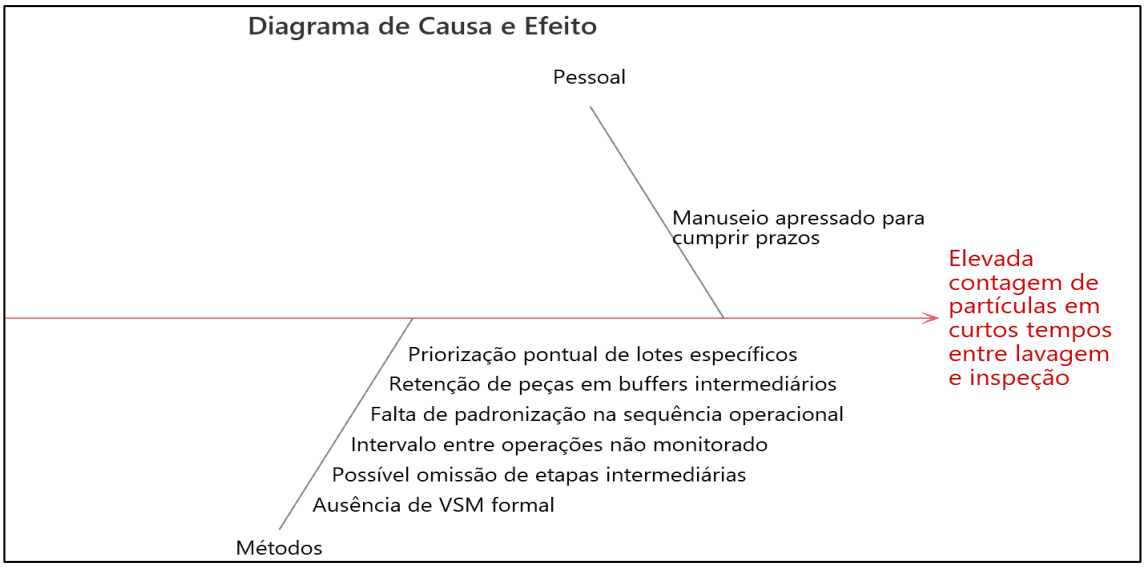


Figura 22 - Diagrama de causa e efeito das causas potenciais de partículas metálicas associadas a defeitos visuais

A *Figura 23* compara a contagem de partículas por MFI, estratificada por classe granulométrica, permitindo avaliar o impacto do equipamento na geração de contaminação ao longo das diferentes faixas analisadas.

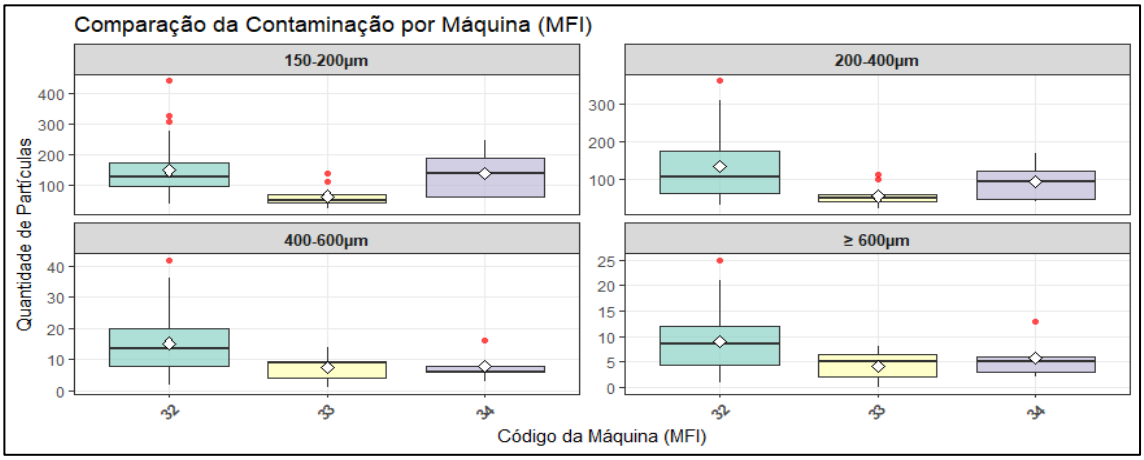


Figura 23 - Efeito da MFI na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas

Observa-se, de forma consistente, que a MFI 32 apresenta as maiores medianas em todas as classes granulométricas, bem como maior dispersão dos dados, evidenciada pelos intervalos interquartílicos mais amplos e pela presença de valores extremos. Este comportamento sugere maior variabilidade do processo associada a esta máquina, possivelmente relacionada a condições de desgaste, ajustes operacionais, estabilidade do processo ou histórico de manutenção.

A MFI 33, demonstra ser o processo mais estável e limpo. As caixas são extremamente achatadas, indicando baixa variabilidade, e os níveis de partículas são os menores do conjunto. A MFI 34 ocupa uma posição intermediária. Embora apresente menor contagem de partículas que a MFI 32, ela possui uma variabilidade interna considerável nas partículas da classe 150-200µm.

Do ponto de vista industrial, estes resultados indicam que a máquina de injeção constitui um fator relevante na variabilidade da contaminação por partículas, justificando uma análise direcionada das condições específicas da MFI 32, incluindo parâmetros de processo, estado mecânico, alinhamentos, sistemas de fechamento e práticas de manutenção. Adicionalmente, o desempenho mais consistente da MFI 33 pode servir como referência interna de boas práticas operacionais.

Estes resultados convergem com as evidências encontradas durante a auditoria na MFI 32 na qual constatou-se a presença de sinais evidentes de desgaste, vazamentos e condições de limpeza e conservação não aconselhadas para peças com requisito de limpeza. De maneira geral, os fatores abordados na auditoria e as possíveis causas apresentadas na *Figura 24* do diagrama de causa e efeito devem ser analisadas.

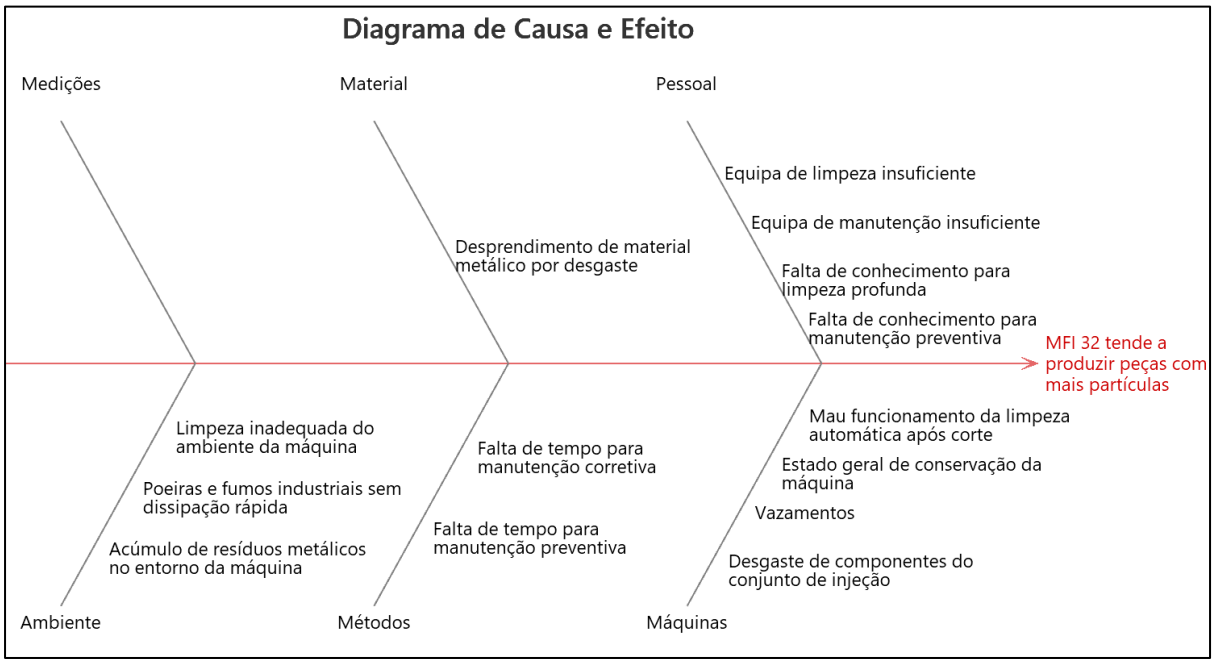


Figura 24 - Diagrama de causa e efeito das causas potenciais relacionadas à elevada incidência de partículas metálicas e não metálicas nas amostras produzidas na MFI 32

Com o objetivo de avaliar a possível influência do operador de inspeção na contagem de partículas, foram elaboradas representações gráficas complementares que permitem uma análise progressiva, partindo de uma abordagem descritiva univariada até uma visão integrada do processo produtivo.

A *Figura 25* apresenta a comparação da contagem de partículas por operador de inspeção , segmentada pelas diferentes classes granulométricas analisadas.

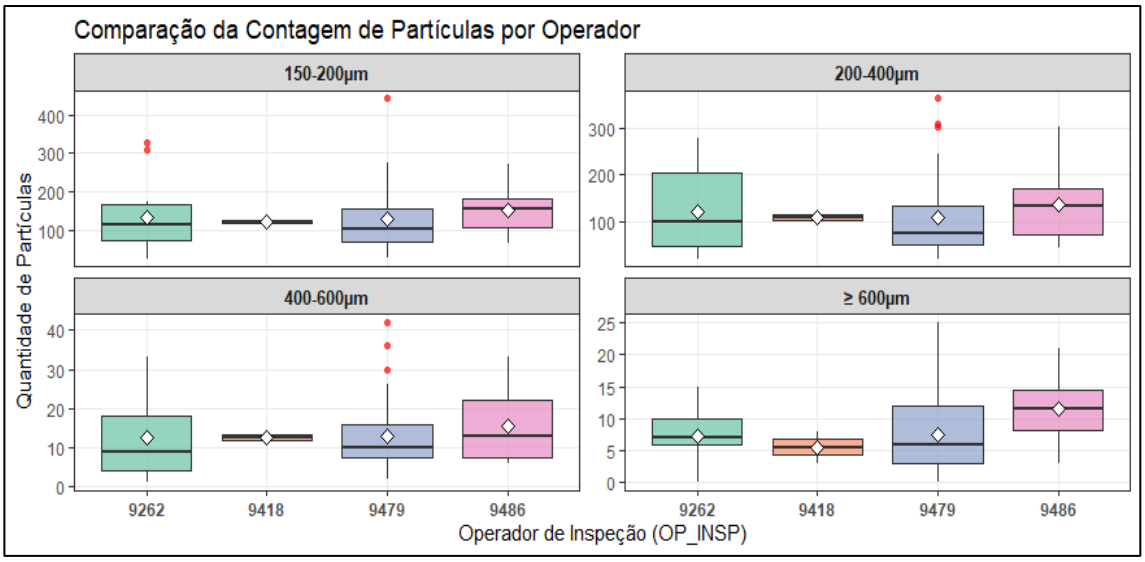


Figura 25 - Efeito da MFI na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas

Os diagramas de caixa permitem observar diferenças aparentes entre operadores, tanto em termos de medianas quanto de dispersão dos dados. Em particular, nota-se que o operador 9486 tende a apresentar medianas mais elevadas nas classes 400–600 µm e ≥ 600 µm, enquanto o operador 9418 exibe, de forma consistente, menores níveis de contaminação e reduzida variabilidade, o que pode ser interferência do baixo númeor de amostras deste operador em relação aos demais. Já os operadores 9262 e 9479 ocupam posições intermediárias, porém com maior dispersão e presença de valores extremos. Essa análise inicial sugere, do ponto de vista puramente descritivo, que o operador poderia exercer algum grau de influência sobre os resultados de contagem de partículas. Tal evidência é coerente com o resultado da regressão binomial negativa, na qual a variável associada ao operador de inspeção foi identificada como estatisticamente significativa em todas as classes granulométricas avaliadas. No entanto, essa observação isolada não é suficiente para sustentar uma interpretação causal, uma vez que não considera o contexto operacional em que cada operador atua.

Nesse sentido, a *Figura 26* amplia a análise ao integrar simultaneamente três dimensões relevantes do processo: operador de inspeção, MFI e intervalo de tempo entre lavagem e inspeção. Essa representação evidencia que cada operador trabalha com uma combinação específica de máquinas e tempos de espera, não havendo uma distribuição homogênea dessas variáveis entre os operadores. Observa-se, por exemplo, que operadores com maiores medianas de contagem frequentemente inspecionam peças provenientes da MFI 32, previamente identificada como a máquina com maior variabilidade e maiores níveis de contaminação por partículas. De forma semelhante, os intervalos entre lavagem e inspeção variam substancialmente dentro de cada operador, incluindo tanto períodos curtos quanto prolongados, o que introduz um fator adicional de variabilidade não controlada.

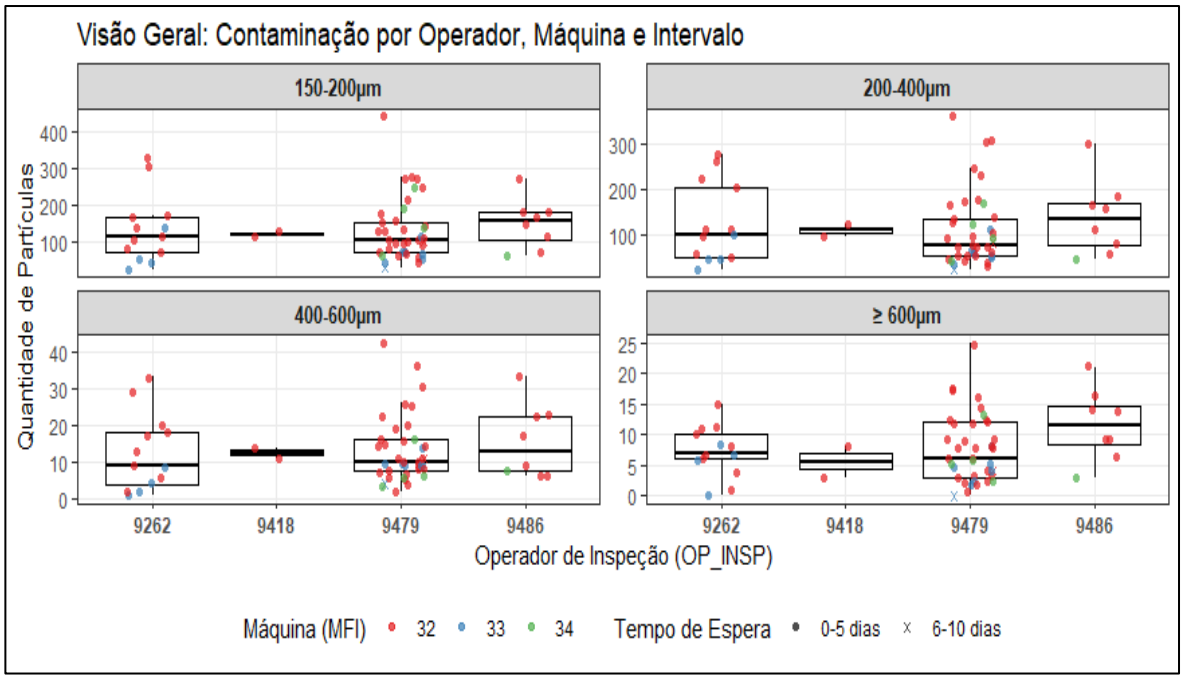


Figura 26 - Efeito conjunto entre MFI, operador de inspeção e tempo entre lavagem e inspeção na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas

A sobreposição dessas variáveis revela que as diferenças observadas entre operadores na *Figura 25* são fortemente influenciadas pela composição das condições de processo às quais estão expostos. Assim, o operador atua como um fator contextual, refletindo a variabilidade do sistema produtivo, e não como um agente isolado de geração de partículas. Essa constatação explica, inclusive, a significância estatística do operador no modelo de regressão: a variável captura, de forma indireta, a combinação de máquina, estado do processo, tempos de espera e condições operacionais associadas àquele operador específico.

Dessa forma, embora não se possa descartar completamente a influência humana, especialmente em atividades que envolvem manuseio, inspeção visual e decisões operacionais, os resultados indicam que a contaminação por partículas está primordialmente associada a fatores estruturais do processo produtivo, como a condição das máquinas de injeção, a estabilidade dos parâmetros de processo e a organização do fluxo entre lavagem e inspeção.

De forma análoga ao observado para o operador de inspeção, a análise apresentada na *Figura 27* evidencia que as diferenças aparentes na contagem de partículas entre operadores de injeção estão fortemente condicionadas pela MFI às quais cada operador esteve alocado. Observa-se que o operador que apresenta as menores medianas e a menor variabilidade, na maioria das classes de partículas, trabalhou nas máquinas que, de forma consistente, exibiram menores níveis de contaminação e maior estabilidade do processo. Esse padrão indica que o desempenho atribuído ao operador reflete, predominantemente, as características intrínsecas das máquinas e das condições operacionais associadas, mais do que numa diferença inerente na atuação individual.

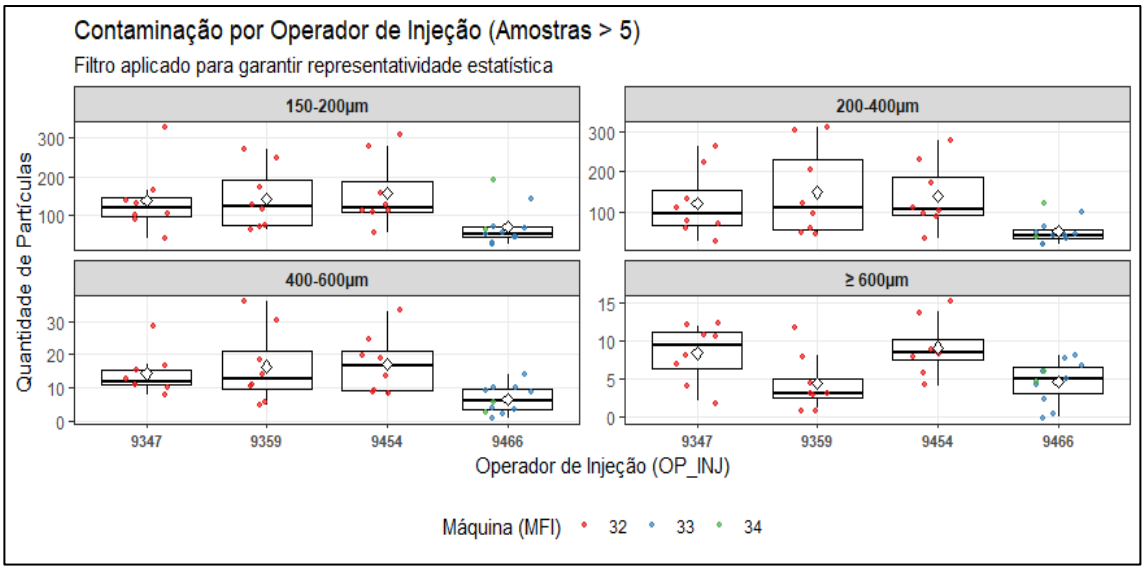


Figura 27 - Efeito do operador de injeção na contagem de partículas metálicas e não metálicas por classe de partículas (operadores com ≥ 5 amostras)

Portanto, os resultados sugerem que o operador não deve ser interpretado como a causa raiz do comportamento observado, mas sim como um elemento inserido num sistema com múltiplas fontes de variabilidade. Ainda assim, os recursos humanos devem permanecer como alvo contínuo de melhoria, seja por meio de formação técnica, padronização de práticas, sensibilização para requisitos de limpeza ou iniciativas de motivação. Tais ações, entretanto, devem ser conduzidas em paralelo a intervenções estruturais no processo, sob pena de se atribuir indevidamente ao fator humano efeitos que, na realidade, são predominantemente de origem sistêmica.

4.5.2.3 Partículas consideradas metálicas

Este tópico dedica-se à análise das partículas metálicas, das classes G (maiores ou iguais a 150µm e menores do que 200µm), H (maiores ou iguais a 200µm e menores do que 400µm), I (maiores ou iguais a 400µm e menores do que 600µm) e maiores do que 600µm, dando continuidade à abordagem inferencial iniciada nos tópicos anteriores.

A análise exploratória evidenciou que nenhuma das classes dimensionais de partículas apresenta distribuição normal, conforme indicado pelo *Gráfico 7* de probabilidade normal e pelos testes de Anderson–Darling.

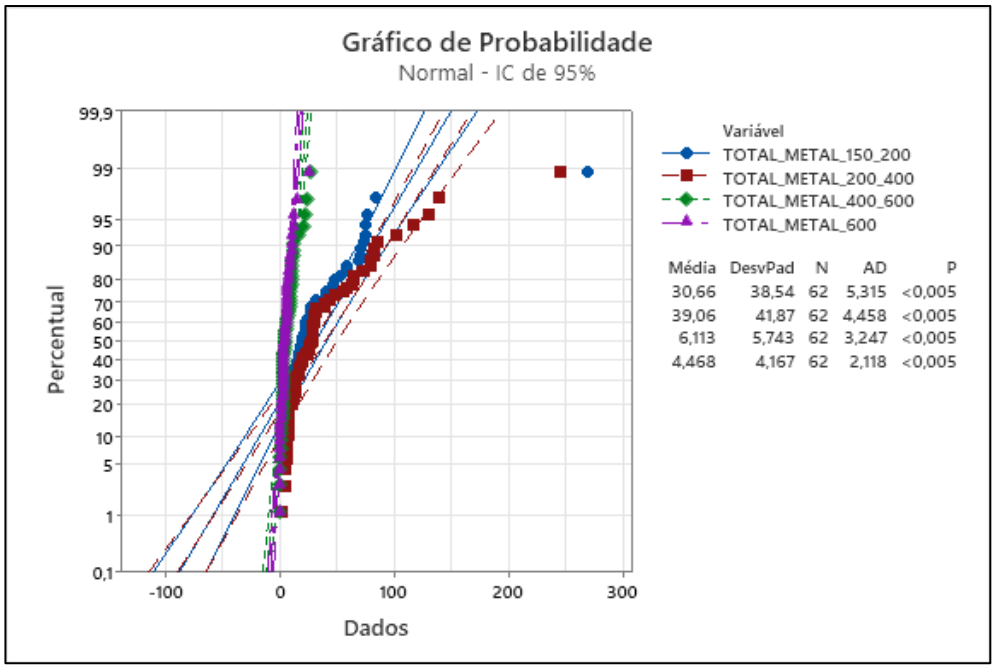


Gráfico 7 - Probabilidade normal para as classes granulométricas de partículas metálicas e não metálicas

Para as partículas exclusivamente metálicas, adotou-se o mesmo procedimento sistemático de avaliação da distribuição probabilística mais adequada à modelação das contagens observadas. Inicialmente, foram ajustados modelos baseados nas distribuições de Poisson e Binomial Negativa para cada classe granulométrica, sendo a comparação realizada por meio do Critério de Informação de Akaike (AIC).

Conforme apresentado na *Tabela 11,* a regressão Binomial Negativa apresentou desempenho superior em todas as classes granulométricas analisadas (G, H, I e ≥600 µm), evidenciado por valores de AIC inferiores aos obtidos com o modelo de Poisson. As diferenças de AIC (ΔAIC) foram particularmente expressivas nas classes G e H, indicando forte evidência de sobredispersão e elevada variabilidade nas contagens de partículas metálicas de menor dimensão.

