

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Química – Câmpus de Araraquara

GUILHERME OLTREMARE

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (MSA) COMO FERRAMENTA NO
CONTROLE DE PROCESSO E DE QUALIDADE DE UMA EMPRESA DE
TINTAS LÍQUIDAS**

Araraquara

2025

GUILHERME OLTREMARE

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (MSA) COMO FERRAMENTA NO
CONTROLE DE PROCESSO E DE QUALIDADE DE UMA EMPRESA DE
TINTAS LÍQUIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de
Química, Araraquara, para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Gustavo
Nakamura Alves Vieira

Araraquara

2025

O52a Oltremare, Guilherme

Análise do sistema de medição (MSA) como ferramenta no controle de processo e de qualidade de uma empresa de tintas líquidas / Guilherme Oltremare. -- Araraquara, 2025
62 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara
Orientador: Gustavo Nakamura Alves Vieira

1. Metrologia. 2. ISO 9001. 3. Qualidade. I. Título.

GUILHERME OLTREMARE

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (MSA) COMO FERRAMENTA NO
CONTROLE DE PROCESSO E DE QUALIDADE DE UMA EMPRESA DE
TINTAS LÍQUIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de
Química, Araraquara, para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Data da defesa: 09/12/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO NAKAMURA ALVES VIEIRA**
Data: 17/12/2025 10:10:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira

Documento assinado digitalmente
 **JORGE MANUEL VIEIRA CAPELA**
Data: 17/12/2025 10:44:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Manuel Vieira Capela

Documento assinado digitalmente
 **LORENA OLIVEIRA PIRES**
Data: 18/12/2025 11:43:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lorena Oliveira Pires

Dedico essa monografia aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo, paciência e incentivo que me permitiram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Gustavo Nakamura Vieira Alves pela disponibilidade, apoio e direcionamento na realização desse trabalho.

Agradeço a PPG Brasil pelo ambiente, recursos e confiança para realizar o estudo.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo avaliar a confiabilidade dos sistemas de medição utilizados para o controle de parâmetros críticos de qualidade em uma unidade de uma empresa de fabricação de tintas e revestimentos líquidos. Em um contexto industrial que exige conformidade com padrões rigorosos, como a IATF 16949 e a ISO 9001, a precisão e a acurácia dos processos de medição são cruciais para a garantia da qualidade e a prevenção de falhas. Para este fim, foi aplicada a metodologia Measurement System Analysis (MSA), requisito indispensável dessas normas utilizando análises de estabilidade, tendência e Gage R&R, para analisar a variação e a adequação dos testes de viscosidade rotacional, viscosidade de efluxo, fineza de moagem (escala Hegman) e temperatura da moagem, conforme detalhado na revisão bibliográfica sobre metrologia e gestão da qualidade. Os resultados obtidos com o estudo permitiram identificar a performance atual dos sistemas de medição em relação aos critérios de aceitação automotivos, fornecendo uma base sólida para a implementação de ações corretivas e de melhoria contínua, visando a redução de fontes de variação, a otimização dos processos de controle e a manutenção da excelência nos padrões de qualidade da produção.

Palavras-chave: MSA; indústria; tintas líquidas; qualidade; controle de qualidade; ISO:9001; IATF:16949.

ABSTRACT

This final course project aimed to evaluate the reliability of the measurement systems used for controlling critical quality parameters in a unit of a company that manufactures liquid paints and coatings. In an industrial context that demands compliance with rigorous standards, such as IATF 16949 and ISO 9001, the precision and accuracy of measurement processes are crucial for quality assurance and failure prevention. To this end, the Measurement System Analysis (MSA) methodology—an indispensable requirement of these standards—was applied, utilizing stability, bias, and Gage R&R analyses, to analyze the variation and adequacy of tests for rotational viscosity, efflux viscosity, fineness of grind (Hegman scale), and grinding temperature, as detailed in the bibliographical review on metrology and quality management. The results obtained from the study allowed for the identification of the current performance of the measurement systems in relation to automotive acceptance criteria, providing a solid foundation for the implementation of corrective and continuous improvement actions, aimed at reducing sources of variation, optimizing control processes, and maintaining excellence in production quality standards.

Keywords: MSA; Industry; Liquid paints; Quality; Quality control; ISO 9001; IATF 16949

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Precisão e acurácia.....	28
Figura 2: Fotografia de um viscosímetro rotacional.....	31
Figura 3: Spindles para um viscosímetro (RV)	32
Figura 4: Grindômetro Hegman.....	35
Figura 5: Politetrafluetileno.....	36
Figura 6: Critérios de aceitação para estabilidade - temperatura de moagem .	39
Figura 7: Critérios de aceitação para a tendência - temperatura de moagem..	40
Figura 8: Critérios de aceitação para um estudo de R&R Atributo	41
Figura 9: Critérios de aceitação para estabilidade - viscosidade rotacional	43
Figura 10: Critérios de aceitação para a tendência - viscosidade rotacional....	43
Figura 11: Critérios de aceitação Gage R&R - viscosidade de efluxo	45
Figura 12: Carta X-barra/R - temperatura de moagem.....	47
Figura 13: Análise numérica de repetitividade - temperatura da moagem	49
Figura 14: Resultados R&R - fineza Hegman.....	50
Figura 15: Carta X-barra/R - viscosidade rotacional.....	52
Figura 16: Análise numérica de repetitividade - viscosidade rotacional	53
Figura 17: Gage R&R ANOVA - viscosidade de efluxo.....	54
Figura 18: Gage R&R resultados numéricos - viscosidade de efluxo.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados tendência - temperatura da moagem	48
Tabela 2: Teste estatística t - temperatura da moagem.....	49
Tabela 3: Resultados tendência - viscosidade rotacional	52
Tabela 4: Teste estatística t - viscosidade rotacional.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MSA	Measurement System Analysis
IATF	International Automotive Task Force
ISO	International Organization for Standardization
AIAG	Automotive Industry Action Group
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
CEP	Controle Estatístico de Processo
VM	Variação do Sistema de Medição
VT	Variação Total Observada
R&R	Repeatability and Reproducibility
ANOVA	Analysis of Variance
EV	Equipment Variation
AV	Appraiser Variation
H	Escala Hegman.
GQT	Gestão da Qualidade Total
TQC	Total Quality Control
PDCA	Plan-Do-Check-Act
DIRFT	Doing It Right The First Time
PNC	Preço da Não Conformidade.
APQP	Advanced Product Quality Planning
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
PPAP	Production Part Approval Process
PTFE	Politetrafluoretileno.
TFE	Tetrafluoretileno.
UCL	Upper Control Limit
LCL