Na classe I, a diferença de AIC permanece suficientemente elevada para justificar a preferência pela Binomial Negativa, ainda que com menor magnitude relativa, sugerindo uma redução gradual da variabilidade à medida que a granulometria aumenta. Por fim, na classe ≥ 600 µm, embora a diferença de AIC seja mais modesta, o modelo Binomial Negativo ainda apresentou melhor desempenho.

Tabela 11 - Comparação de ajuste de modelos de contagem para partículas metálicas via critério AIC

Classe Granulométrica	AIC (Poisson)	AIC (Binomial Negativa)	Δ AIC (Diferença)	Veredito Estatístico
G	1139,76	565,28	**574,48**	Binomial Negativa
H	1249,19	585,64	**663,55**	Binomial Negativa
I	405,95	368,98	**36,97**	Binomial Negativa
≥ 600	325,29	323,58	**1,71**	Binomial Negativa

Em conjunto, esses resultados demonstram que a regressão Binomial Negativa constitui a abordagem estatisticamente mais apropriada para a modelação da incidência de partículas metálicas em todas as faixas granulométricas avaliadas, assegurando a validade das inferências e a robustez das conclusões extraídas sobre os fatores críticos do processo produtivo.

4.5.2.3.1 Maiores ou iguais a 150µm e menores do que 200µm

A *Figura 28* apresenta os diagnósticos de resíduos simulados pelo pacote DHARMa para o modelo Binomial Negativo ajustado à classe de partículas metálicas deste tópico.

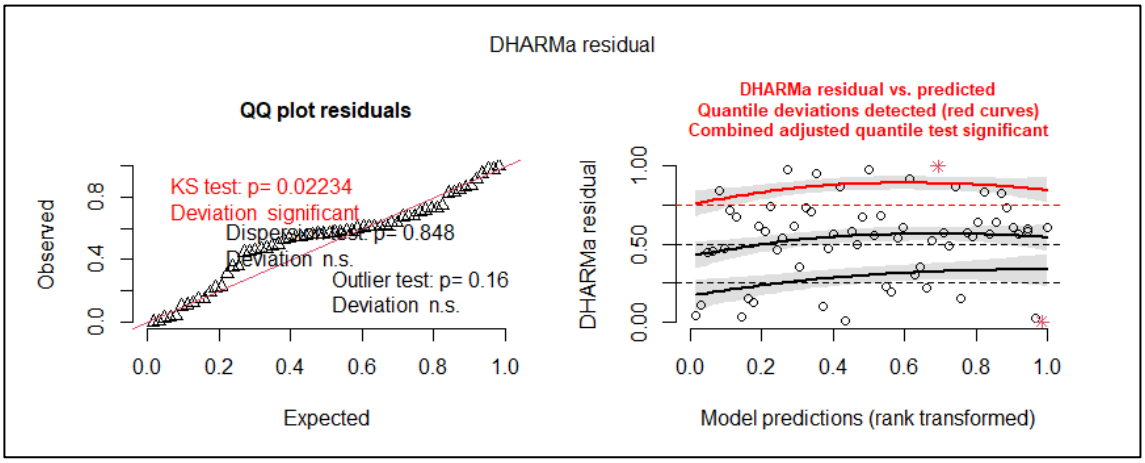


Figura 28 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm

Observa-se que o modelo completo apresentou desvios significativos no teste de Kolmogorov-Smirnov, bem como indícios de estrutura nos resíduos em função dos valores preditos, sugerindo inadequação parcial do ajuste inicial. Após a redução do modelo, com a exclusão das variáveis não informativas, DIA_SEMANA_INSP, OP_INSP, INTERVALO_LAVAGEM_INSP e LEAD_TIME, que não apresentaram significância estatística nos testes de Wald, os diagnósticos de resíduos passaram a indicar conformidade estatística, com teste de Kolmogorov-Smirnov não significativo, ausência de valores atípicos e dispersão compatível com a distribuição assumida, conforme *Figura 29.* A estabilização dos resíduos e a eliminação de padrões sistemáticos nos gráficos de resíduos versus preditos sugerem a adequação do modelo reduzido para inferência estatística nesta classe granulométrica.

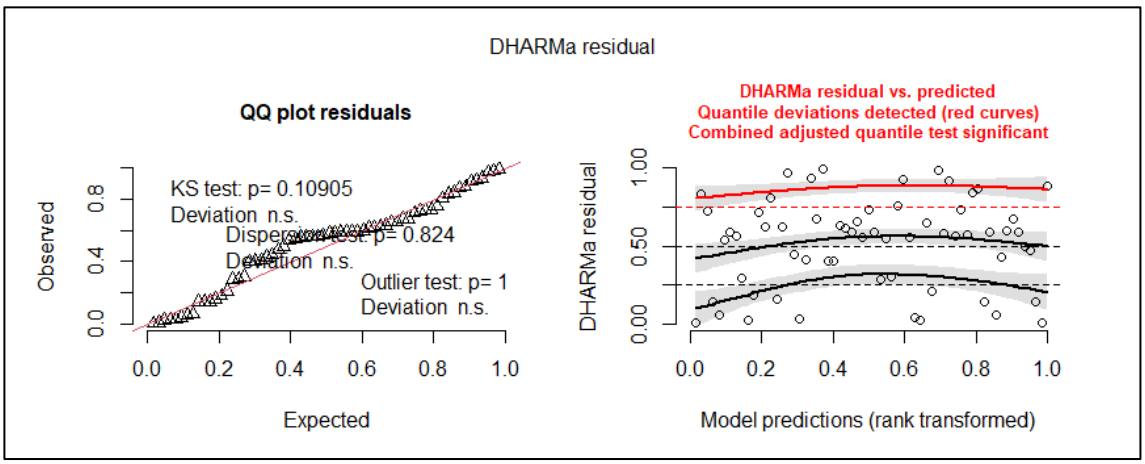


Figura 29 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 150 µm e menores do que 200 µm (Modelo reduzido)

O processo de refinamento do modelo resultou simultaneamente em redução do valor do AIC, que passou de 550,15 no modelo completo para 545,65 no modelo reduzido, indicando um ajuste mais parcimonioso e

estatisticamente consistente. Assim, o modelo reduzido foi adotado para a inferência dos fatores críticos nesta classe granulométrica.

A *Tabela 12* sintetiza os resultados do teste de Wald (ANOVA tipo II) aplicado ao modelo reduzido. Os resultados evidenciam que a cavidade e o operador de injeção constituem os principais fatores críticos para a ocorrência de partículas na faixa de 150 a 200 micrómetros, ambos classificados como altamente significativos. O contador de início de produção e o dia da semana da lavagem também apresentaram significância estatística, ainda que em nível inferior, indicando influência relevante associada ao tempo de operação do processo e à rotina de limpeza. Em contrapartida, as variáveis MFI, estado da peça e *lead time* não demonstraram efeito estatisticamente significativo, atuando como fatores de controlo nesta classe de partículas.

Tabela 12 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 150 micrómetros e menores do que 200 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
CAVIDADE	6	45,3143	< 0,001	Altamente significativo
OP_INJ	18	44,3869	< 0,001	Altamente significativo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	8,6226	0,0033202	Muito significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	15,3953	0,0088004	Muito significativo
MFI	2	4,1332	0,1266163	Controlo
ESTADO_PEÇA	1	1,5459	0,2137433	Controlo
LEAD_TIME	1	0,4659	0,4948786	Controlo

Por outro lado, a ausência de significância estatística da variável MFI, indica que, para partículas metálicas de menor dimensão, não há evidência de que diferenças entre equipamentos sejam determinantes para a ocorrência de resíduos. De forma semelhante, o estado da peça e o *lead time* comportam-se como variáveis de controlo, não apresentando efeito estatisticamente relevante nesta etapa do processo. Esses resultados estabelecem uma linha de base robusta para a análise das classes granulométricas subsequentes.

4.5.2.3.2 Maiores ou iguais a 200µm e menores do que 400µm

Para a análise da incidência de partículas metálicas e não metálicas com dimensão compreendida entre 200 e 400 micrómetros, foi ajustado inicialmente um modelo de regressão Binomial Negativa, adequado à natureza discreta da variável resposta e à presença de sobredispersão nas contagens. O modelo completo incluiu variáveis associadas às condições operacionais, temporais e de processo, nomeadamente: MFI, cavidade do molde, contador de início de produção, operador de injeção, dia da semana da lavagem, dia da semana da inspeção, operador de inspeção, intervalo entre lavagem e inspeção, *lead time* e estado visual da peça.

A adequação do modelo foi avaliada por meio de diagnósticos de resíduos simulados utilizando o pacote DHARMa. Os diagnósticos de resíduos do modelo completo indicaram desvios significativos no teste de Kolmogorov–Smirnov, sugerindo inadequação parcial do ajuste inicial, conforme pode ser visto na *Figura 30.*

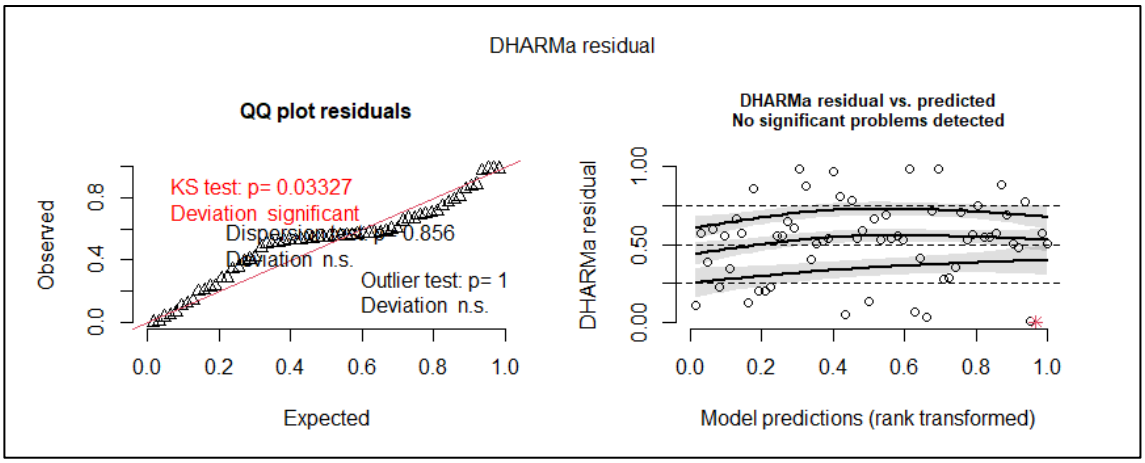


Figura 30 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 200 µm e menores do que 400 µm

Com base nos resultados iniciais, procedeu-se ao refinamento do modelo mediante a exclusão das variáveis DIA_SEMANA_INSP, OP_INSP, INTERVALO_LAVAGEM_INSP e LEAD_TIME, que não apresentaram significância estatística consistente e cuja remoção não comprometeu o ajuste global. Após o refinamento do modelo, os diagnósticos de resíduos simulados passaram a indicar conformidade estatística, com teste de Kolmogorov–Smirnov não significativo, ausência de valores atípicos e dispersão compatível com a distribuição Binomial Negativa assumida. Os gráficos de resíduos versus valores preditos não apresentaram padrões sistemáticos, evidenciando a estabilização do ajuste e a adequação do modelo reduzido para inferência estatística nesta classe granulométrica, conforme ilustrado na *Figura 31*.

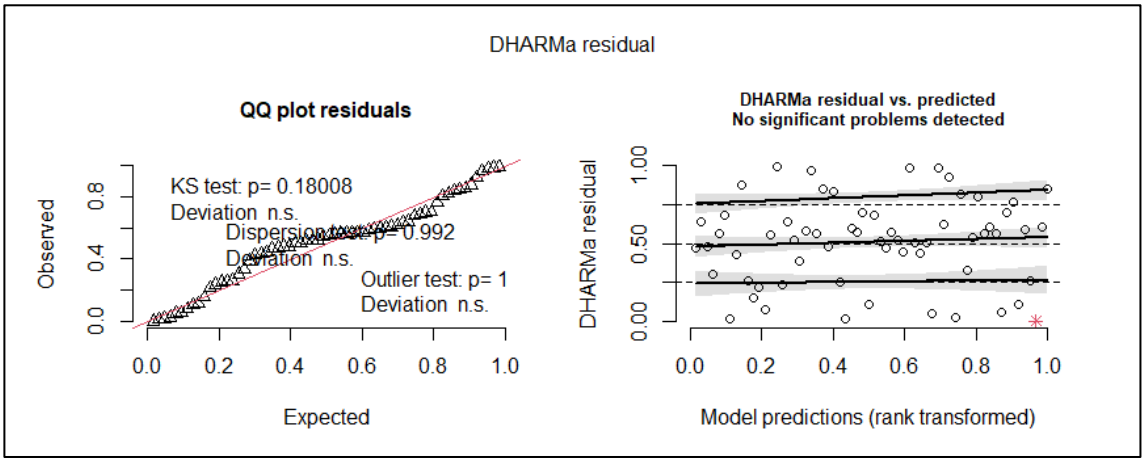


Figura 31- Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 200 µm e menores do que 400 µm (Modelo reduzido)

Adicionalmente, o processo de refinamento resultou numa redução do valor do AIC, de 563,53 no modelo completo para 562,52 no modelo reduzido, ume melhoria discreta mas que indica um modelo mais parcimonioso sem perda de qualidade explicativa.

De acordo com os resultados do teste de Wald apresentados na *Tabela 13*, a cavidade destacou-se como o fator de maior influência na incidência de partículas metálicas entre 200 e 400 µm, sendo classificada como altamente significativa. Esse resultado evidencia a importância das condições específicas da ferramenta e do desgaste das cavidades na geração de resíduos metálicos nesta faixa granulométrica.

Tabela 13 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 200 micrómetros e menores do que 400 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
CAVIDADE	6	44,0303	< 0,001	Altamente significativo
OP_INJ	18	39,9961	0,00209	Muito significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	15,7436	0,007615	Muito significativo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	5,7882	0,016134	Significativo
ESTADO_PEÇA	1	4,0814	0,043357	Significativo
MFI	2	2,8989	0,234701	Controlo

O operador de injeção também apresentou elevada relevância estatística, indicando que diferenças operacionais e de manuseio do processo exercem impacto direto sobre a ocorrência dessas partículas. Em complemento, o dia da semana da lavagem mostrou-se estatisticamente significativo, sugerindo que a rotina operacional influencia a presença de partículas metálicas de média granulometria.

O contador de início de produção e o estado visual da peça apresentaram significância estatística moderada, indicando que tanto o tempo de uso acumulado do equipamento quanto a condição superficial do produto final estão associados à ocorrência dessas partículas. Por outro lado, a variável MFI, não apresentou significância estatística, sugerindo que, para esta classe granulométrica, a variabilidade observada está mais fortemente relacionada às condições operacionais e ao histórico de utilização e desgaste da ferramenta do que às características individuais das máquinas.

4.5.2.3.3 Maiores ou iguais a 400µm e menores do que 600µm

Para a classe de partículas metálicas entre 400 e 600 µm, ajustou-se inicialmente um modelo completo de regressão Binomial Negativa, incorporando todas as variáveis disponíveis relacionadas a máquina (MFI), ferramenta (cavidade), operação (operador de injeção e de inspeção), dinâmica temporal do processo (contador de início de produção, dia da lavagem, dia da inspeção, intervalo entre lavagem e inspeção e *lead time*) e condição do produto (estado da peça).

Os diagnósticos de resíduos simulados para a classe granulométrica entre 400 e 600 micrómetros indicam um ajuste estatisticamente adequado do modelo de regressão Binomial Negativa,como pode ser visto na *Figura 32.* O gráfico quantil-quantil evidencia boa aderência à distribuição teórica esperada, corroborada pelo teste de Kolmogorov–Smirnov não significativo. Adicionalmente, o teste de dispersão não indicou sobredispersão residual relevante, e o teste de valores atípicos não identificou observações influentes, indicando que a variabilidade observada foi adequadamente capturada pelo modelo.

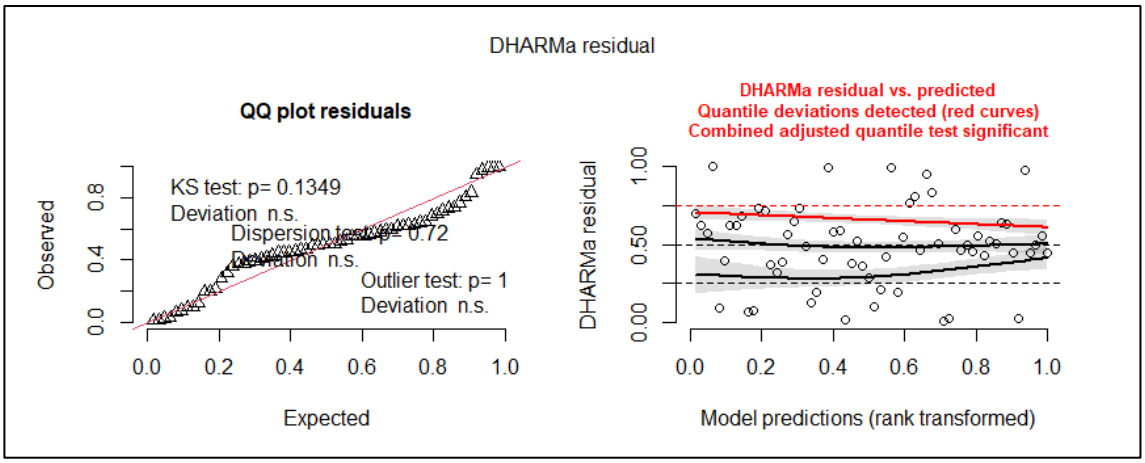


Figura 32 - Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 400 µm e menores do que 600 µm

Embora o teste combinado de quantis aponte desvios localizados nas caudas, tais variações não configuram violação estrutural dos pressupostos do modelo, sobretudo à luz da conformidade observada nos testes globais. Em conjunto, os resultados dos diagnósticos de resíduos confirmam a adequação do modelo para inferência estatística nesta classe granulométrica, permitindo a interpretação confiável dos efeitos dos fatores explicativos associados à incidência de partículas metálicas na faixa analisada.

A significância global dos fatores foi avaliada por meio do Teste de Wald Tipo II, conforme *Tabela 14*. Os resultados indicaram que a cavidade foi o fator mais relevante, seguida pelo operador de injeção e pelo dia da semana da lavagem, evidenciando a predominância de fatores operacionais e de ferramenta na incidência de partículas metálicas nesta classe granulométrica. Variáveis associadas à dinâmica temporal do processo, como o contador de início de produção e o *lead time,* também apresentaram efeito estatisticamente significativo. Em contrapartida, a MFI, o estado da peça, o operador de inspeção e o intervalo entre lavagem e inspeção não apresentaram significância estatística, sendo interpretados como variáveis de controlo para esta faixa de tamanho de partículas.

Tabela 14 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 400 micrómetros e menores do que 600 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
CAVIDADE	6	30,7184	< 0,001	Altamente significativo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	20,1581	0,001167	Muito significativo
OP_INJ	18	36,8756	0,005439	Muito significativo
LEAD_TIME	1	6,2902	0,012141	Significativo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	4,9842	0,025581	Significativo
DIA_SEMANA_INSP	3	7,5544	0,056176	Controlo
OP_INSP	3	3,8754	0,275233	Controlo
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	1	0,8145	0,36679	Controlo
MFI	2	0,4133	0,813285	Controlo
ESTADO_PEÇA	1	0,0026	0,95923	Controlo

Em conjunto, os resultados indicam que, para partículas metálicas entre 400 e 600 µm, a variabilidade observada está predominantemente associada às condições operacionais da injeção, à configuração da ferramenta e à dinâmica temporal do processo, enquanto características associadas à inspeção e à condição visual do produto exercem influência marginal.

4.5.2.3.4 Maiores ou iguais a 600µm

Para a análise da incidência de partículas metálicas com dimensão superior a 600 µm seguiu-se a mesma metodologia das classes anteriores, a partir de um Modelo Linear Generalizado com distribuição Binomial Negativa. O modelo incluiu as mesmas variáveis inclusas para a classe anterior.

A análise dos resíduos simulados, conforme *Figura 33,* indica adequação estatística satisfatória do modelo. O gráfico QQ-plot dos resíduos apresentou boa concordância com a distribuição teórica esperada, sendo confirmado pelo teste de Kolmogorov–Smirnov não significativo, o que sugere ausência de desvios sistemáticos relevantes da distribuição assumida. Adicionalmente, os testes de dispersão e de valores atípicos não indicaram violações dos pressupostos do modelo, evidenciando homogeneidade da variância residual e ausência de observações influentes. O gráfico de resíduos em função dos valores preditos não revelou padrões estruturais relevantes, reforçando a estabilidade do ajuste. Embora se observe leve convergência das bandas de quantis nos extremos superiores das predições, tal comportamento é compatível com a baixa frequência de eventos extremos, característica intrínseca desta classe granulométrica.

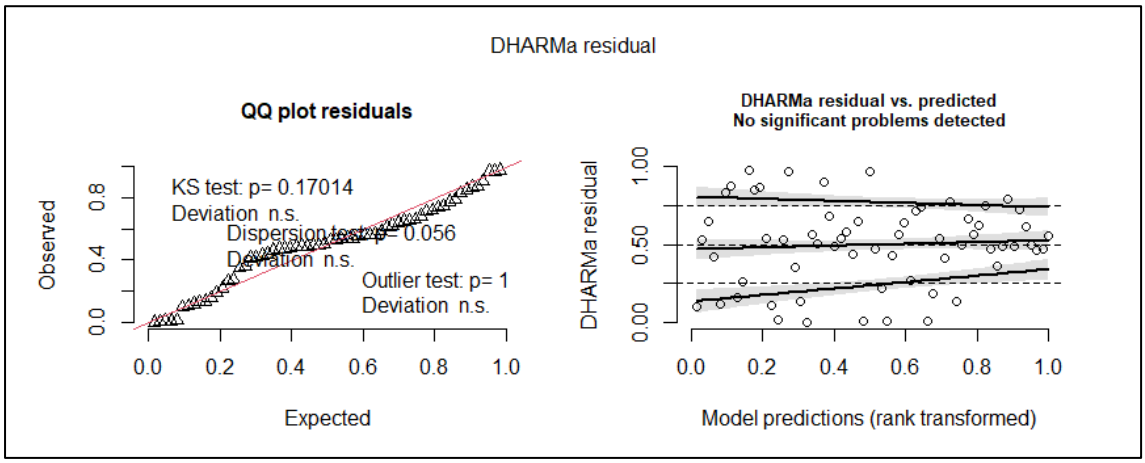


Figura 33- Diagnóstico do ajuste do modelo com base nos resíduos simulados (DHARMa) para partículas metálicas maiores ou iguais a 600 µm

Os resultados do Teste de Wald Tipo II, conforme apresentado na *Tabela 15,* indicam que, para esta classe de partículas, apenas o operador de injeção apresentou efeito estatisticamente significativo, sugerindo que a ocorrência dessas partículas está associada a práticas operacionais específicas, possivelmente relacionadas à manipulação, ajustes mecânicos ou intervenções durante o processo produtivo.

Tabela 15 - Teste de Wald para significância dos fatores de influência na incidência de partículas metálicas maiores ou iguais a 600 micrómetros

Variável	Graus de Liberdade (Df)	Qui-Quadrado (Chisq)	Valor-p (Pr>Chisq)	Estado no Modelo
OP_INJ	18	32,5053	0,01914	Significativo
INTERVALO_LAVAGEM_INSP	1	2,7317	0,09838	Controlo
DIA_SEMANA_LAVAGEM	5	7,1177	0,21203	Controlo
DIA_SEMANA_INSP	3	4,2844	0,23235	Controlo
CAVIDADE	6	7,4665	0,27985	Controlo
LEAD_TIME	1	0,9085	0,34052	Controlo
ESTADO_PEÇA	1	0,8365	0,36041	Controlo
MFI	2	1,3273	0,51496	Controlo
CONTADOR_INICIO_PROD	1	0,2861	0,59272	Controlo
OP_INSP	3	0,2074	0,97638	Controlo

As demais variáveis, não apresentaram significância estatística ao nível de 5%. Esse resultado indica que, nesta faixa granulométrica, a geração de partículas metálicas de grande porte não está associada a equipamentos específicos nem a condições temporais do processo, mas sim a fatores humanos ou operacionais pontuais.

4.5.2.3.5 Interpretação dos Fatores Significativos e Relações com o Processo Produtivo

A *Figura 34* sintetiza, por meio de um mapa de calor, o padrão de significância estatística dos fatores de processo associados à contaminação por partículas metálicas ao longo das diferentes faixas granulométricas analisadas. A intensidade da coloração representa a magnitude do teste de Wald (Qui-quadrado).

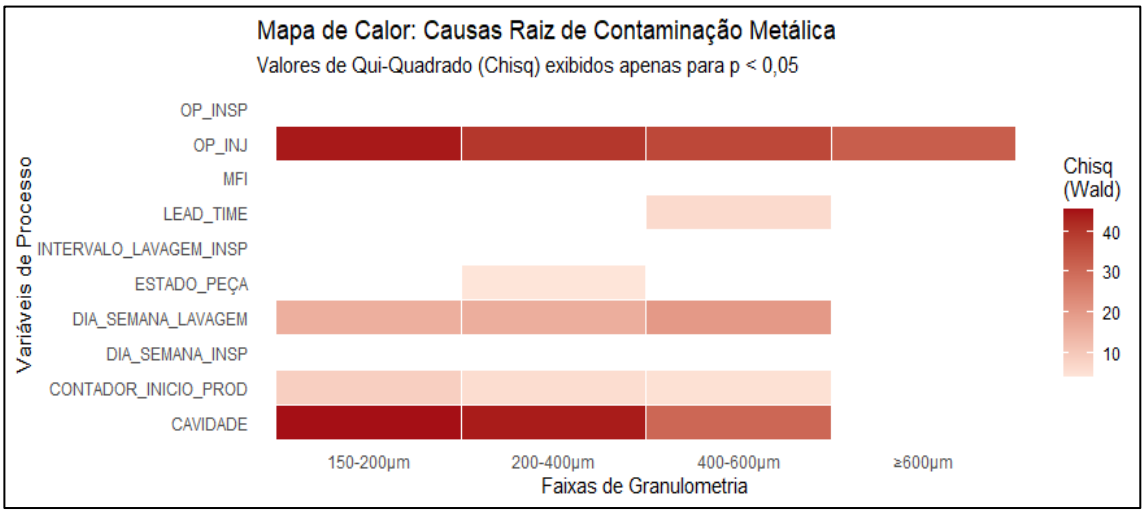


Figura 34 - Mapa de calor dos valores de qui-quadrado (teste de Wald) por faixa granulométrica para partículas metálicas

Observa-se um gradiente claro de complexidade do processo, no qual as classes de granulometria menor do que 600 µm apresentam um maior número de fatores críticos simultaneamente relevantes, com destaque consistente para cavidade e operador de injeção, que permanecem altamente significativos nessas faixas. Na classe

acima de 600 µm, na qual apenas o fator operador de injeção mantém significância estatística. Esse comportamento sugere uma transição nos mecanismos dominantes de geração de partículas metálicas: enquanto partículas menores estão associadas a múltiplas fontes relacionadas à dinâmica operacional, desgaste acumulado e condições de limpeza, partículas de maior porte parecem resultar de eventos pontuais e falhas mecânicas específicas, menos dependentes do histórico do processo ou das variáveis deste estudo. Dessa forma, o mapa de calor fornece uma visão integrada e hierarquizada dos fatores críticos, permitindo identificar não apenas quais variáveis são relevantes, mas como sua influência evolui em função do tamanho das partículas, constituindo uma ferramenta central para a definição de estratégias de controlo direcionadas por faixa granulométrica.

A *Figura 35* apresenta a comparação da contaminação metálica média por cavidade do molde, segmentada por três classes granulométricas (150–200 µm, 200–400 µm e 400–600 µm). Para cada classe, as cavidades são dispostas no eixo vertical, enquanto o eixo horizontal representa a média de partículas metálicas observada. A linha vertical tracejada em vermelho indica o limite máximo de contaminação estabelecido pelo cliente para cada faixa granulométrica, permitindo a avaliação direta da conformidade de cada cavidade em relação à especificação.

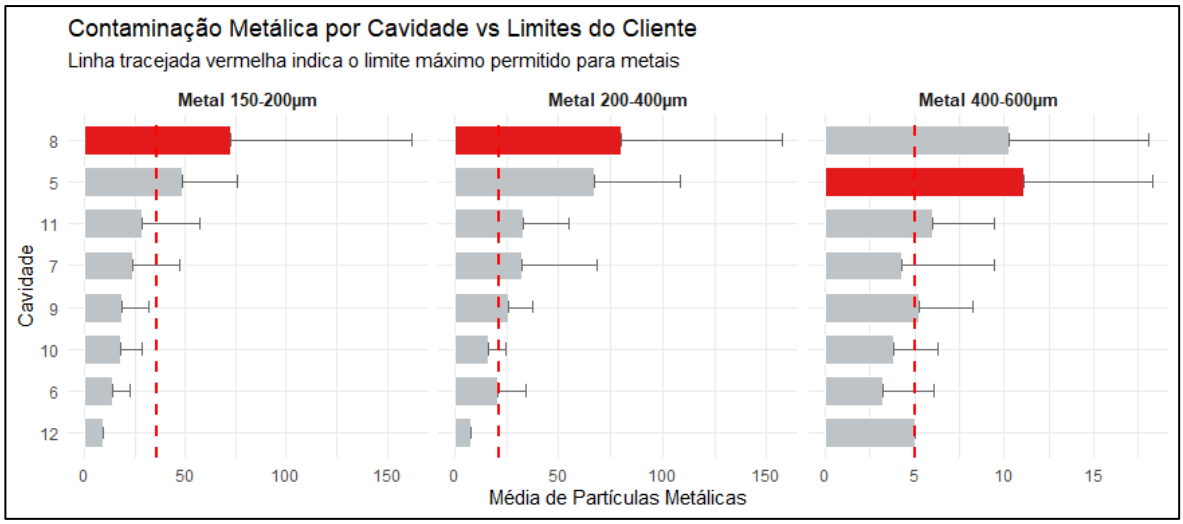


Figura 35 - Contagem média de partículas metálicas por cavidade e classe granulométrica face aos critérios de aceitação

Observa-se que a contaminação não é uniformemente distribuída entre as cavidades. Em todas as classes granulométricas, destacam-se cavidades específicas com níveis médios significativamente superiores às demais. Na classe 150–200 µm, a cavidade 8 apresenta a maior média de partículas, ultrapassando claramente o limite do cliente, enquanto as demais cavidades permanecem abaixo desse valor, com diferenças graduais entre si. Comportamento semelhante é observado na classe 200–400 µm, novamente com a cavidade 8 apresentando valores médios elevados e acima do limite especificado. Já na classe 400–600 µm, embora os níveis absolutos sejam menores, a cavidade 5 destaca-se por exceder o limite máximo permitido, ao passo que as demais cavidades se mantêm, em sua maioria, dentro da especificação.

Os resultados evidenciam que a cavidade do molde é um fator crítico na geração de contaminação metálica, com algumas cavidades contribuindo de forma desproporcional para os níveis totais de partículas. A recorrência de não conformidade associada a cavidades específicas, como a cavidade 8 e a cavidade 5, sugere a presença de condições locais diferenciadas, tais como desgaste localizado, desalinhamentos, danos superficiais ou problemas de acabamento nessas cavidades. Esses achados reforçam a necessidade de ações direcionadas, como inspeções

detalhadas, manutenção corretiva específica ou até intervenções estruturais nessas cavidades, em detrimento de abordagens genéricas aplicadas ao molde como um todo.

A *Figura 36* apresenta a evolução cronológica da contaminação metálica em função do contador de início de produção, para três classes granulométricas de partículas metálicas. Cada painel mostra os valores individuais observados ao longo do avanço dos ciclos de produção, uma curva de suavização que representa a tendência média do comportamento e uma linha tracejada vermelha que indica o requisito para cada classe de partículas. O eixo horizontal reflete o avanço cumulativo da produção, enquanto o eixo vertical representa a quantidade de partículas metálicas detetadas.

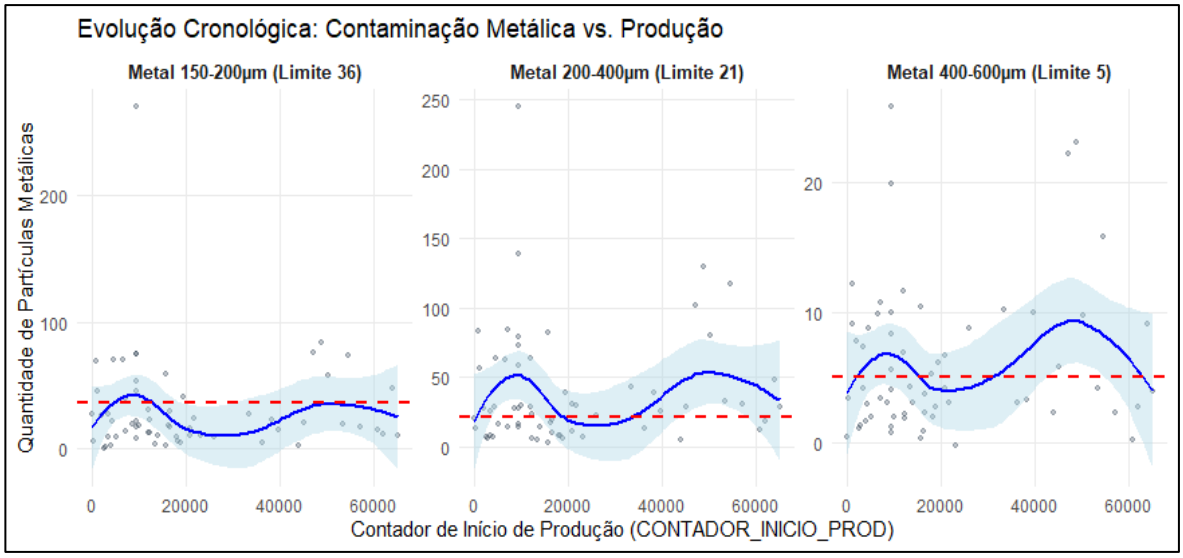


Figura 36 - Tendência não linear da contagem de partículas metálicas ao longo do ciclo de produção

Em todas as classes granulométricas observa-se um comportamento não linear da contaminação ao longo do tempo de produção, caracterizado por oscilações em torno dos limites especificados. De forma geral, há uma tendência de aumento gradual da contagem de partículas com o avanço do contador de produção, interrompida por reduções pontuais que sugerem intervenções no processo, como manutenções ou ajustes operacionais. No entanto, essas reduções não se sustentam ao longo do tempo, sendo seguidas por nova elevação da contaminação. Esse padrão é mais crítico nas faixas 200–400 µm e 400–600 µm, nas quais a curva de tendência se aproxima com maior frequência dos limites ou os ultrapassa, indicando maior sensibilidade do processo nessas classes.

Os resultados indicam que o contador de produção é um fator relevante na dinâmica de geração de partículas metálicas, refletindo um processo de degradação progressiva associado ao uso contínuo do molde e do sistema produtivo. Embora intervenções periódicas aparentem reduzir temporariamente a contaminação, seu efeito é transitório e insuficiente para manter o processo de forma consistente dentro da especificação ao longo de todo o ciclo produtivo. Assim, o comportamento observado sugere que a periodicidade e/ou a eficácia das ações de manutenção atualmente adotadas não acompanham a taxa de degradação do sistema, o que reforça a necessidade de revisão das estratégias de manutenção preventiva e de monitorização contínua da contaminação ao longo da produção.

Embora o gráfico não permita estabelecer uma relação causal direta entre eventos específicos e as flutuações observadas, o padrão global reforça a interpretação de que o avanço do contador de produção constitui um fator relevante na dinâmica de geração de partículas, devendo ser considerado na definição de estratégias de monitorização e na avaliação da adequação da periodicidade das intervenções preventivas.

A *Figura 37* apresenta o monitoramento da contaminação metálica em função do dia da semana em que a lavagem das peças foi realizada. Os resultados estão organizados em três painéis correspondentes às classes granulométricas de partículas metálicas: 150–200 µm, 200–400 µm e 400–600 µm. Em cada painel, diagramas de caixa representam a distribuição da quantidade de partículas por dia da semana (de segunda a sábado), permitindo a avaliação das medianas, da dispersão dos dados e da presença de valores extremos associados a cada dia de lavagem.

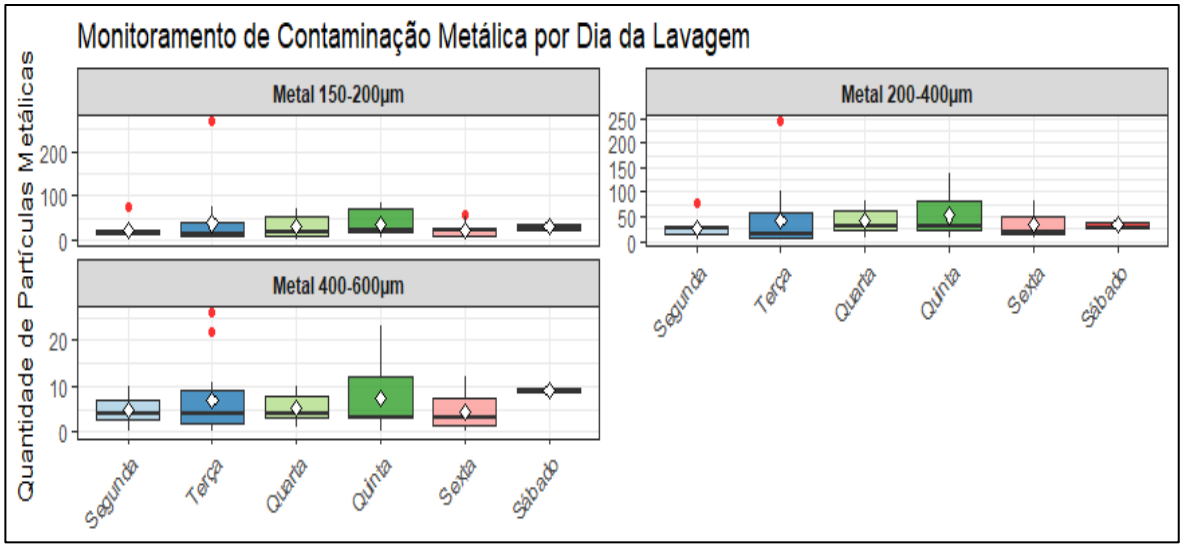


Figura 37 - Média da contagem de partículas metálicas e não metálicas por dia da lavagem e classe granulométrica

Observa-se que, de modo geral, as medianas de contaminação permanecem relativamente próximas entre os diferentes dias da semana, não indicando um padrão sistemático e consistente de aumento ou redução associado a um dia específico de lavagem. No entanto, alguns dias, em especial terça e quinta-feira, apresentam maior dispersão dos dados e a ocorrência de valores extremos, sobretudo nas classes 150–200 µm e 200–400 µm. Na faixa 400–600 µm, embora os níveis absolutos sejam mais baixos, também se nota maior variabilidade em determinados dias, sugerindo episódios pontuais de maior contaminação. Esses comportamentos indicam que o dia da lavagem, por si só, não define o nível médio de contaminação, mas pode estar associado a condições operacionais específicas que variam ao longo da semana.

A análise do *Gráfico 8* mostra que, para a classe de partículas metálicas entre 200 e 400 µm, as peças classificadas sem defeitos visuais apresentam, em média, contagens mais elevadas e maior dispersão quando comparadas às peças com defeitos visuais, evidenciada por caixas mais amplas e pela presença de valores extremos. Este comportamento indica que a ausência de defeitos visuais não implica, necessariamente, menor contaminação metálica, sugerindo que o estado visual da peça atua como um fator contextual associado às condições de processo e de manuseio, e não como um indicador direto da geração de partículas nesta faixa granulométrica.

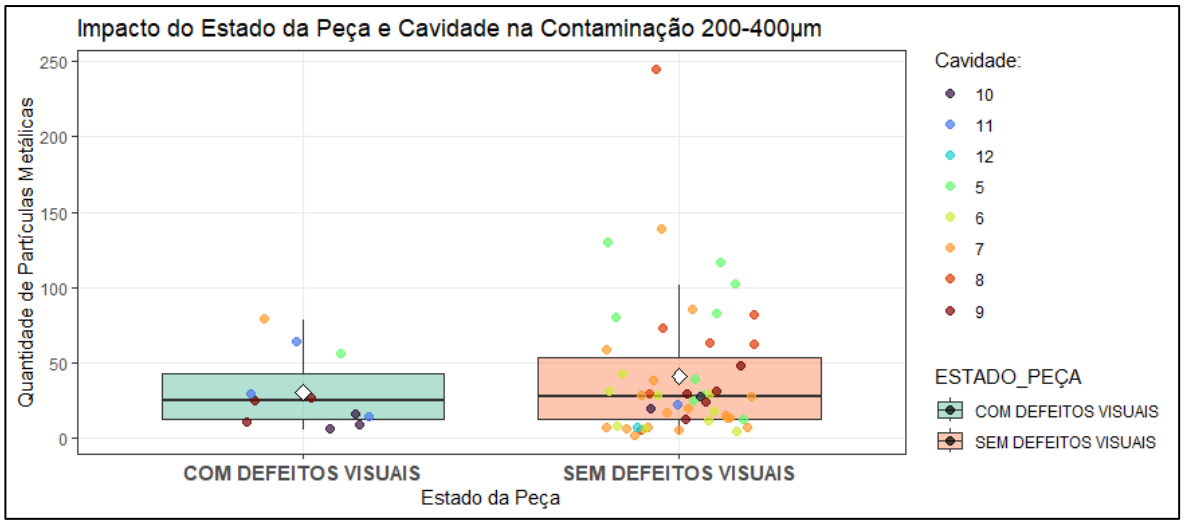


Gráfico 8 – Análise do impacto do estado da peça na contaminação por partículas metálicas

Ao detalhar este comportamento por cavidade, observa-se que as cavidades com maiores médias de partículas metálicas nesta classe, em particular as cavidades 8 e 5, conforme evidenciado no gráfico de conformidade por cavidade, também estão representadas no conjunto de peças sem defeitos visuais, contribuindo de forma relevante para os valores mais elevados observados neste estado. Em contraste, cavidades que apresentam as menores médias de partículas metálicas no gráfico por cavidade, mantêm níveis baixos de contaminação em ambos os estados da peça (cavidade 6), e no estado sem defeito (cavidade 12). Estes resultados indicam que a variabilidade observada entre peças com e sem defeitos visuais é fortemente modulada pelo comportamento intrínseco das cavidades, reforçando que o efeito do estado da peça não se sobrepõe ao efeito estrutural da cavidade, mas reflete a combinação das condições de processo às quais estas cavidades estão submetidas.

O *Gráfico 9* apresenta a relação entre o *lead time* total do processo e a quantidade de partículas metálicas na faixa de 400–600 µm, utilizando uma suavização LOESS para evidenciar tendências não lineares. Os pontos representam observações individuais, enquanto a linha azul indica a tendência média estimada e a faixa sombreada o intervalo de confiança. A linha tracejada vermelha corresponde ao limite máximo admissível de 5 partículas, servindo como referência de conformidade.

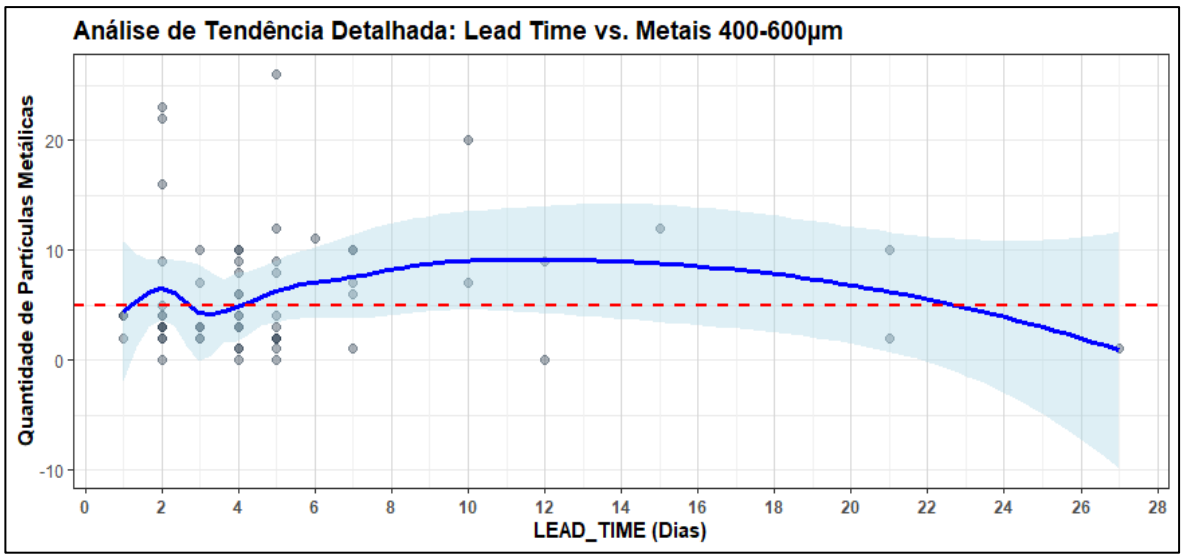


Gráfico 9 - Relação entre o *lead time* e a quantidade de partículas metálicas

Observa-se que, para *lead times* curtos, a contagem de partículas apresenta elevada dispersão, com diversos pontos acima do limite especificado, indicando instabilidade do processo nas etapas iniciais ou em fluxos muito rápidos. À medida que o *lead time* aumenta para valores intermediários, a tendência suavizada aponta para um incremento gradual da contagem média, mantendo-se, em parte do intervalo, acima do limite de especificação, o que sugere que o prolongamento moderado do tempo de processo pode estar associado ao acúmulo de partículas metálicas, possivelmente por maior exposição a manuseios, transferências ou interações com superfícies do processo.

Para *lead times* mais elevados, a curva indica uma redução progressiva da contagem média de partículas, aproximando-se e, posteriormente, ficando abaixo do limite de 5 partículas. Esse comportamento pode estar associado a fluxos mais controlados, maior tempo de estabilização do processo ou intervenções corretivas implícitas em trajetos mais longos, como inspeções adicionais ou melhores práticas de acondicionamento. Contudo, a ampliação do intervalo de confiança nessa região indica menor densidade de dados e maior incerteza estatística, recomendando cautela na interpretação.

Em síntese, o gráfico evidencia uma relação não linear entre *lead time* e contaminação metálica na faixa de 400–600 µm, reforçando que o tempo total de processo, isoladamente, não explica de forma determinística a geração de partículas, devendo ser interpretado em conjunto com fatores estruturais do fluxo produtivo, práticas operacionais e condições de manuseio ao longo do processo.

A *Figura 38* apresenta a influência conjunta do operador de injeção e da MFI na contagem de partículas metálicas, segmentada por quatro classes granulométricas de partículas identificadas como metálicas e estudadas neste tópico. Foram considerados apenas operadores com mais de cinco amostras, de forma a assegurar representatividade estatística. Em cada painel, os diagramas de caixa mostram a distribuição da contagem de partículas por operador, enquanto os pontos individuais são codificados por cor segundo a máquina utilizada, permitindo a análise simultânea dos efeitos humano e equipamento.

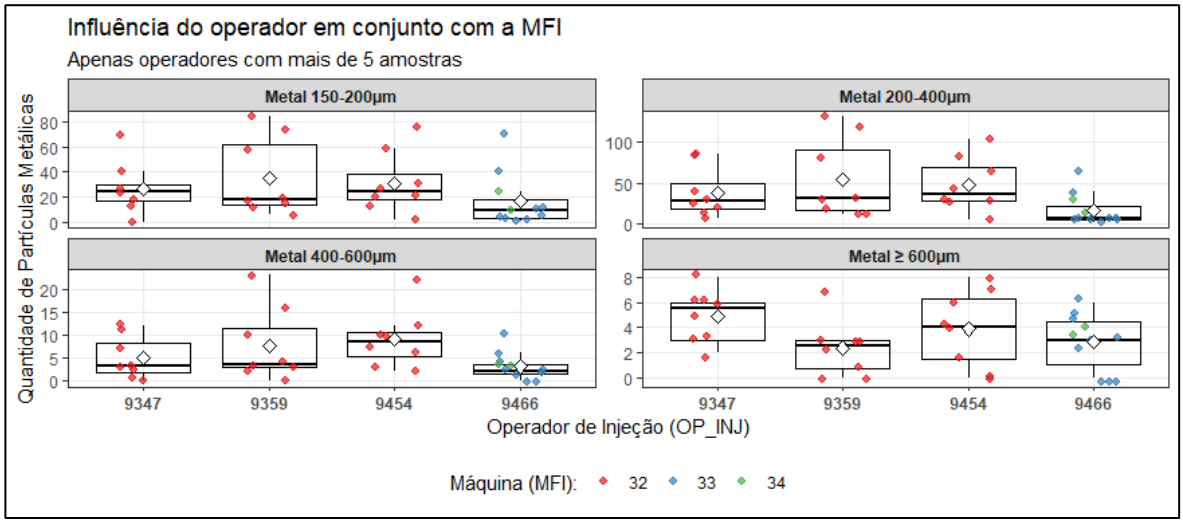


Figura 38 - Efeito conjunto entre MFI e operador de injeção na contagem de partículas metálicas por classe de partículas

De forma consistente nas quatro faixas granulométricas, observa-se que as maiores medianas e a maior dispersão estão associadas aos operadores que atuaram predominantemente na MFI 32, evidenciada pela concentração de pontos vermelhos e pela presença de valores extremos. Em contraste, o operador 9466, que apresenta sistematicamente as menores medianas e menor variabilidade, está majoritariamente associado às MFI 33 e 34, máquinas que, em análises anteriores, já se mostraram mais estáveis e com menores níveis de

contaminação. Este padrão repete-se de forma clara sobretudo nas classes 150–200 µm, 200–400 µm e 400–600 µm, e mantém-se, ainda que com menor amplitude, na classe ≥600 µm.

Esses resultados indicam que as diferenças aparentes entre operadores não podem ser interpretadas como efeito puramente individual, mas refletem fortemente a combinação operador–máquina. O operador surge, assim, como um fator contextual que incorpora a exposição a diferentes condições de processo, em particular o desempenho intrínseco das máquinas de injeção. Tal constatação é coerente com os resultados da regressão binomial negativa, na qual o operador aparece como estatisticamente significativo por capturar, de forma indireta, a variabilidade estrutural do sistema produtivo. Embora não se descarte a influência humana em atividades de operação e ajuste, o gráfico reforça que a máquina de injeção constitui o principal determinante da contaminação observada, devendo ser o foco prioritário de ações de melhoria, manutenção e padronização operacional.

Neste tópico, não se fez necessária a aplicação de diagramas de Ishikawa, uma vez que as causas potenciais associadas a este tipo de partículas já se encontram devidamente identificadas e abrangidas pelo diagrama elaborado para as classes de partículas analisadas anteriormente, não havendo a introdução de novos mecanismos causais relevantes que justificassem uma análise adicional.

4.6 CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA DAS PARTÍCULAS FORA DE ESPECIFICAÇÃO COMO SUPORTE À ANÁLISE DE CAUSA RAIZ

Embora as análises estatísticas tenham sido testadas como sendo robustas para a indicação das prováveis interferentes na incidência de partículas, sabe-se que o modelo ainda não é capaz de abordar todas as possíveis variáveis em produção para um tópico tão sensível quanto a deposição, criação ou remoção de partículas, por isso, uma análise visual e microscópica das partículas encontradas faz-se necessário como complemento dos testes estatísticos.

As figuras apresentadas neste tópico são de partículas exclusivamente encontradas no decorrer das análises realizadas do componente em estudo, não foram adicionadas partículas de outras fontes como exemplo.

A *Figura 39* apresenta duas faces de uma mesma partícula metálica de alumínio, com comprimento de aproximadamente 641 µm, ou seja, fora da especificação, que permite apenas partículas com tamanho máximo de partículas até 600 µm.

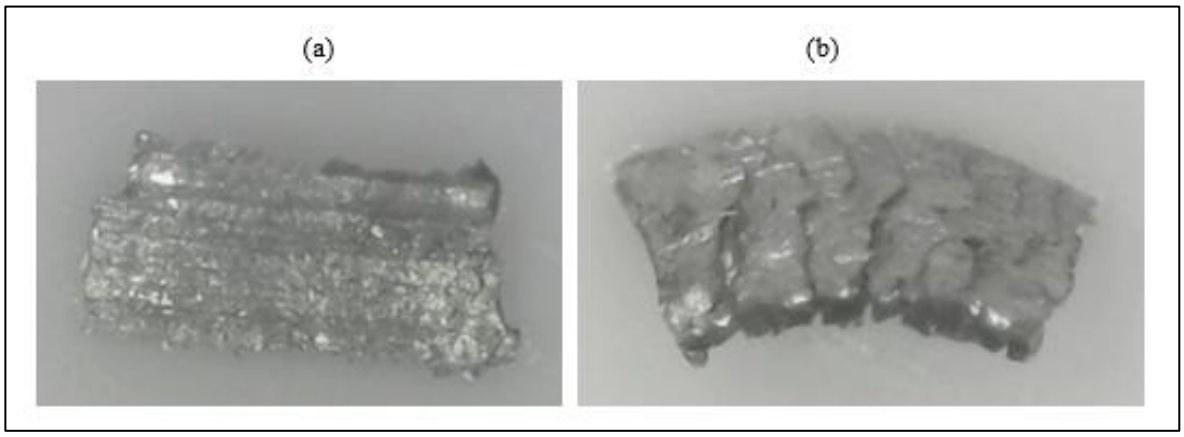


Figura 39 - Imagens de duas faces de uma partícula metálica de alumínio com dimensão superior ao limite especificado (> 600 µm)

Há indícios de que esta partícula tenha sido gerada por deformação plástica do alumínio sob a ação de tensões superiores ao seu limite elástico, resultando em fratura dúctil. Observam-se duas características morfológicas

relevantes: uma face lisa (a), com linhas contínuas paralelas ao comprimento da partícula, e uma face estriada (b). A face lisa corresponde à região plasticamente deformada pelo contato direto com outro material ou ferramenta, enquanto a face estriada é consequência desse mecanismo de deformação, não devendo ser confundida com estrias típicas de fadiga mecânica.

A análise ao processo produtivo destacou três possíveis causas: O corte da peça pode ter removido mais do que apenas rebarba e arrastado algum material das paredes da peça, a partícula pode ser uma limalha de maquinação não removida ou pode ter sido criada durante a utilização do gabarito de verificação de furo, uma vez que o gabarito é utilizado após a lavagem, ou seja, se o pino de aço do gabarito cisalhar com as paredes internas do furo e gerar partículas, existe o risco de que a partícula permaneça retida no interior do furo e seja posteriormente liberada apenas pela ação do líquido de ensaio de partículas ou pelo manuseio da peça após a embalagem. Adicionalmente, existem evidências prévias de que o uso do gabarito está associado a este modo de falha.

A *Figura 40* apresenta duas partículas distintas de alumínio, encontradas no mesmo filtro de análise, a partícula (1) apresenta comprimento de aproximadamente 2099 µm, enquanto a partícula (2) apresenta comprimento de aproximadamente 1500 µm, ambas com tamanho maior do que o máximo especificado.

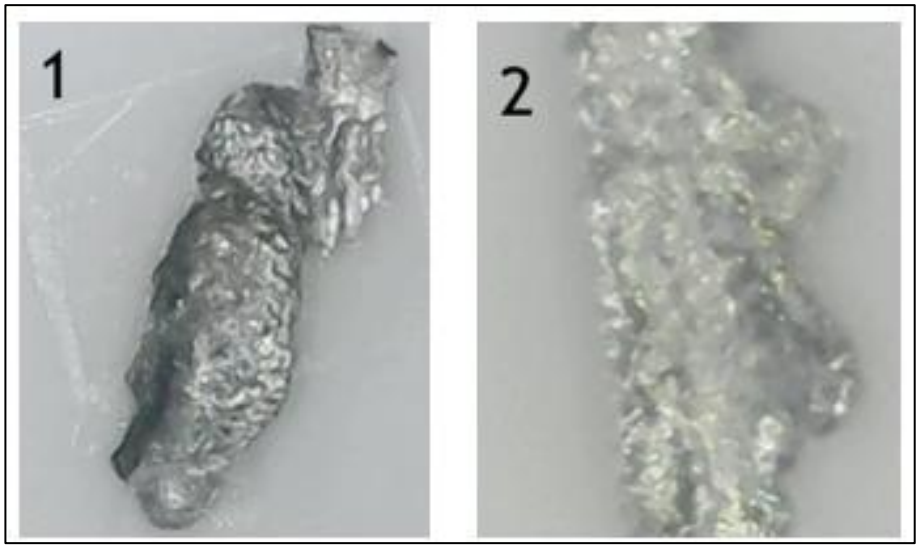


Figura 40 - Partículas metálicas porosas

A análise morfológica das partículas sugere que elas se originam de uma região da peça com elevada porosidade. A observação microscópica evidenciou alta porosidade e um perfil irregular compatível com esse tipo de estrutura. Para validação, foi analisada uma peça da produção corrente, na qual se identificou, por microscopia, uma região com morfologia porosa equivalente à da partícula, localizada na área de bolsa de ar, como demonstrado na *Figura 41*.

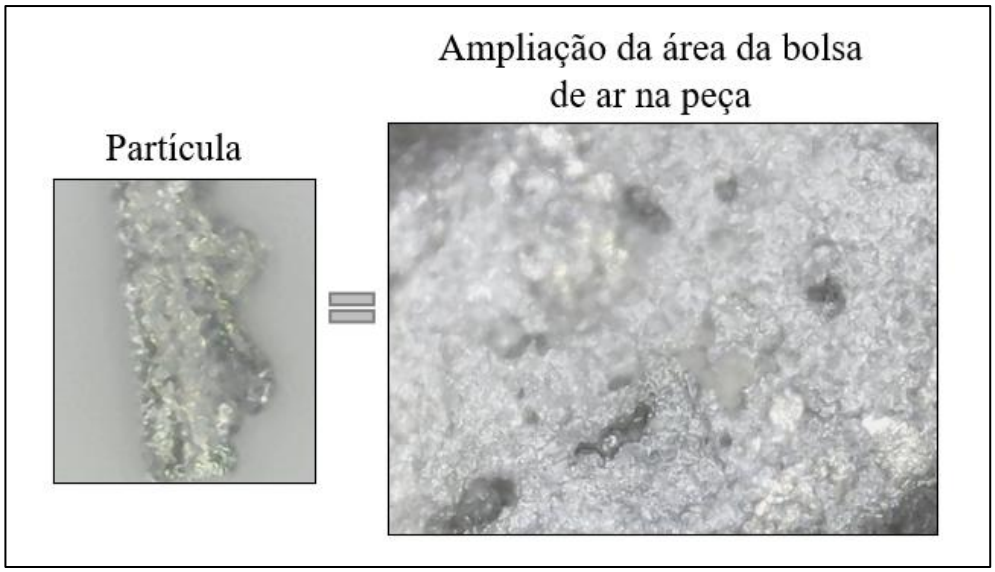


Figura 41 - Comparação entre a morfologia da partícula metálica porosa com a morfologia da superfície do componente na área das bolsas de ar

Considerando que partículas geradas durante o corte dessa região dificilmente permaneceriam aderidas à peça após sucessivas etapas de lavagem e limpeza com ar comprimido, avaliou-se a interação entre as áreas com bolsas de ar e a embalagem final. Constatou-se que aproximadamente 40% dessas áreas entram em atrito com a embalagem após o acondicionamento, configurando um mecanismo plausível de desgaste superficial e de elevada liberação de partículas.

A *Figura 42* apresenta uma imagem capturada de uma peça removida da embalagem de envio final, com foco e ampliação na região das bolsas de ar, na qual são observadas evidências claras de cisalhamento entre a embalagem e a peça.

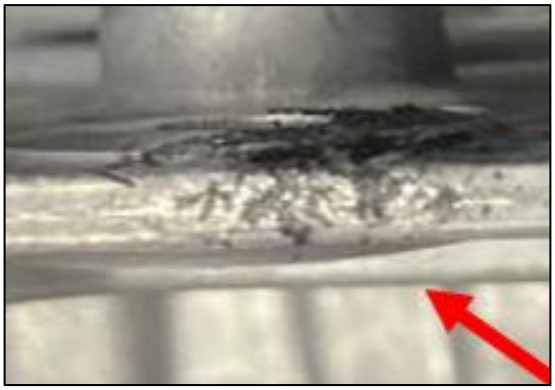


Figura 42 – Evidências no componente de cisalhamento com a embalagem

Esse mecanismo, além de provocar o desprendimento de partículas metálicas da própria peça, uma vez que a região das bolsas de ar, devido à sua porosidade, apresenta maior fragilidade frente a esse tipo de solicitação mecânica, também pode provocar o desprendimento de partículas não metálicas provenientes da embalagem, conforme *Figura 43,* que demonstra exemplos de partículas não metálicas, com comprimento > 1000 µm, provenientes da embalagem, encontradas nos filtros das análises. Este tipo de partículas não metálicas está presente em quase a totalidade dos filtros analisados, e comumente possui tamanho acima da especificação.

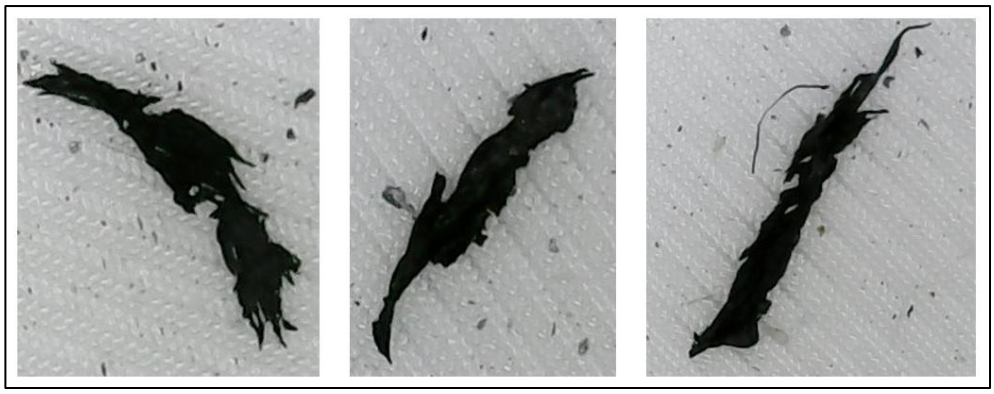


Figura 43 - Partículas não metálicas provenientes da embalagem

Inicialmente, identificou-se a presença de partículas azuis nos filtros analisados, conforme ilustrado na *Figura 44*, que apresenta três exemplos representativos dessas partículas com dimensões superiores a 600 µm. No momento da identificação inicial, a origem dessas partículas não era conhecida.



Figura 44 - Partículas não metálicas azuis

Entretanto, após a realização da formação em limpeza técnica com os operadores envolvidos no processo, os próprios operadores indicaram uma possível causa raiz relacionada às caixas utilizadas numa etapa de lavagem intermediária após o processo de maquinação. Verificou-se que essas caixas apresentavam desgaste significativo em suas superfícies internas, favorecendo a liberação de partículas plásticas azuis, conforme indicado na *Figura 45*.

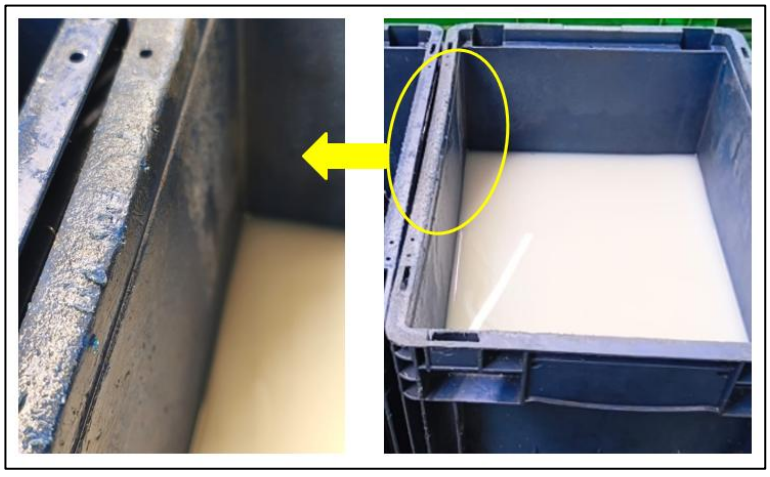


Figura 45 - Fonte de partículas azuis

Adicionalmente, foi reportado que algumas dessas partículas encontravam-se presas em regiões de mau enchimento das peças, conforme evidenciado na *Figura 46*, a qual demonstra a aderência de partículas azuis ao defeito superficial da peça.



Figura 46 - Partícula azul não metálica aderida a um mau enchimento na peça

A *Figura 47* apresenta partículas cuja morfologia e composição são compatíveis com material proveniente de paletes de madeira. Apesar de este tipo de material não ser o mais adequado do ponto de vista da limpeza técnica, a sua utilização integra os requisitos de embalagem definidos pelo cliente. Ainda assim, a presença recorrente destas partículas nos resultados de análise evidencia um impacto claro do sistema de embalagem na contaminação global do componente, refletindo-se diretamente nos relatórios de limpeza técnica. Este facto reforça a importância de considerar a adoção de medidas mitigadoras sempre que possível, de forma a reduzir a transferência de partículas provenientes das paletes para o produto.

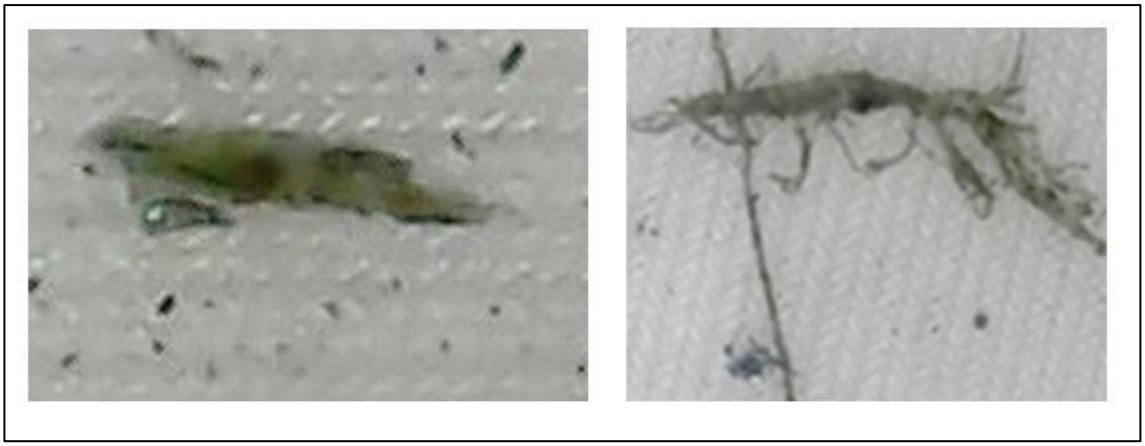


Figura 47 - Partícula de madeira

Embora as fibras não sejam um requisito de conformidade para esta amostra, a quantidade de fibras encontrada nos filtros analisados é significativa. Em alguns filtros, conforme demonstra a *Figura 48*, observa-se supersaturação de fibras (a), o que pode causar, em situações mais severas, o aumento da massa total do filtro, parâmetro que é um requisito desta peça, ou a aglomeração de partículas e fibras num emaranhado composto por partículas de diferentes classes e tipos (b).

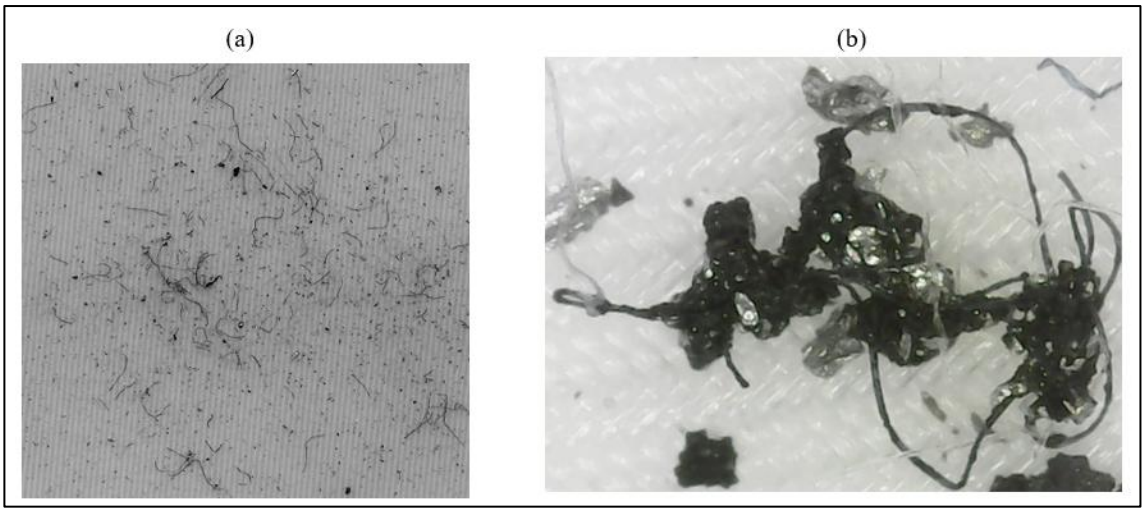


Figura 48 – Filtro com supersaturação de fibras (a) e aglomeração de partículas e fibras (b)

Essa condição pode resultar em erro de leitura, uma vez que o sistema de leitura pode interpretar o emaranhado como uma única partícula de grande dimensão. Além disso, caso seja identificado o reflexo de qualquer partícula metálica, mesmo que de granulometria irrelevante frente aos requisitos, o programa poderá classificar todo o emaranhado como uma partícula metálica, que é a classe mais restritiva em termos de quantidade permitida, podendo gerar uma falsa não conformidade. Sendo assim, é necessário também, mesmo que em segundo plano, focar esforços para a diminuição de fibras neste componente.

Uma quantidade considerável das fibras reportadas nas análises apresenta coloração azul, como pode ser visto na *Figura 49,* o que sugere que o uniforme fornecido pela empresa aos operadores, também de cor azul, contribui para a incidência destas fibras.

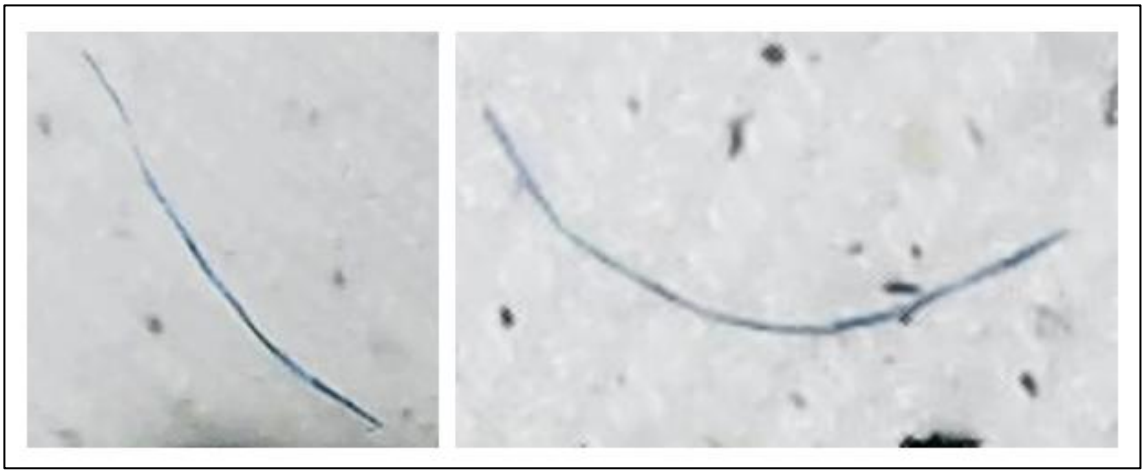


Figura 49 - Fibras azuis

Observa-se que os operadores responsáveis pela inspeção e lavagem desta peça utilizam as mesmas vestimentas dos operadores do processo de injeção, não havendo diferenciação ou adequação específica para aqueles que manipulam a peça após o processo de limpeza, etapa na qual a peça já deve seguir os requisitos de partículas do componente.

Adicionalmente, essas fibras podem ter origem em vestimentas de *jeans*, que apresentam coloração semelhante, uma vez que alguns operadores utilizam esse tipo de vestimenta. Tais situações ocorrem devido à ausência de regras rigorosas de vestimenta e ao fornecimento, pela empresa, de vestimenta que libera muitas

fibras. Diante desse cenário, para reduzir a incidência de fibras neste componente, recomenda-se a implementação de uniformes diferenciados para os operadores que manipulam peças após lavagem, bem como o estabelecimento de diretrizes de vestimenta, rigorosas e formalmente definidas.

A *Figura 50* apresenta duas partículas com elevada probabilidade de serem provenientes de atividades de retrabalho, especificamente do processo de remoção de rebarbas. A morfologia e o aspecto superficial dessas partículas são compatíveis com material gerado por operações mecânicas localizadas.

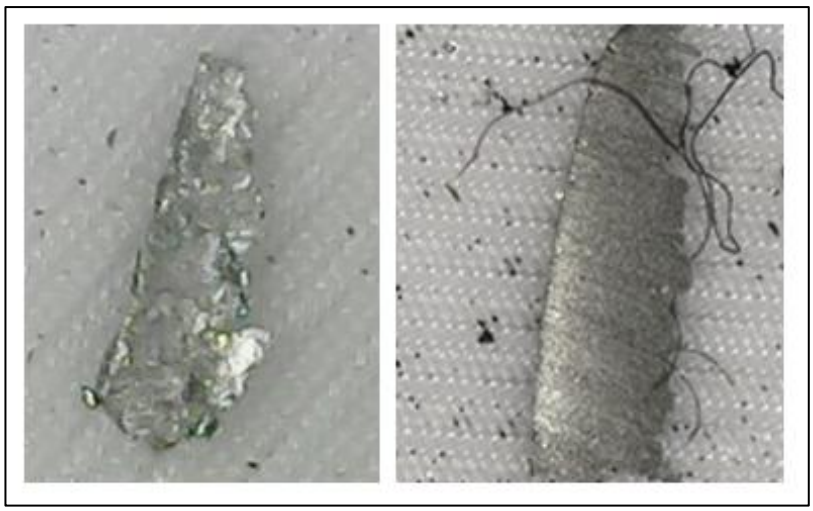


Figura 50 - Partículas metálicas com elevada probabilidade de serem provenientes de atividades de retrabalho

Essa evidência indica que o processo de lavagem pode não ser eficiente na remoção desse tipo de partícula de forma eficaz ou, alternativamente, que atividades pontuais de remoção de rebarbas estejam sendo realizadas após a etapa de lavagem. Ambas as hipóteses representam um risco para o atendimento aos requisitos de limpeza e, portanto, devem ser devidamente investigadas, com foco na verificação da sequência do processo, da eficácia da lavagem e do controlo de eventuais retrabalhos pós-limpeza.

A *Figura 51* apresenta partículas com dimensões superiores a 1.000 µm, cuja morfologia é característica de limalhas provenientes do processo de maquinação. Observam-se fragmentos alongados, com arestas vivas e aspeto metálico, compatíveis com cavacos gerados durante operações de maquinação. A presença dessas partículas indica contaminação associada ao processo de maquinação e reforça a necessidade de avaliar a eficácia desta etapa do processo e das etapas subsequentes de limpeza.



Figura 51 - Partículas metálicas com morfologia característica de limalhas provenientes do processo de maquinação.

A *Figura 52* evidencia diferenças morfológicas claras entre rebarbas provenientes do processo de maquinação e aquelas originadas de operações de retrabalho manual.

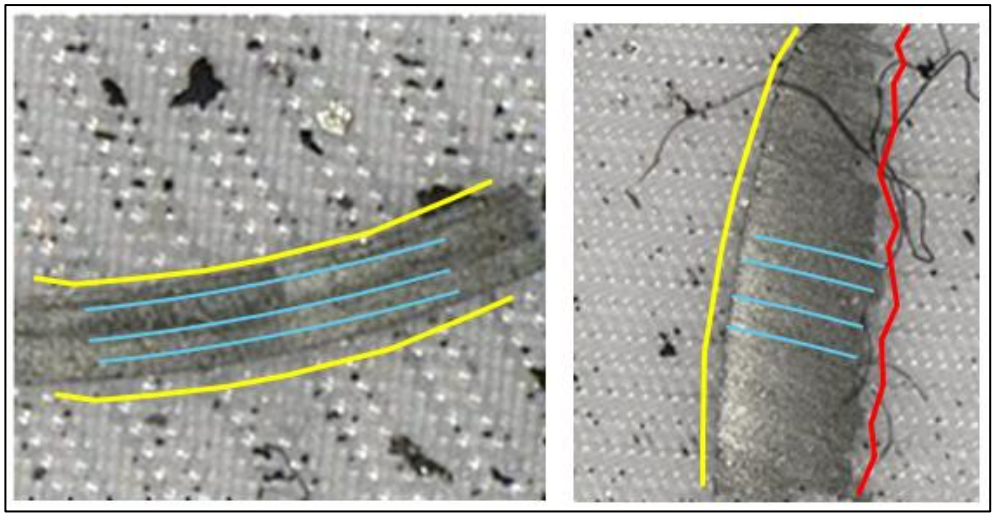


Figura 52 – Diferenças entre rebarbas provenientes do processo de maquinação e aquelas originadas de operações de retrabalho manual

As rebarbas geradas durante a maquinação apresentam contornos relativamente regulares e contínuos, com geometria alongada e curvatura homogênea, conforme indicado pelas linhas amarelas. Observam-se, ainda, marcas longitudinais paralelas ao eixo principal da partícula, destacadas pelas linhas azuis, que correspondem às trajetórias da ferramenta de corte. Essas linhas internas são típicas de cavacos formados sob condições estáveis de corte, refletindo parâmetros constantes de velocidade, avanço e profundidade.

Em contrapartida, as rebarbas oriundas de retrabalho, como operações manuais de remoção de rebarbas por ferramentas abrasivas, apresentam contornos irregulares, descontínuos e assimétricos, de um lado, conforme indicado pela linha vermelha, mas um contorno contínuo do lado oposto, aonde há o destacamento da rebarba pela ferramenta. Nesse caso, as superfícies mostram ausência de paralelismo nas marcas internas, além de variações abruptas de espessura e geometria, características de esforços não uniformes e de contato intermitente típicos de intervenções manuais.

Dessa forma, a combinação entre contorno externo, regularidade geométrica e perfil de linhas internas, permite diferenciar, com elevado grau de confiabilidade, partículas oriundas da maquinação daquelas geradas em etapas de retrabalho. Essa distinção é fundamental para a correta identificação da origem da contaminação e para o direcionamento das ações corretivas no processo produtivo.

A análise microscópica crítica revelou-se um complemento fundamental à análise estatística, permitindo uma interpretação mais aprofundada e contextualizada dos respetivos resultados. Esta abordagem possibilitou a explicação de algumas lacunas identificadas na análise estatística, não por insuficiência ou falta de robustez dos métodos utilizados, mas por evidenciar a influência de áreas e fatores adicionais que não estavam inicialmente contemplados como variáveis no modelo estatísticas, tais como, maquinação, retrabalho e aspetos relativos à embalagem e desgaste de material.

Considerando a elevada complexidade do processo e a grande quantidade de fatores potenciais capazes de influenciar a contagem de partículas, a análise microscópica permitiu identificar mecanismos de geração e fontes de contaminação que dificilmente seriam captados exclusivamente por métodos estatísticos.

Em síntese, a utilização conjunta de análises estatísticas e microscópicas demonstrou ser um instrumento poderoso para a tomada de decisão baseada em dados, proporcionando uma visão integrada do processo e suportando de forma mais eficaz a definição de ações de melhoria sustentadas.

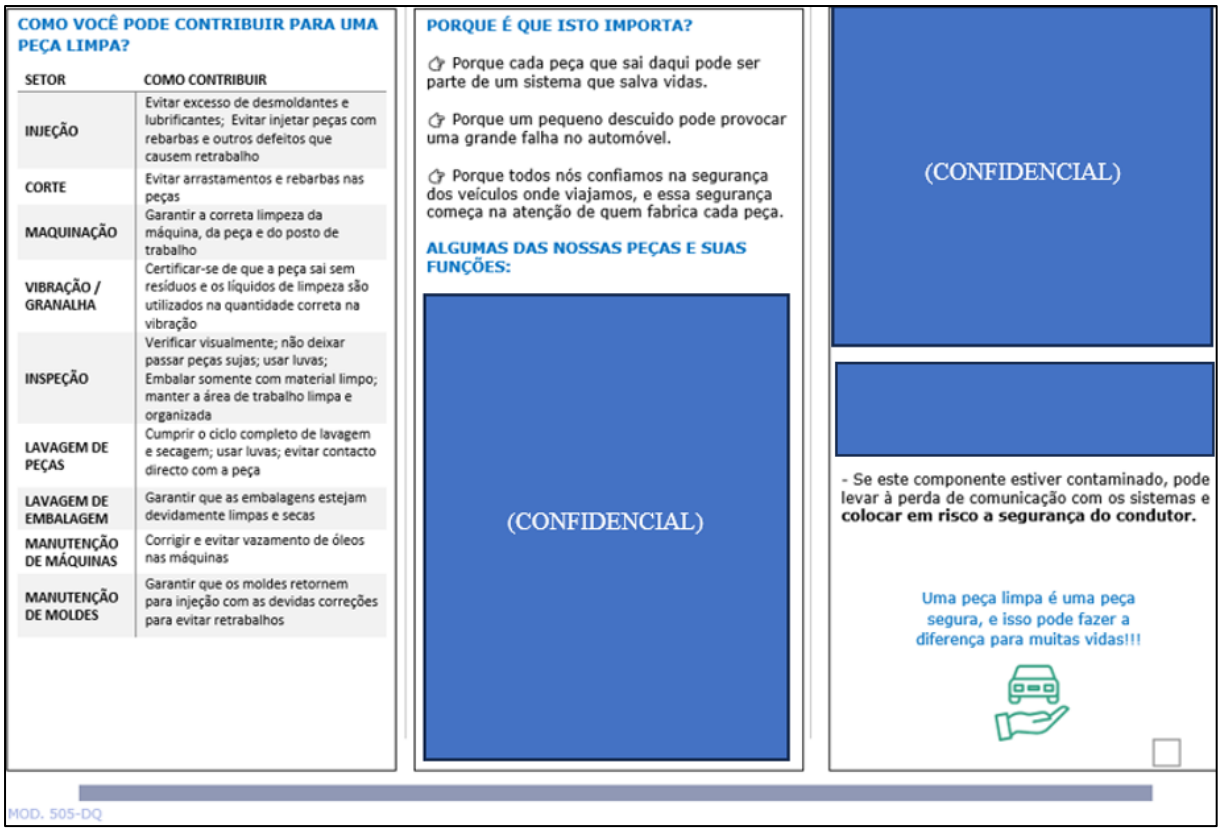
4.7 AÇÕES DE MELHORIA

Este tópico dedica-se à apresentação e descrição das ações de melhoria implementadas no âmbito da melhoria nos resultados de limpeza técnica. As ações tiveram como base os resultados da auditoria efetuada antes das ações de melhoria, os resultados das análises estatísticas e microscópicas, as solicitações do cliente e os contributos dos colaboradores.

A primeira ação de melhoria implementada teve como referência as diretrizes da norma VDA 19.2, que enfatiza o papel crítico da qualificação e sensibilização dos recursos humanos na prevenção da contaminação ao longo do processo produtivo. Com base nesta orientação, foi desenvolvido e distribuído um folheto de sensibilização dirigido aos operadores e chefes de área das diferentes áreas produtivas, com o objetivo de reforçar a compreensão do conceito de limpeza técnica, dos riscos associados à contaminação por partículas e da responsabilidade individual na sua prevenção. O material procurou transmitir, de forma acessível, os princípios definidos na VDA 19.2 relativamente à consciencialização, formação e disciplina operacional, destacando exemplos de partículas típicas, consequências potenciais para a segurança funcional dos componentes automóveis e boas práticas específicas por setor produtivo. Por motivos de confidencialidade entre cliente e fornecedor, algumas informações técnicas e referências a aplicações finais foram omitidas na versão apresentada neste trabalho, conforme *Figuras 53-54.*



Figura 53 - Material de sensibilização e formação em limpeza técnica (Páginas 1-3)



COMO VOCÊ PODE CONTRIBUIR PARA UMA PEÇA LIMPA?

SETOR	COMO CONTRIBUIR
INJEÇÃO	Evitar excesso de desmoldantes e lubrificantes; Evitar injetar peças com rebarbas e outros defeitos que causem retrabalho
CORTE	Evitar arrastamentos e rebarbas nas peças
MAQUINAÇÃO	Garantir a correta limpeza da máquina, da peça e do posto de trabalho
VIBRAÇÃO / GRANALHA	Certificar-se de que a peça sai sem resíduos e os líquidos de limpeza são utilizados na quantidade correta na vibração
INSPEÇÃO	Verificar visualmente; não deixar passar peças sujas; usar luvas; Embalar somente com material limpo; manter a área de trabalho limpa e organizada
LAVAGEM DE PEÇAS	Cumprir o ciclo completo de lavagem e secagem; usar luvas; evitar contacto directo com a peça
LAVAGEM DE EMBALAGEM	Garantir que as embalagens estejam devidamente limpas e secas
MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS	Corrigir e evitar vazamento de óleos nas máquinas
MANUTENÇÃO DE MOLDES	Garantir que os moldes retornem para injeção com as devidas correções para evitar retrabalhos

PORQUE É QUE ISTO IMPORTA?

Porque cada peça que sai daqui pode ser parte de um sistema que salva vidas.

Porque um pequeno descuido pode provocar uma grande falha no automóvel.

Porque todos nós confiamos na segurança dos veículos onde viajamos, e essa segurança começa na atenção de quem fabrica cada peça.

ALGUMAS DAS NOSSAS PEÇAS E SUAS FUNÇÕES:

(CONFIDENCIAL)

(CONFIDENCIAL)

- Se este componente estiver contaminado, pode levar à perda de comunicação com os sistemas e **colocar em risco a segurança do condutor.**

Uma peça limpa é uma peça segura, e isso pode fazer a diferença para muitas vidas!!!

MOD. 505-DQ

Figura 54 - Material de sensibilização e formação em limpeza técnica (Páginas 4-6)

O documento foi formalmente codificado e integrado no plano de formação da empresa, bem como no programa de acolhimento de novos colaboradores. Desta forma, assegura-se que os colaboradores ingressam na organização com uma compreensão inicial estruturada sobre a limpeza técnica, promovendo desde o início uma cultura alinhada com o tema.

De forma a complementar as ações no âmbito de sensibilização dos recursos humanos, realizou-se uma ação de formação em 5S dirigida aos chefes de área e a operadores-chave da empresa. Esta iniciativa teve como principal objetivo reativar e reforçar a sensibilização para os princípios de organização, limpeza, disciplina, normalização e manutenção das condições operacionais, fundamentais para o controlo de contaminação e para a estabilidade dos processos produtivos.

Não obstante, a VDA 19.2 destaca que a limpeza geral do ambiente de fabrico constitui um fator de suporte fundamental à limpeza técnica, nomeadamente através da promoção de comportamentos adequados e de uma mentalidade orientada para a disciplina, organização e prevenção por parte do pessoal envolvido. Neste contexto, a implementação de práticas como o 5S assume um papel estruturante, funcionando como elemento facilitador para a consolidação de uma cultura organizacional alinhada com os requisitos da limpeza técnica definidos na VDA 19.2.

Atendendo à dimensão da empresa e à complexidade dos seus processos, a implementação do sistema 5S foi definida para ser realizada de forma faseada. A fase inicial incidiu sobre a área de injeção, por se tratar de uma das duas áreas que apresentaram os piores resultados na auditoria efetuada, bem como por constituir o núcleo central do processo produtivo, uma vez que é nesta etapa que a peça é gerada. Nas estatísticas inferenciais, muitas variáveis deste processo se mostraram significativas em várias classes de partículas.

A escolha estratégica desta área visa maximizar o impacto das ações de melhoria, promovendo condições mais controladas desde a origem do produto e contribuindo para a redução da geração e propagação de partículas ao longo das etapas subsequentes do processo.

Na análise microscópica foi identificado um fator de risco associado ao gabarito de verificação de furos utilizado após a etapa de lavagem, o qual apresentava elevado potencial para a geração de partículas. Como ação de melhoria, foi implementada a alteração da sequência do processo, passando a utilizar o referido gabarito antes da operação de lavagem. Esta medida permite mitigar o risco previsto, assegurando que as partículas potencialmente geradas pelo contacto com o gabarito sejam removidas na etapa subsequente de lavagem, contribuindo para o cumprimento dos requisitos de limpeza técnica.

Adicionalmente, como resultado da análise microscópica, foi referido que a operação de corte da peça poderá ter removido mais do que apenas a rebarba, promovendo igualmente o arrastamento de material das paredes da própria peça. Face a este risco, o fenómeno de arrastamento de material, que anteriormente dispunha de um limite de aceitação definido durante o setup do processo, passou a ser considerado de tolerância zero. Assim, nenhuma peça pode ser validada pela inspeção da qualidade caso apresente qualquer tipo de arrastamento de material, independentemente de este ser provocado por efeitos associados à injeção ou pela ferramenta de corte.

Com base na análise de causa-efeito apresentada no diagrama de Ishikawa, orientada pelas análises estatísticas, foi iniciado um trabalho estruturado com a implementação de moldes *backup*, permitindo que um molde possa ser retirado de produção de forma imediata sempre que seja identificada a necessidade de intervenção de manutenção, e não apenas quando tal seja viável do ponto de vista da disponibilidade produtiva. Esta abordagem introduz maior flexibilidade operacional e reduz o risco de degradação progressiva do estado do molde em operação.

Neste contexto, o conceito de manutenção deixou de estar baseado exclusivamente em intervalos fixos de ciclos e passou a ser definido por critérios de condição e necessidade real de correção. As intervenções são agora desencadeadas sempre que se observam indícios de degradação funcional, como formação de rebarba, microfissuras ou aumento da geração de partículas metálicas, ocorrendo, de forma sistemática, antes dos limites de ciclo previamente estabelecidos. Esta mudança contribui para um controlo mais eficaz da variabilidade do processo e para a mitigação das causas associadas à geração de partículas ao longo dos ciclos do molde.

A análise microscópica identificou a presença de partículas com elevada probabilidade de serem provenientes de operações de retrabalho. Em resposta a esta constatação, o retrabalho deixou de ser executado manualmente e passou a ser realizado de forma controlada no processo de maquinação. Esta alteração permitiu não só uma melhoria significativa da qualidade dimensional e superficial da peça, como também uma redução da variabilidade associada às intervenções manuais.

Adicionalmente, a transferência do retrabalho para a maquinação contribuiu para a melhoria das condições ergonómicas dos operadores e para a redução da geração de poeiras e partículas dispersas no ambiente produtivo, mitigando assim fontes adicionais de contaminação e alinhando o processo com os princípios de limpeza técnica e prevenção da geração de partículas.

Com base na análise do diagrama de causa-efeito, foram identificados como fatores diretamente relacionados com a necessidade de implementação da ação de melhoria a limpeza inadequada do ambiente da máquina de injeção, o acúmulo de resíduos metálicos no entorno dos equipamentos e a insuficiência da equipa de limpeza, enquadrados nos eixos Ambiente e Pessoal. Adicionalmente, foi evidenciada a indisponibilidade de tempo durante os períodos produtivos para a realização de limpezas profundas, fator associado ao eixo Métodos.

Estes pontos foram igualmente corroborados pelos resultados da auditoria realizada na área de injeção, a qual identificou lacunas ao nível da limpeza profunda do ambiente produtivo e dos equipamentos, associadas à limitação de recursos humanos disponíveis durante o funcionamento normal da produção.

Face a estas constatações, definiu-se a implementação de uma equipa interna dedicada à execução de limpezas profundas em períodos sem produção, nomeadamente ao fim de semana, permitindo atuar diretamente sobre as causas identificadas e reforçar o controlo da geração de partículas na área de injeção.

Com base nas informações da análise microscópica, que evidenciou a presença recorrente de partículas não metálicas provenientes da embalagem, decidiu-se implementar uma alteração no conceito de embalagem. Esta alteração teve como principal objetivo a redução das áreas de contacto e atrito entre a embalagem e as zonas mais frágeis da peça.

A otimização do sistema de embalagem permitiu minimizar os mecanismos de desgaste superficial e cisalhamento previamente identificados, resultando numa diminuição significativa da geração e transferência de partículas para o componente, conforme verificado nas análises subsequentes. Esta decisão reforça a importância da análise microscópica como ferramenta de suporte à tomada de decisão e à melhoria contínua do processo.

4.8 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS

A análise estatística descritiva das 17 amostras recolhidas após a implementação das ações de melhoria permitiu caracterizar o comportamento do processo nesta nova condição operacional. Os principais indicadores estatísticos obtidos encontram-se apresentados na *Tabela 16.*

Tabela 16 - Estatística descritiva do banco de dados após implementação de melhorias

Estatísticas	massa de partículas (g)	Total	total [150; 200[	total [200; 400[	total [400; 600[	total [600; ∞	Total metálico	total metálico [150; 200[	Total Metálico [200; 400[	Total Metálico [400; 600[	Total Metálico [600;∞
Média	1,4↓	251↓	133↓	98↓	12↓	9↓	55↓	20↓	24↑	6↓	5=
Contagem de entradas	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Mediana	1,5=	249↑	130↑	94↓	12↑	8	53↓	17↓	23↑	6↓	4=
Desvio-padrão	0,5↓	74↓	36↓	35↓	5↓	4↓	21↓	9↓	10↓	4↓	3↓
Mínimo	0,5↑	146↑	79↑	48↑	5↑	2↑	13↑	2↑	6↑	2↑	2↑
Máximo	2,3↓	413↓	214↓	172↓	25↓	18↓	95↓	35↓	42↓	17↓	16↓
Q1 (25%)	1,0↑	200↑	105↑	79↑	7=	6↑	48↑	15↑	18↑	4↑	3↑
Q2 (50%)	1,5=	249↑	130↓	94↓	12↑	8=	53↓	17↓	23↓	6↓	4=
Q3 (75%)	1,8↓	287↓	151↓	112↓	15↓	10↓	69↓	26↓	30↓	8↓	7↓
Amplitude Interquartil (AIQ)	0,8↓	87↓	46↓	33↓	8↓	4↓	21↓	11↓	12↓	4↓	4=
Assimetria	0,0↓	1=	1=	1=	1↓	0↓	0↓	0↓	0↓	2↓	2↓
Curtose	-0,9↓	0↓	0↓	0↓	0↓	0↓	0↓	0↓	0↓	4↓	5↓

4.9 CARTAS DE CONTROLO ANTES E DEPOIS

Neste tópico são apresentadas as cartas de controlo antes e depois das intervenções implementadas, com o objetivo de avaliar o comportamento do processo ao longo do tempo. A análise comparativa permite verificar a evolução da estabilidade e da variabilidade do processo, bem como identificar eventuais alterações associadas às ações de melhoria introduzidas, mantendo uma abordagem alinhada com a interpretação industrial dos resultados.

4.9.1 MASSA

A *Figura 55* apresenta a carta de controlo I–AM (Individuais e Amplitude Móvel) aplicada à massa de partículas (g), com o objetivo de avaliar o impacto das ações de melhoria implementadas no processo, através da comparação entre os períodos antes e depois das intervenções.

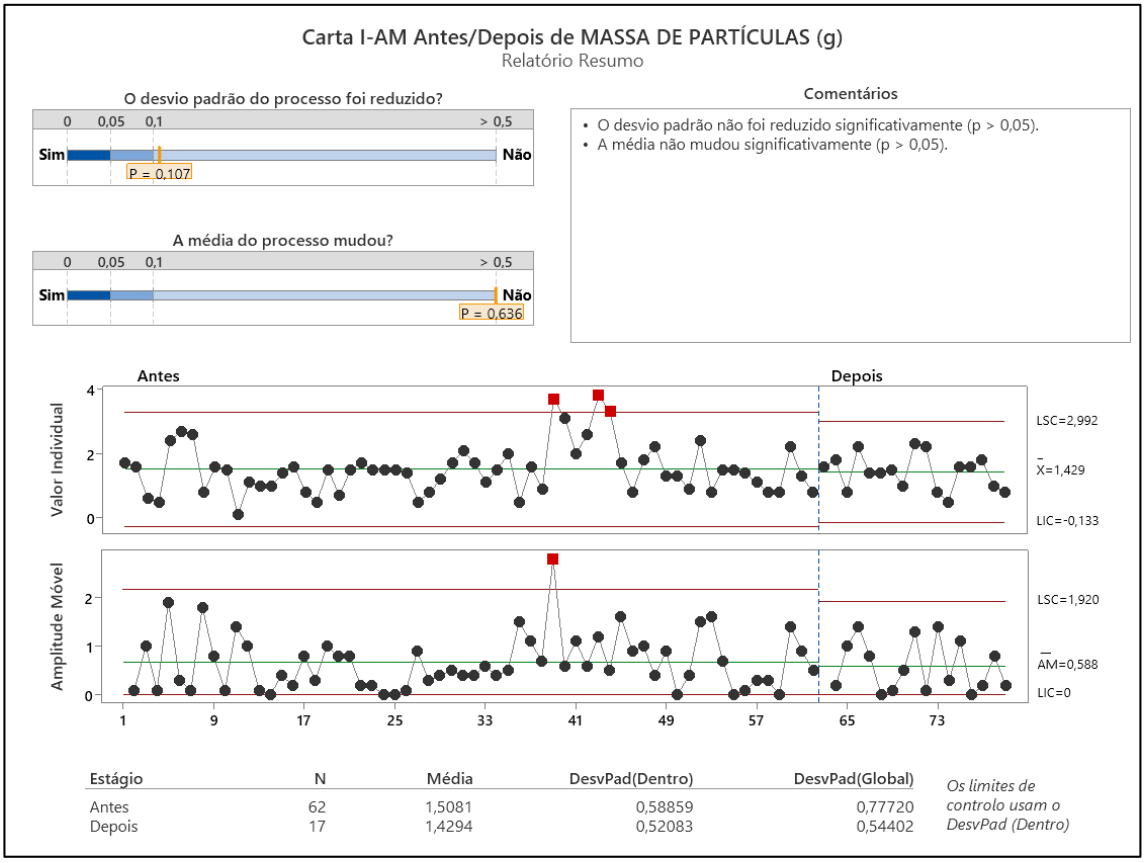


Figura 55 - Carta de controlo I–AM da massa de partículas antes e após a implementação das ações de melhoria

Relativamente à posição central do processo, observa-se que a média da massa de partículas não sofreu uma alteração estatisticamente significativa após a implementação das melhorias. A média passou de 1,5081 g no período "antes" para 1,4294 g no período "depois", variação que, apesar de indicar uma ligeira redução, não é estatisticamente relevante ao nível de significância de 5%. Este resultado sugere que as ações implementadas não tiveram como efeito principal o deslocamento da média do processo, mas sim a estabilização do seu comportamento.

Quanto à variabilidade, a análise indica que a redução do desvio padrão dentro do processo, de 0,5886 para 0,5208, bem como a redução do desvio padrão global, de 0,7772 para 0,5440, não são estatisticamente significativas. Ainda assim, estes resultados indicam uma tendência de melhoria na consistência do processo, refletindo uma menor dispersão dos valores individuais após as ações de melhoria.

A inspeção visual da carta I evidencia que, no período “antes”, ocorreram pontos fora de controlo estatístico, assinalados na região superior da carta, indicando episódios pontuais de aumento anómalo da massa de partículas. No período “depois”, esses comportamentos deixam de se verificar, sendo os pontos observados mais homogéneos e distribuídos dentro dos limites de controlo, o que sugere um processo mais estável e previsível.

De forma complementar, a carta de Amplitude Móvel (AM) mostra uma redução da variabilidade entre observações consecutivas após as melhorias, com menor frequência de picos elevados de amplitude. Este comportamento reforça a evidência de uma redução da variabilidade de curto prazo, ainda que insuficiente para ser considerada estatisticamente significativa com o tamanho amostral disponível.

Em síntese, os resultados indicam que as ações de melhoria implementadas contribuíram para uma maior estabilidade operacional do processo, reduzindo a ocorrência de variações extremas e promovendo um comportamento mais consistente da massa de partículas. No entanto, não se observaram alterações estatisticamente significativas na média nem na variabilidade, o que pode ser parcialmente explicado pelo número reduzido de observações no período pós-melhoria (n = 17). Estes resultados reforçam a necessidade de monitorização contínua do processo, de modo a confirmar, com maior robustez estatística, a sustentabilidade das melhorias implementadas.

4.9.2 TOTAL (METÁLICO E NÃO METÁLICO)

A *Figura 56* apresenta a carta de controlo I–AM à quantidade de partículas totais, consideradas metálicas e não metálicas, no intervalo entre 150 e 200µm, com o objetivo de avaliar o impacto das ações de melhoria implementadas no processo, através da comparação entre os períodos antes e depois das intervenções.

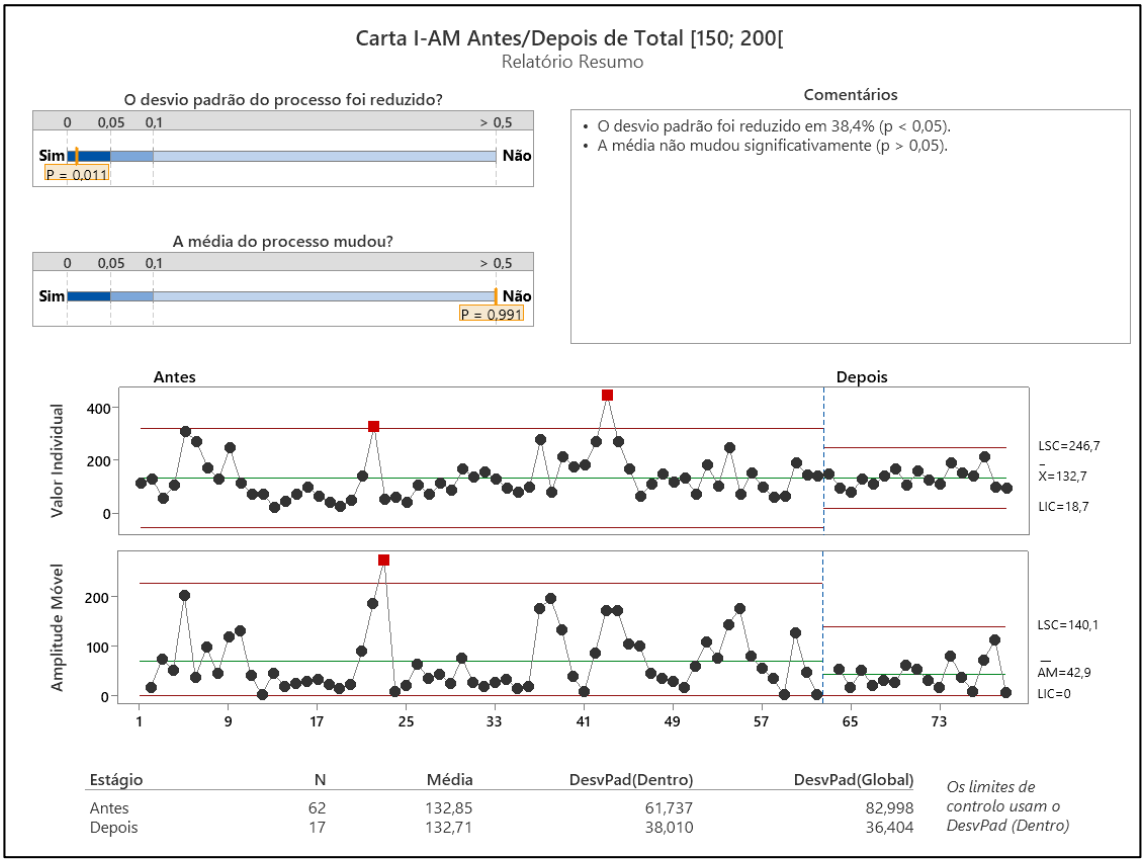


Figura 56 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica de 150–200 µm, antes e após as ações de melhoria

Os resultados indicam que a variabilidade do processo foi significativamente reduzida após as melhorias, observando-se uma diminuição de 38,4% no desvio padrão dentro do processo. O desvio padrão passou de 61,737 no período "antes" para 38,010 no período "depois", evidenciando uma melhoria estatisticamente significativa na consistência do processo.

Por outro lado, a média do processo não apresentou alteração estatisticamente significativa, mantendo-se praticamente inalterada entre os dois períodos (132,85 antes e 132,71 depois). Este resultado indica que as ações implementadas atuaram predominantemente na redução da variabilidade, sem provocar um deslocamento da posição central do processo.

A análise visual da carta I revela que, no período anterior às melhorias, ocorreram pontos fora dos limites de controlo, refletindo episódios pontuais de elevada contaminação por partículas nesta classe dimensional. No período posterior, observa-se um comportamento mais estável, com os valores concentrados dentro dos limites de controlo e menor dispersão.

De forma consistente, a carta de Amplitude Móvel evidencia uma redução clara da variabilidade de curto prazo após a intervenção, com diminuição da frequência e da magnitude das amplitudes elevadas, reforçando a conclusão de que o processo se tornou mais estável e previsível.

Em síntese, os resultados demonstram que as ações de melhoria implementadas foram eficazes na redução da variabilidade do número de partículas na classe [150; 200[µm, contribuindo para um maior controlo do processo, ainda que sem impacto significativo na média do processo.

A *Figura 57* apresenta a carta de controlo I–AM à quantidade de partículas totais, consideradas metálicas e não metálicas, no intervalo entre 200 e 400µm, com o objetivo de avaliar o impacto das ações de melhoria implementadas no processo, através da comparação entre os períodos antes e depois das intervenções.

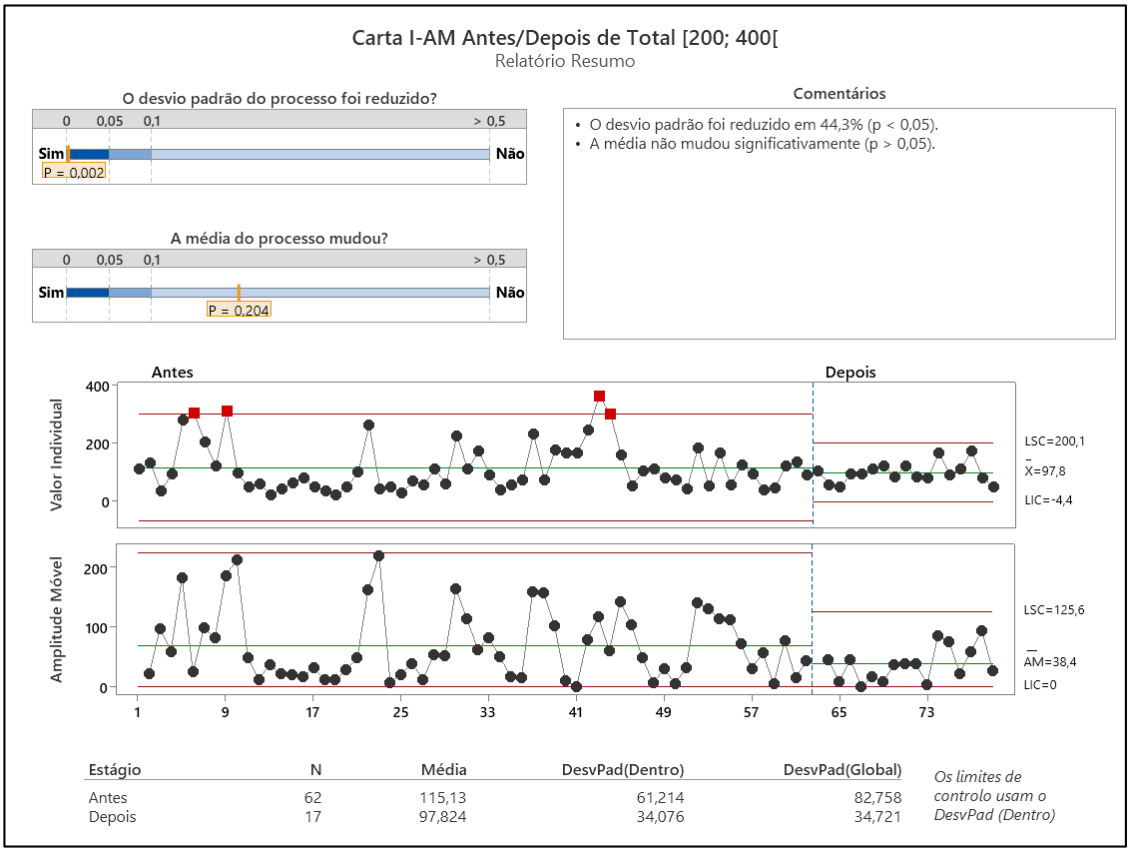


Figura 57 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica de 200–400 µm, antes e após as ações de melhoria

Observa-se que, após ações de melhoria, o desvio padrão do processo foi significativamente reduzido em 44,3%, evidenciando uma redução da variabilidade. Em contraste, não se verificou alteração estatisticamente significativa da média do processo, o que indica que as ações implementadas não deslocaram o nível central do processo, mas atuaram predominantemente na sua estabilização.

A análise gráfica reforça esta conclusão, uma vez que, na fase "Depois", se observa uma menor amplitude móvel, bem como a ausência de pontos fora dos limites de controlo, quando comparada com a fase "Antes", onde se identificam episódios de maior instabilidade e ocorrências de causas especiais. Adicionalmente, a redução do desvio padrão dentro do processo (de 61,214 para 34,076) e do desvio padrão global (de 82,758 para 34,721) aponta para uma melhoria consistente na repetibilidade do processo.

Em síntese, os resultados demonstram que as ações de melhoria tiveram um impacto positivo e estatisticamente significativo na variabilidade do processo para a classe de partículas [200; 400[µm, reforçando a importância do controlo destas classes intermédias de partículas, previamente identificadas como críticas na análise descritiva e no gráfico de Pareto.

A *Figura 58* apresenta a carta de controlo I–AM relativa ao número total de partículas na classe de comprimento [400; 600[µm, permitindo comparar o desempenho do processo antes e após a implementação das ações de melhoria.

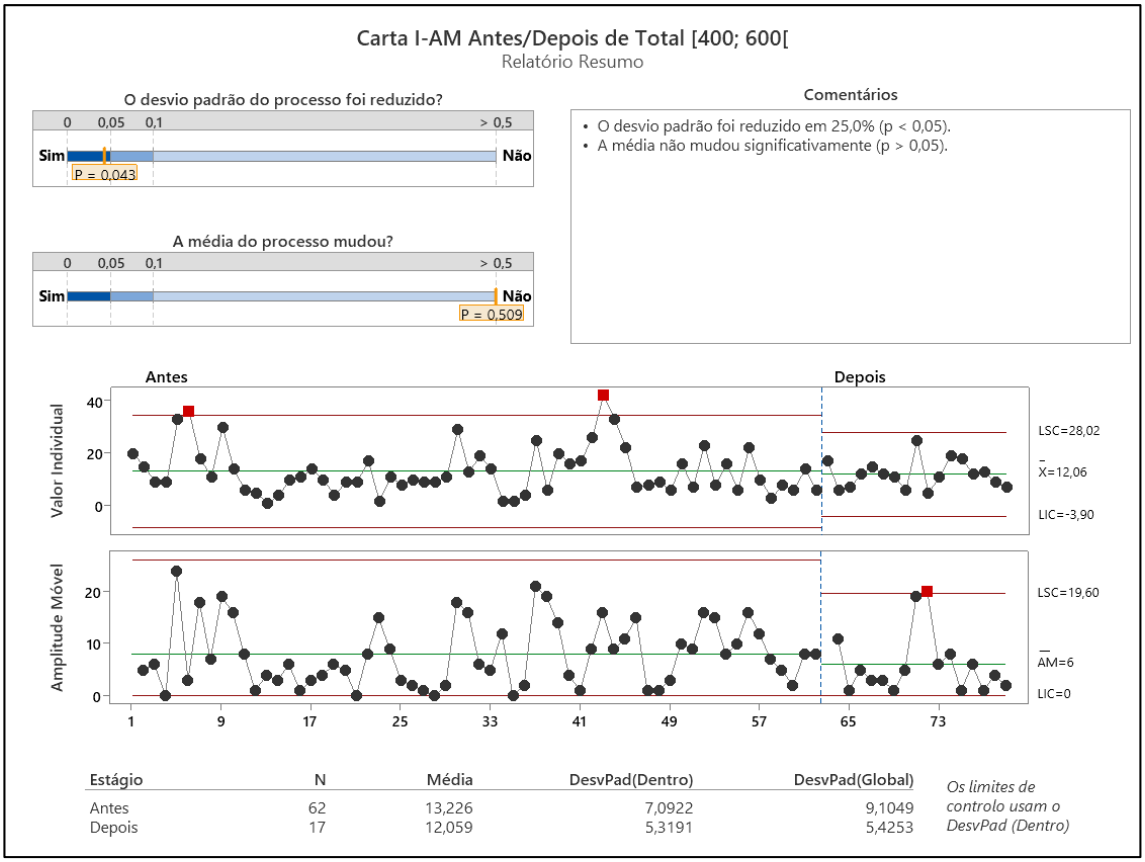


Figura 58 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica de 400–600 µm, antes e após as ações de melhoria

Os resultados indicam que o desvio padrão do processo foi reduzido em 25,0%, sendo esta redução estatisticamente significativa, o que evidencia uma diminuição relevante da variabilidade do processo nesta classe de partículas.

Por outro lado, não se observou uma alteração estatisticamente significativa da média do processo, sugerindo que as ações implementadas não provocaram um deslocamento do nível central, mas atuaram essencialmente na redução da dispersão dos resultados. Esta conclusão é consistente com a diminuição do desvio padrão dentro do processo (de 7,092 para 5,319) e do desvio padrão global (de 9,105 para 5,425).

A análise gráfica corrobora estes resultados, evidenciando, na fase "Depois", uma menor amplitude móvel e uma maior concentração dos pontos em torno da média, quando comparada com a fase "Antes", onde se identificam maiores flutuações e a presença de pontos associados a causas especiais. Apesar de se observar pontualmente um valor elevado na amplitude móvel após a intervenção, o comportamento global do processo revela-se mais estável.

Em síntese, os resultados demonstram que as ações de melhoria contribuíram para uma redução estatisticamente significativa da variabilidade no número de partículas da classe [400; 600[µm, ainda que com impacto limitado na média do processo.

A *Figura 59* apresenta a carta de controlo I-AM para o número total de partículas com dimensão superior a 600 µm, comparando o comportamento do processo antes e depois da implementação das ações de melhoria. Esta classe corresponde às partículas de maior dimensão, que, embora menos frequentes, são criticamente relevantes do ponto de vista funcional e de risco para o produto.

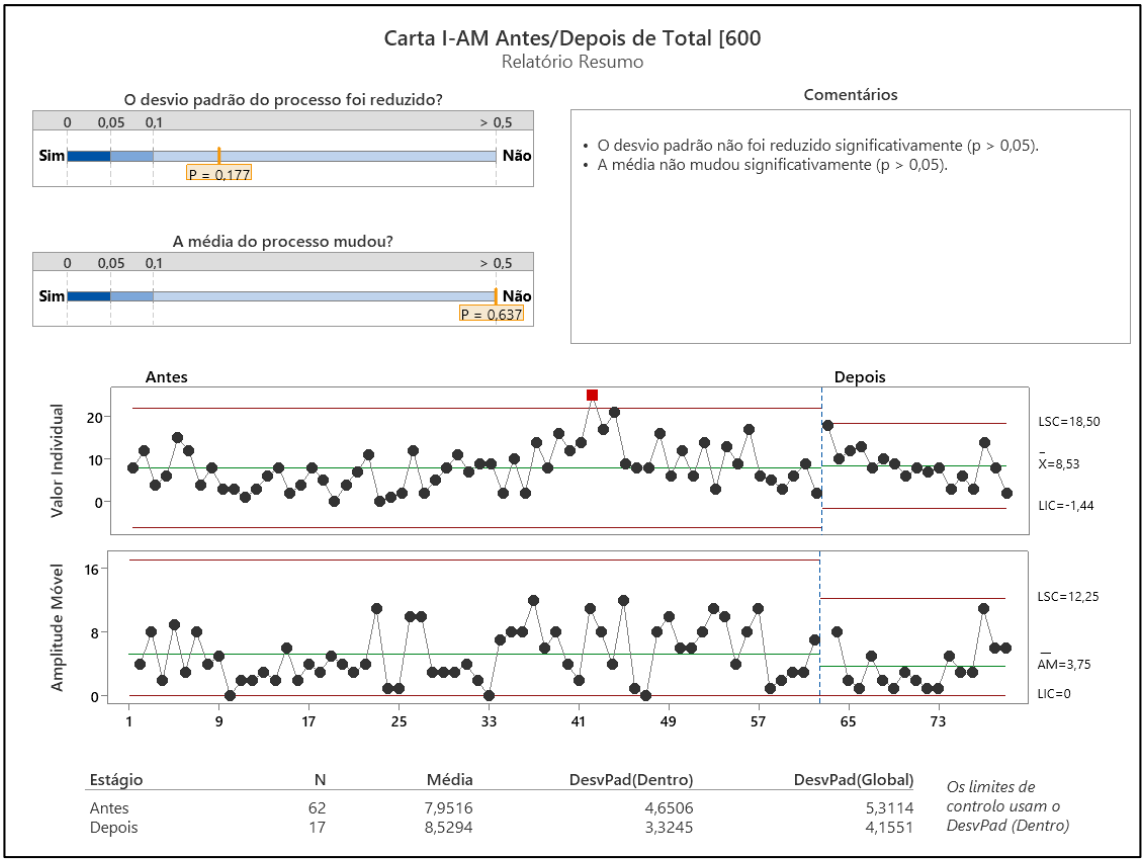


Figura 59 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas (metálicas e não metálicas) na faixa granulométrica maior ou igual a 600 µm, antes e após as ações de melhoria

No período anterior às melhorias, o processo apresenta uma média de 7,95 partículas e um desvio-padrão dentro de 4,65, com vários pontos de elevada amplitude e a ocorrência de pelo menos um ponto sinalizado fora de controlo na carta de valores individuais. Este comportamento indica a presença de variabilidade elevada e episódios pontuais de geração excessiva de partículas de grande dimensão.

Após a implementação das ações, observa-se uma redução da variabilidade, com o desvio-padrão dentro a diminuir para 3,32 e o desvio-padrão global para 4,16. No entanto, o teste estatístico associado à carta indica que esta redução não é estatisticamente significativa, o que sugere que, apesar de uma melhoria aparente, a evidência estatística não é suficiente para afirmar uma mudança consistente na dispersão do processo.

De forma semelhante, a média do processo aumentou ligeiramente de 7,95 para 8,53 partículas, mas esta variação não é estatisticamente significativa, indicando que as ações implementadas não produziram um efeito mensurável sobre o nível central desta classe de partículas.

A carta de amplitude móvel após as melhorias evidencia valores globalmente mais baixos e maior estabilidade visual, contudo ainda com alguma variabilidade residual, o que é consistente com a natureza esporádica deste tipo de partículas. A ausência de sinais claros de instabilidade no período posterior sugere um processo mais controlado, embora ainda não suficientemente robusto para demonstrar uma melhoria estatisticamente comprovada.

Em síntese, os resultados indicam que, para a classe de partículas superiores a 600 µm, as ações de melhoria implementadas não produziram alterações estatisticamente significativas nem na média nem na variabilidade do processo, sendo provável que esta classe seja influenciada por mecanismos pontuais e aleatórios, menos sensíveis às intervenções aplicadas nesta fase. Estes resultados reforçam a necessidade de análises complementares, nomeadamente microscópicas e de causa-raiz, focadas especificamente nas fontes de geração de partículas de grande dimensão.

4.9.3 PARTÍCULAS CONSIDERADAS METÁLICAS

A *Figura 60,* apresenta a Carta I-AM Antes/Depois relativa ao número de partículas metálicas na classe dimensional [150;200[µm.

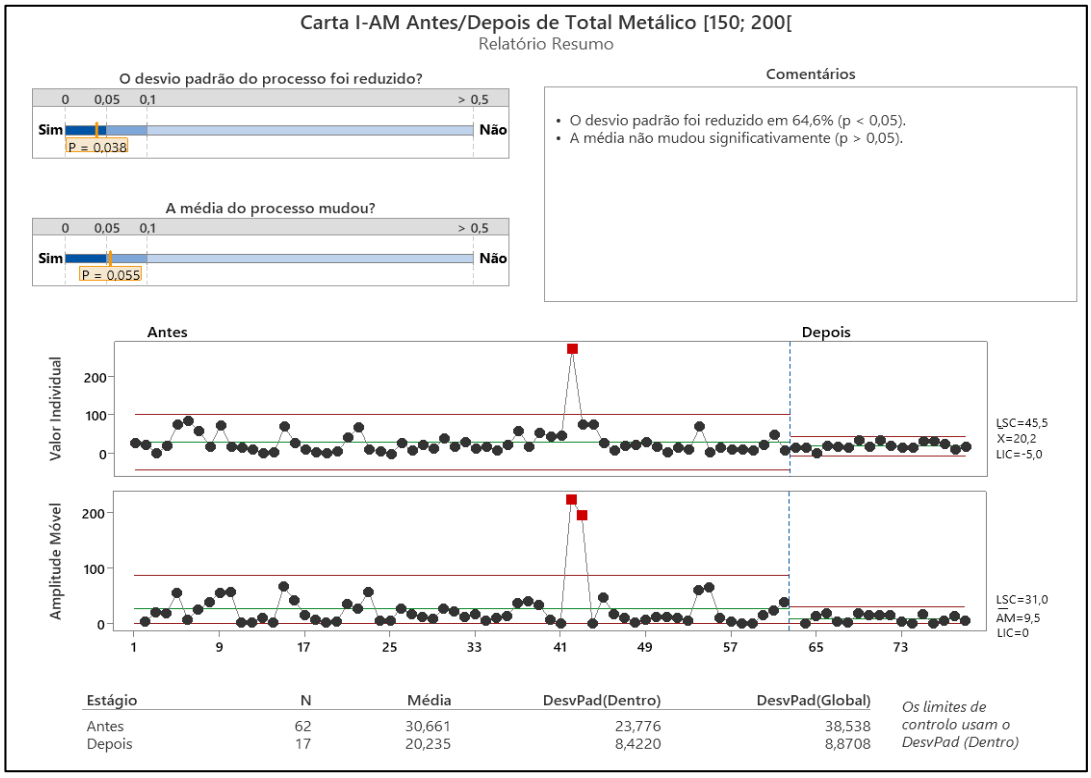


Figura 60 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica de 150–200 µm, antes e após as ações de melhoria

O teste associado à comparação do desvio-padrão indica uma redução de 64,6%, indicando que a dispersão dos dados diminuiu de forma significativa após a implementação das ações de melhoria. Por outro lado, não se observa uma alteração estatisticamente significativa da média do processo. Este resultado sugere que as ações implementadas não tiveram como efeito principal o deslocamento do nível médio de contaminação metálica, mas sim a estabilização do processo em torno de um valor médio semelhante ao histórico.

A análise visual da carta reforça esta conclusão. No período "Antes", são observados pontos fora de controlo e amplitudes móveis elevadas, indicando episódios de instabilidade e maior variabilidade interamostral. Após as melhorias, verifica-se uma concentração dos pontos dentro dos limites de controlo, acompanhada por valores de amplitude móvel significativamente mais baixos, o que é consistente com a redução do desvio-padrão estimado (de 23,776 para 8,422, considerando o desvio dentro do processo).

Em termos práticos, estes resultados indicam que as ações de melhoria foram eficazes no controlo da variabilidade das partículas metálicas nesta classe dimensional, tornando o processo mais previsível e robusto, ainda que sem evidência estatística de redução do nível médio de partículas. Esta distinção é relevante do ponto de vista da melhoria contínua, pois demonstra que a intervenção atuou prioritariamente sobre as causas de variação especial e comum, em vez de alterar o patamar médio do processo.

A análise da Carta I-AM Antes/Depois para o total de partículas metálicas na classe dimensional [200;400[µm pode ser consultada na *Figura 61,* e evidencia uma melhoria estatisticamente significativa do comportamento do processo após a implementação das ações corretivas, quer ao nível da variabilidade, quer ao nível do valor médio.

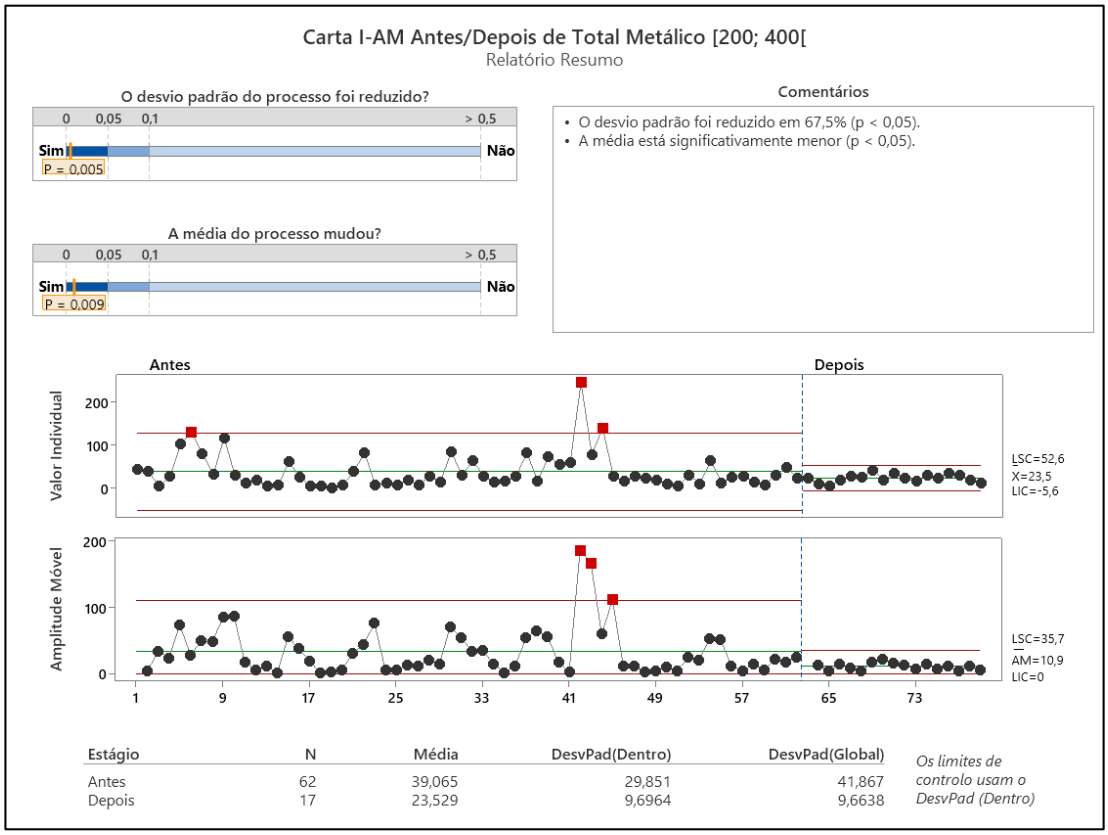


Figura 61 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica de 200–400 µm, antes e após as ações de melhoria

Relativamente à dispersão, observa-se uma redução de 67,5%, sugerindo que o processo se tornou significativamente mais estável depois das melhorias. Esta redução da variabilidade é também observável na carta

de amplitude móvel, onde se verifica uma diminuição clara da magnitude e da frequência das amplitudes elevadas após a intervenção.

Adicionalmente, ao contrário do observado noutras classes dimensionais, a média do processo apresenta uma redução estatisticamente significativa, e passou de 39,065 partículas no período antes das melhorias para 23,529 partículas no período depois das melhorias o que demonstra que as ações implementadas tiveram impacto direto não apenas na estabilidade do processo, mas também na redução do nível médio de contaminação metálica nesta classe dimensional.

Visualmente, o período anterior às melhorias é caracterizado pela presença de pontos fora de controlo e episódios de elevada variabilidade, sugerindo a existência de causas especiais associadas à geração de partículas metálicas dentro destes limites dimensionais. Após a implementação das ações, observa-se uma concentração dos valores individuais em torno da média, com todos os pontos contidos dentro dos limites de controlo e amplitudes móveis significativamente inferiores, indicando um processo mais previsível e robusto.

Em síntese, os resultados obtidos para a classe [200;400[µm demonstram que as ações de melhoria foram particularmente eficazes, promovendo simultaneamente a redução da variabilidade e a diminuição do nível médio de partículas metálicas, o que representa um ganho relevante em termos de desempenho do processo e de conformidade com os requisitos de limpeza técnica.

A *Figura 62* apresenta a Carta I-AM Antes/Depois para o número de partículas metálicas na classe dimensional [400;600[µm, permitindo avaliar o impacto das ações de melhoria implementadas no comportamento estatístico do processo.

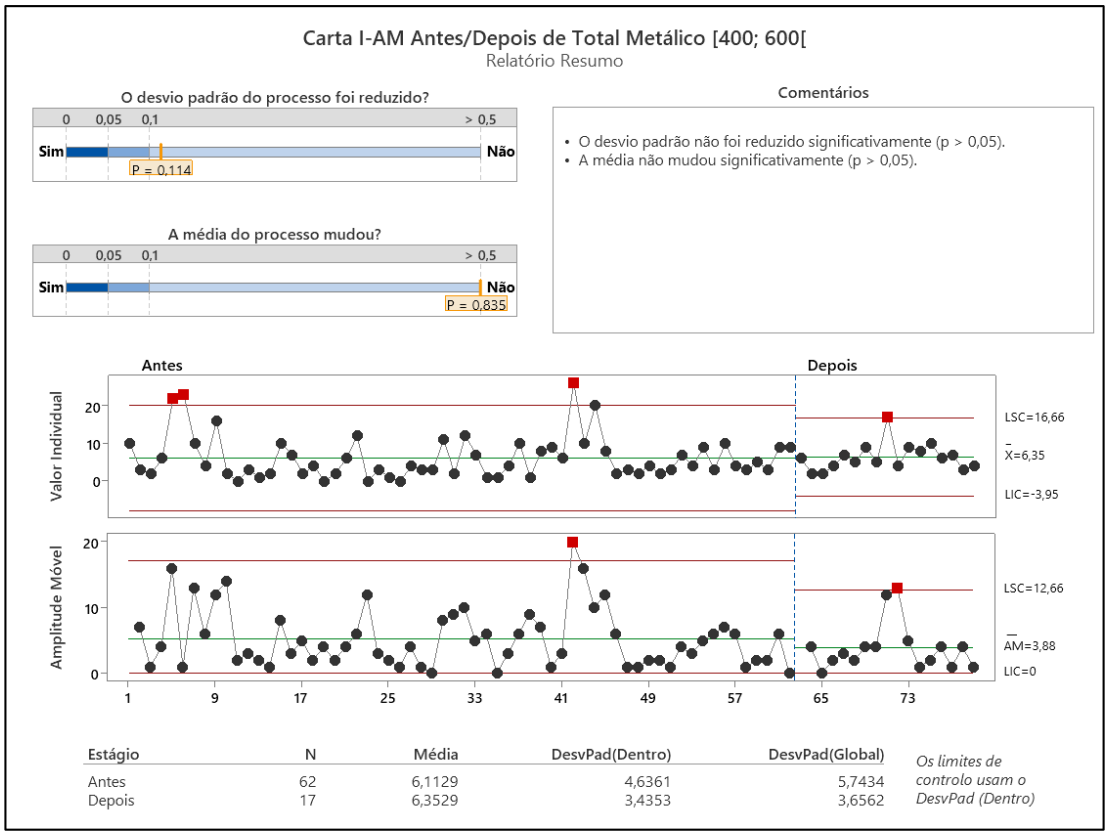


Figura 62 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica de 400–600 µm, antes e após as ações de melhoria

Relativamente à variabilidade, o teste de comparação do desvio-padrão não evidencia uma redução estatisticamente significativa após a intervenção. Embora se observe uma diminuição do desvio-padrão dentro do processo, de 4,6361 para 3,4353 partículas, esta variação não é suficiente para rejeitar a hipótese nula ao nível de significância de 5%. Do mesmo modo, a análise da média do processo indica que não ocorreram alterações estatisticamente significativas entre os períodos "Antes" e "Depois", mantendo-se valores médios semelhantes (6,11 e 6,35 partículas, respetivamente).

A carta de valores individuais evidencia que, no período anterior às melhorias, ocorreram pontos fora dos limites de controlo, indicativos da presença de causas especiais associadas à geração ocasional de partículas metálicas dentro dos limites de tamanho estudados nesta carta. Após a implementação das ações, embora se observe um comportamento globalmente mais concentrado, persiste pelo menos um ponto sinalizado fora de controlo, sugerindo que eventos pontuais de contaminação nesta classe dimensional ainda podem ocorrer.

A carta de amplitude móvel reforça esta interpretação, mostrando uma redução geral da dispersão das amplitudes após as melhorias, mas sem eliminar completamente episódios isolados de maior variabilidade. Tal comportamento é coerente com a ausência de significância estatística nos testes inferenciais, indicando que as ações implementadas tiveram efeito limitado nesta classe de partículas metálicas.

Em síntese, os resultados sugerem que, para a classe [400;600[µm, as ações de melhoria não produziram alterações estatisticamente significativas na média nem na variabilidade do processo. Indicando que a geração de partículas metálicas nesta gama dimensional poderá estar associada a mecanismos específicos e menos frequentes, exigindo medidas de controlo mais direcionadas ou intervenções adicionais focadas em causas pontuais.

A *Figura 63* apresenta a Carta I-AM Antes/Depois relativa ao número de partículas metálicas com dimensão igual ou superior a 600 µm.

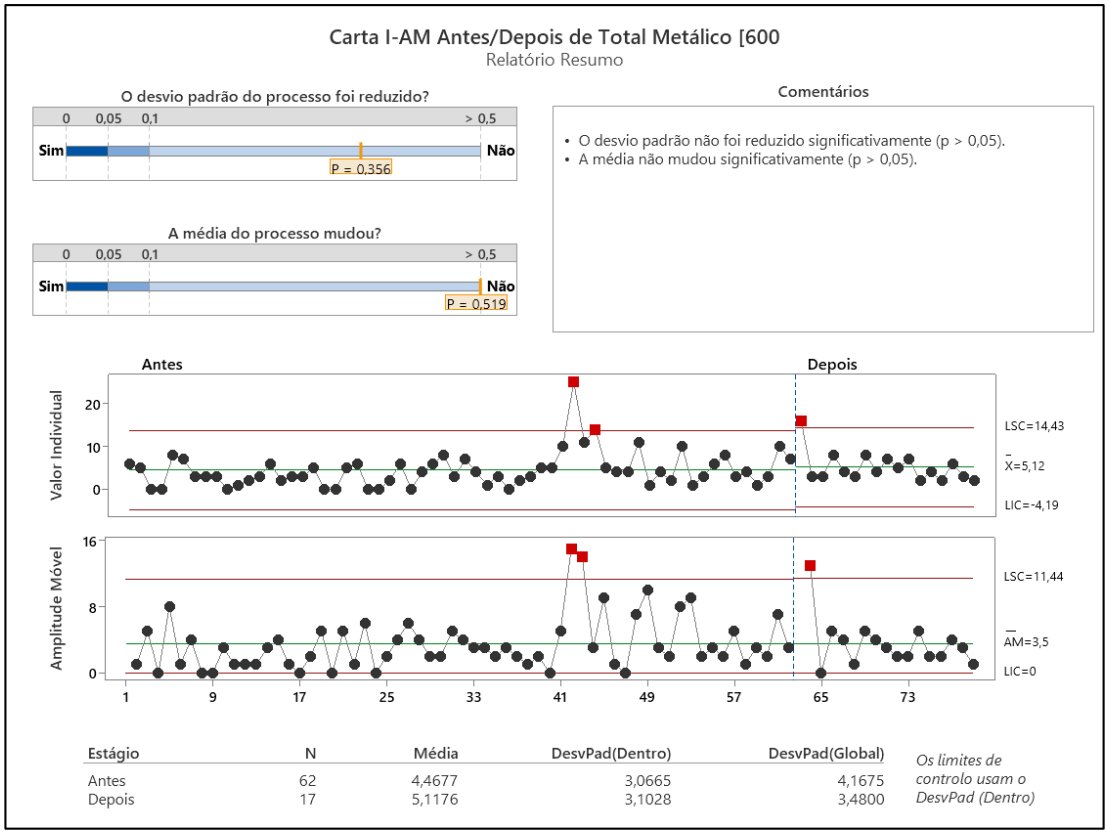


Figura 63 - Carta de controlo I–AM da contagem total de partículas metálicas na faixa granulométrica maior ou igual a 600 µm, antes e após as ações de melhoria

Os testes estatísticos associados à carta indicam que não ocorreu uma redução estatisticamente significativa da variabilidade do processo após a implementação das ações. Embora se observe uma ligeira diminuição do desvio-padrão dentro do processo, de 3,0665 para 3,1028 partículas, esta variação não é estatisticamente relevante ao nível de significância de 5%. De forma consistente, a análise da média do processo também não evidencia diferenças estatisticamente significativas entre os períodos analisados, mantendo-se valores médios semelhantes antes (4,47 partículas) e depois (5,12 partículas) das melhorias.

A observação da carta de valores individuais revela que, antes das melhorias, ocorreram pontos fora dos limites de controlo, sugerindo a presença de causas especiais associadas à geração esporádica de partículas metálicas de grande dimensão. Depois das melhorias, embora o processo apresente um comportamento globalmente estável, permanece pelo menos um ponto sinalizado fora de controlo, indicando que eventos pontuais de contaminação nesta classe dimensional continuam a ocorrer.

A carta de amplitude móvel corrobora esta análise, mostrando amplitudes elevadas associadas a esses episódios isolados, tanto antes como após as melhorias. Tal comportamento sugere que a variabilidade nesta classe não é predominantemente sistemática, mas sim influenciada por ocorrências raras e de elevada severidade.

Em síntese, os resultados apresentados na *Figura 63* indicam que, para a classe de partículas metálicas ≥ 600 µm, as ações de melhoria implementadas não conduziram a alterações estatisticamente significativas na média nem na variabilidade do processo.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal a implementação de técnicas de controlo estatístico aplicadas aos requisitos de limpeza técnica de componentes destinados ao setor automóvel, num contexto industrial de fundição injetada de alumínio. Este objetivo foi sustentado por uma abordagem metodológica estruturada, assente na investigação-ação e na aplicação integrada das metodologias DMAIC e CRISP-DM, em alinhamento com os princípios das normas VDA 19.1 e VDA 19.2 e com o paradigma de tomada de decisão baseada em dados.

A auditoria inicial de limpeza técnica permitiu obter um diagnóstico objetivo e quantificado do estado do processo ao longo do fluxo produtivo, evidenciando um desempenho heterogéneo entre áreas e identificando pontos críticos que requeriam intervenção prioritária. Em particular, a área de injeção destacou-se como a mais crítica, justificando a focalização das ações de melhoria nesta etapa, em conformidade com os princípios de atuação "do interior para o exterior" e de "tão limpo quanto necessário, e não tão limpo quanto possível", preconizados pelas normas de referência.

Este diagnóstico revelou-se fundamental para orientar a alocação eficiente de recursos e evitar intervenções generalizadas sem impacto técnico comprovado. Nesse enquadramento, o presente trabalho não teve como objetivo a eliminação total de partículas, uma vez que tal abordagem é contrária ao pressuposto normativo estabelecido pelas normas VDA 19.1 e 19.2. Estas normas reconhecem que níveis de limpeza excessivos, para além de determinados limiares funcionais, não acrescentam valor ao desempenho do componente e podem implicar custos desproporcionados face às condições reais de utilização.

Importa salientar que, apesar deste enquadramento normativo, subsistem ainda, em determinados contextos industriais, requisitos de limpeza definidos com margens conservadoras ou pouco alinhadas com a funcionalidade efetiva do componente. Neste sentido, cabe aos fornecedores, suportados por evidência técnica e estatística, promover um diálogo fundamentado com os seus clientes, contribuindo para a definição de requisitos de limpeza técnica equilibrados, tecnicamente justificados e economicamente sustentáveis, em consonância com as boas práticas e recomendações normativas.

A análise estatística desenvolvida ao longo do estudo evidenciou que o processo de limpeza técnica apresenta um comportamento caracterizado por elevada variabilidade, conforme antecipado pelas orientações da VDA 19. Este requisito não pode ser analisado de forma análoga a características dimensionais, como o diâmetro de um furo, por exemplo, uma vez que envolve fenómenos significativamente mais complexos e sujeitos a múltiplas fontes de variabilidade. Adicionalmente, os resultados demonstraram que o processo é particularmente sensível à ocorrência de eventos pontuais de contaminação elevada, os quais contribuem de forma relevante para a dispersão observada nos dados.

A análise por classes granulométricas evidenciou que o impacto das ações de melhoria não foi uniforme. Para as classes de partículas entre 150 µm e 400 µm, verificou-se uma melhoria estatisticamente significativa, tanto ao nível da redução da variabilidade como da diminuição do valor médio de contaminação, traduzindo um ganho efetivo de desempenho e de conformidade com os requisitos de limpeza técnica. Em contraste, nas classes de maior dimensão, nomeadamente $\geq$ 400 µm, não se registaram alterações estatisticamente

significativas na média ou na variabilidade, permanecendo a influência de eventos isolados associados a causas especiais.

A caracterização microscópica das partículas fora de especificação revelou-se um complemento essencial à análise estatística, permitindo suportar a identificação de potenciais causas raiz e fundamentar decisões ao nível da reorganização de operações. A integração desta análise com as análises estatísticas reforçou a importância de uma abordagem multidisciplinar para o controlo da limpeza técnica, combinando dados quantitativos, evidência técnica e conhecimento do processo produtivo.

De um ponto de vista de engenharia e gestão industrial, os resultados obtidos demonstram que a implementação estruturada de técnicas de controlo estatístico constitui uma ferramenta eficaz para monitorizar, compreender e melhorar os requisitos de limpeza técnica em ambiente industrial e reforça a necessidade de monitorização contínua, disciplina operacional e consolidação das práticas implementadas.

Apesar dos contributos alcançados, o presente trabalho apresenta um conjunto de constrangimentos que importa explicitar, quer para a correta interpretação dos resultados obtidos, quer para a definição de linhas de investigação e intervenção futuras.

Um dos principais constrangimentos identificados prende-se com a dimensão e a distribuição do conjunto de dados disponível para análise. Embora tenha sido possível realizar avaliações estatísticas relevantes, a quantidade de amostras por dia da semana revelou-se desigual, limitando a robustez da análise da influência desta variável no comportamento do processo. Em particular, a escassez de amostras significativas em determinados dias dificultou a obtenção de conclusões estatisticamente mais consistentes. Neste contexto, uma perspetiva futura relevante consiste na realização do mesmo estudo com um número superior de amostras e com recolhas sistemáticas ao longo de todos os dias da semana, de forma equilibrada, permitindo uma avaliação mais robusta e fiável da influência temporal no desempenho da limpeza técnica.

Adicionalmente, o estudo incidiu sobre um único componente, com requisitos específicos de limpeza técnica e um fluxo de processo particular. Embora esta abordagem tenha permitido uma análise aprofundada e contextualizada, limita a generalização dos resultados. Como expectativa futura, recomenda-se a aplicação da mesma metodologia a componentes com diferentes níveis de criticidade, requisitos de limpeza distintos e fluxos de processo alternativos, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos e a identificação de diferenças significativas nos fatores de influência e no comportamento estatístico dos processos.

No que respeita às ações de melhoria, importa salientar que, apesar de várias intervenções terem sido implementadas ao longo do estudo, algumas ações adicionais identificadas com base na análise dos dados não puderam ser executadas devido a constrangimentos de tempo. Assim, uma linha de continuidade natural deste trabalho passa pela implementação completa dessas ações de melhoria e pela realização de uma nova análise "Antes e Depois", permitindo avaliar se a consolidação das intervenções, focadas nas causas identificadas, conduz a incrementos adicionais no desempenho do processo e na estabilidade da limpeza técnica.

Um constrangimento estrutural relevante esteve associado à inexistência, na empresa estudada, de um sistema de informação e de um banco de dados preparados para suportar análises estatísticas deste tipo. Os registos de produção são realizados manualmente pelos operadores, não existindo leitores automáticos nem

qualquer sistema de controlo de fluxo digitalizado. Esta realidade implicou a necessidade de digitalizar toda a informação registada em fichas de produção em papel, tornando o processo moroso e sujeito a perdas de informação. Como consequência direta, dezenas de amostras tiveram de ser descartadas da análise devido à ausência de dados essenciais, como datas, identificação do operador ou rastreabilidade do percurso da peça ao longo do processo, o que reduziu a robustez do conjunto de dados analisado.

Esta limitação também inviabilizou o estudo de outras variáveis potencialmente relevantes, nomeadamente variáveis associadas à maquinação, que se mostrou uma área relevante ao analisarem-se as partículas microscópicamente e algumas delas apresentarem fortes indícios de terem sido geradas na maquinação. Entretanto, a falta de registos completos impossibilitou o estudo de dados deste setor com os resultados de limpeza técnica. Apesar dos procedimentos internos existentes e dos pedidos reiterados para o correto preenchimento das fichas, verificou-se uma adesão inconsistente, que pode ser explicada, por um lado, pelo receio de responsabilização em caso de problemas identificados posteriormente e, por outro, pela falta de tempo associada ao preenchimento manual dos registos. Este contexto sugere que a empresa atingiu uma dimensão e complexidade para as quais processos baseados em papel já não são compatíveis com a realidade operacional atual, constituindo este aspeto um dos constrangimentos mais relevantes e que merece atenção da gestão.

Acresce ainda que a transferência manual dos dados para formato digital e o posterior cruzamento com outras fontes de informação, como a MFI, que se encontrava num ficheiro separado e cuja associação era realizada através do número da ordem de fabrico, tornou o processo particularmente demorado.

Por fim, importa destacar que, após as ações de sensibilização e formação realizadas, os contibutos recolhidos junto dos operadores foram globalmente construtivos e revelaram-se cruciais para a identificação de diversas causas associadas ao processo. Este facto evidencia que a formação dos recursos humanos constitui um fator determinante para o sucesso de qualquer análise técnica e estatística. Independentemente do grau de complexidade das metodologias aplicadas, os operadores estão diretamente envolvidos no processo produtivo e detêm conhecimento prático essencial, devendo ser valorizados, formados e integrados de forma ativa nas análises e nas dinâmicas de resolução de problemas. À semelhança da abordagem multidisciplinar adotada neste trabalho, a análise de causa deve envolver todos os intervenientes relevantes do processo, reforçando a articulação entre conhecimento técnico, estatístico e operacional.

Em síntese, este trabalho contribui para colmatar uma lacuna identificada na literatura, ao demonstrar, em contexto real de produção, a aplicabilidade do controlo estatístico do processo aos requisitos de limpeza técnica. Os resultados obtidos fornecem suporte técnico e quantitativo à tomada de decisão industrial e constituem uma base sólida para a continuidade do processo de melhoria contínua, em consonância com as exigências crescentes de qualidade e fiabilidade impostas pelo setor automóvel.

ANEXOS

ANEXO I AUDITORIA DE LIMPEZA TÉCNICA (ANTES DAS MELHORIAS)

O presente anexo contém os registos completos da auditoria de limpeza técnica realizada no âmbito do presente estudo, abrangendo os diversos processos produtivos analisados, os respetivos critérios de verificação, observações de conformidade, não conformidade e oportunidades de melhoria.

LOGOTIPO DA EMPRESA

AUDITORIA DE LIMPEZA TÉCNICA

NÚMERO DA PEÇA: 123 456 789

NOME DA PEÇA: AMOSTRA

TURNO AUDITADO: 1º e 2º

DATA: 31/07/2025

AUDITOR(A) ARÍCIA BARTHON

Somente 1 opção pode ser selecionada ☑. Em caso de NOK ou Oportunidade de Melhoria, deve-se inserir comentários.

Nº	LOCAL DE VERIFICAÇÃO	ITEM DE VERIFICAÇÃO	OK	NOK	OPORTUNIDADE DE MELHORIA	NÃO APLICÁVEL	COMENTÁRIOS
1	Injeção	Verifique se a area ao redor das máquinas está limpa e sem acumulação de limalha/resíduos.	☐	☑	☐	☐	MFI31 e MFI32 apresentavam acumulação de sujidade.
2	Injeção	Verifique se existem vazamentos na máquina de injeção e outros componentes.	☐	☑	☐	☐	MFI31 e MFI32 apresentavam vazamentos.
3	Injeção	Inspecione se as peças injetadas estão livres de rebarbas ou outros defeitos que provocam retrabalho na peça.	☐	☑	☐	☐	As peças apresentavam rebarbas
4	Corte	Observe se os resíduos de corte são removidos imediatamente após a operação.	☐	☐	☑	☐	No aparador das mfi 31 e 32, mesmo após a remoção, ainda ocorre acúmulo considerável de resíduos ao redor.
5	Corte	Verifique se existe sopro localizado ou contenção da contaminação gerada após corte.	☐	☐	☑	☐	No aparador das mfi 31 e 32, existe sopro e contenção, ambos ineficientes.
6	Corte	Inspecione se as peças cortadas possuem arrastamento.	☑	☐	☐	☐	
7	Corte	Verifique se a prensa está livre de vazamentos.	☑	☐	☐	☐	
8	Corte	Inspecione se as peças cortadas apresentam excesso de óleo de corte.	☑	☐	☐	☐	
9	Maquinação	Inspecione se as peças produzidas estão livres de rebarba de maquinação.	☐	☑	☐	☐	Uma das posições produzia uma rebarba de maquinação que estava a ser removida após maquinação.
10	Maquinação	Verifique se as peças são limpas logo após a operação de maquinação.	☐	☑	☐	☐	Na CNC nova não existe processo de limpeza após a maquinação; nas outras CNC, o processo é ineficiente e o estado de conservação das caixas de lavagem contamina a peça (comprovado em análise).
11	Maquinação	Verifique se a área de trabalho está limpa e organizada.	☐	☑	☐	☐	A área de trabalho não encontrava-se limpa, mas encontrava-se organizada.
12	Vibração	Verifique se as peças saem do processo livres de contaminação.	☐	☐	☑	☐	Foi constatado que, embora a contaminação das pedras de vibração seja removida, quando menos de 3 operadores realizam a operação, aumenta o risco de produzir peças molhadas.
13	Vibração	Questione se a contaminação no interior da máquina de vibração é removida regularmente.	☐	☐	☑	☐	Ainda não existem registo de limpeza ou frequência estabelecida e documentada.
14	Vibração	Questione se o meio abrasivo é controlado e substituído.	☑	☐	☐	☐	
15	Vibração	Verifique se a área de trabalho está limpa e organizada.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado que a área de trabalho não encontrasse limpa e organizada.
16	Granalha	Verifique se as peças saem do processo livres de contaminação.	☐	☐	☐	☑	
17	Granalha	Verifique se área de trabalho está limpa e organizada.	☐	☐	☐	☑	
18	Retrabalho	Observe se os resíduos gerados são recolhidos e controlados.	☐	☑	☐	☐	Não existe nenhuma boa prática aplicada neste posto de trabalho para controlo de resíduos de retrabalho.
19	Retrabalho	Verifique se a bancada e os utensílios estão limpos e organizados.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado que as bancadas não estavam limpas e apresentavam líquido de maquinação.
20	Retrabalho	Verifique se o operador tem instruções claras sobre o que deve fazer.	☑	☐	☐	☐	
21	Retrabalho	Observe se, após o retrabalho, a peça passa por alguma operação de lavagem ou sopro.	☑	☐	☐	☐	
22	Inspeção Final	Questione se o operador tem instruções sobre o uso adequado de luvas brancas e com qual frequência deve trocar.	☑	☐	☐	☐	
23	Inspeção Final	Observe se a área de inspeção é livre de poeiras e partículas visíveis e está organizada.	☐	☐	☑	☐	Foi constatado que o posto de trabalho estava limpo, mas objetos pessoais estavam aparentes na área de trabalho, ao invés de estarem nos cacifos.
24	Inspeção Final	Verifique se o ambiente é controlado em termos de iluminação, ergonomia, fluxo de ar, entre outros.	☐	☐	☑	☐	Foi constatado que a ergonomia do posto de trabalho apresenta condições desiguais entre bancadas e que não satisfazem os operadores.
25	Inspeção Final	Observe se há risco de contaminação cruzada com peças rejeitadas, peças de validação, peças de dúvida, peças ainda não processadas, entre outras.	☐	☐	☑	☐	Embora existam normas internas adequadas e que evitem a contaminação cruzada com peças rejeitadas, os operadores adaptam as normas para sua própria conveniência, o que pode apresentar um risco.
26	Inspeção Final	Verifique se as peças identificadas com falta de retrabalho são separadas para retrabalhar em outra área.	☐	☑	☐	☐	Ocasionalmente, as peças são retrabalhadas na inspeção.
27	Lavagem	Observe se após lavagem as peças são manuseadas em ambiente controlado e protegido contra recontaminação.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado risco de recontaminação pelas luvas do operador, que são utilizadas tanto em peças antes quanto após a lavagem.
28	Lavagem	Verifique se a frequência de troca da água da máquina de lavar é respeitada e registada.	☑	☐	☐	☐	
29	Lavagem	Verifique se a bancada, a área ao redor e os utensílios estão limpos e organizados.	☐	☑	☐	☐	foi constatado que, embora a bancada que apoia o gabarito estivesse organizada e limpa, a área ao redor não estava.
30	Lavagem	Questione se o operador tem instruções claras sobre o que deve fazer.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado que o operador executa a sequência incorreta de operações.
31	Lavagem	Questione se o operador tem instruções sobre o uso adequado de luvas brancas e com qual frequência deve trocar.	☐	☐	☑	☐	Verificou-se que o operador não dispõe de instruções de trabalho específicas e não utiliza luvas brancas. No entanto, embora esta prática seja recomendada em teoria, a sua execução revelou-se impraticável nas condições atuais do processo.

32	Gabaritos e Calibres	Inspecione se os gabaritos e calibres estão limpos.	☑	☐	☐	☐	
33	Gabaritos e Calibres	Verifique se existe frequência para limpeza dos gabaritos e calibres e se está a ser seguida.	☐	☑	☐	☐	Não existe frequência definida e documentada
34	Gabaritos e Calibres	Observe se existe algum risco de abrasão entre o gabarito/calibre e a peça que pode gerar partículas e se alguma medida está a ser executada para mitigar este risco.	☐	☑	☐	☐	Existe medida, mas como o operador inverteu a ordem das operações, a medida não está a ser seguida.
35	Gabaritos e Calibres	Inspecione se as peças de validação do gabarito estão limpas e devidamente identificadas e armazenadas.	☑	☐	☐	☐	
36	Sala Limpa	Observe o uso correto de EPI (luvas, batas, máscara).	☐	☐	☐	☑	
37	Sala Limpa	Observe o uso cocorreto das entradas e saídas da sala limpa.	☐	☐	☐	☑	
38	Sala Limpa	Observe se a área de trabalho encontra-se limpa e organizada.	☐	☐	☐	☑	
39	Sala Limpa	Observe se o posto de trabalho encontra-se livre de objetos desnecessários / contaminantes.	☐	☐	☐	☑	
40	Sala Limpa	Verifique se o procedimento de limpeza da área de trabalho e equipamentos está a ser seguido.	☐	☐	☐	☑	
41	Laser / Check Box	Observe o uso correto de EPI (luvas, batas, máscara).	☐	☐	☐	☑	
42	Laser / Check Box	Verifique se o procedimento de limpeza da área de trabalho e equipamentos está a ser seguido.	☐	☐	☐	☑	
43	Laser / Check Box	Observe se o posto de trabalho encontra-se limpa e organizado	☐	☐	☐	☑	
44	Laser / Check Box	Observe se o posto de trabalho encontra-se livre de objetos desnecessários / contaminantes.	☐	☐	☐	☑	
45	Embalagem e transporte interno	Vertifique se as caixas e contentores estão limpos, identificados e em bom estado.	☐	☑	☐	☐	Identificados, mas não limpos e em bom estado.
46	Embalagem e transporte interno	Observe se há contacto direto das peças com superfícies contaminadas.	☐	☑	☐	☐	As caixas são suporfícies contaminadas.
47	Embalagem e transporte interno	Observe se os percursos de transporte evitam zonas sujas ou não controladas.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado que há grande movimentação das peças, sem proteção adequada durante o transporte e sem áreas controladas.
48	Embalagem e transporte interno	Observe se as peças estão acondicionadas de forma a evitar movimento/choque.	☑	☐	☐	☐	
49	Embalagem e transporte interno	Verifique se as caixas são inspecionadas e limpas antes da reutilização.	☐	☑	☐	☐	As caixas são utilizadas no mesmo status que se encontram disponíveis, sem qualquer inspeção anterior.
50	Embalagem e transporte externo	Verifique se a embalagem externa protege contra contaminação durante o transporte.	☐	☐	☑	☐	O blister não garante fixação completa das peças, permitindo movimentação durante o transporte.
51	Embalagem e transporte externo	Verifique se a embalagem externa está em boas condições de conservação.	☐	☐	☑	☐	As caixas, blisters e tampas estão desgastadas.
52	Embalagem e transporte externo	Inspecione se paletes, caixas e tampas estão limpas.	☐	☐	☑	☐	O palete utilizado é de madeira, impróprio para peças com requisito de limpeza e áreas limpas, pois não tem como ser limpo. A tampa do palete encontra-se muito suja, podendo contaminar as luvas dos operadores, que deveriam manusear as peças com luvas limpas
53	Embalagem e transporte externo	Questione se o operador tem instruções claras de como embalar as peças e quais cuidados deve ter com a limpeza das peças.	☑	☐	☐	☐	
54	Embalagem e transporte externo	Questione se as caixas são inspecionadas e limpas antes da reutilização.	☑	☐	☐	☐	
55	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se as condições ambientais são controladas (temperatura, humidade, fluxo de ar).	☑	☐	☐	☐	
56	Laboratório de Limpeza Técnica	Observe se existem barreiras físicas contra contaminação (portas fechadas, cortinas de ar, filtros HEPA).	☐	☐	☑	☐	As portas são fechadas e a entrada é restrita. Porém, as análises não são realizadas em uma cabine.
57	Laboratório de Limpeza Técnica	Observe se o status atual do laboratório é de limpeza e organização.	☑	☐	☐	☐	Foi constatado que o laboratório estava limpo e organizado; Existe um quadro com o resultado da última auditoria 5S conferindo 100% de aprovação ao laboratório. Status que parece ter sido mantido até a data desta auditoria.
58	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se existe um plano de limpeza do laboratório.	☑	☐	☐	☐	
59	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se os equipamentos estão em bom estado e calibrados.	☑	☐	☐	☐	
60	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se está disponível uma balança de pelo menos quatro dígitos, ou seja, que consiga mostrar o peso com precisão até 0,1 mg (miligrama).	☑	☐	☐	☐	
61	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se existe Instrução de Trabalho documentada e acessível com todos os passos para a inspeção de limpeza.	☑	☐	☐	☐	
62	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se há procedimentos claros para ações corretivas quando os limites de contaminação são ultrapassados.	☐	☑	☐	☐	Não existem procedimentos claros para ações corretivas quando os limites de contaminação são ultrapassados.
63	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se os resultados estão bem documentados e a interpretação está alinhada com os critérios de aceitação definidos.	☑	☐	☐	☐	
64	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se os testes de qualificação foram realizados corretamente (Curva de declínio e teste duplo, por exemplo).	☑	☐	☐	☐	
65	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se os requisitos de limpeza estão claramente definidos, alinhados com o cliente e documentados.	☑	☐	☐	☐	
66	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se as análises são realizadas em ambientes controlados e/ou um teste branco antes das análises é realizado para constatar que o ambiente está adequado para a análise.	☑	☐	☐	☐	
67	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se existe um sistema de monitoramento contínuo para garantir que os processos de limpeza permaneçam dentro dos parâmetros estabelecidos.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado que, embora os testes sejam realizados com a frequência definida pelo cliente, não existe um sistema de monitoramento e controle contínuo.
68	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se os relatórios emitidos estão devidamente documentados e possuem informações de rastreabilidade da amostra.	☑	☐	☐	☐	
69	Laboratório de Limpeza Técnica	Verifique se os testes de qualificação estão referenciados nos relatórios de inspeção.	☐	☑	☐	☐	Foi constatado que os testes de qualificação não são referenciados, pois não existe codificação estabelecida para possibilitar a referência.
70	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se o profissional possui formação específica em VDA19	☑	☐	☐	☐	
71	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se o profissional possui conhecimento dos procedimentos internos de limpeza técnica.	☑	☐	☐	☐	
72	Laboratório de Limpeza Técnica	Questione se o profissional possui equipamentos de proteção individual adequados e usa corretamente.	☑	☐	☐	☐	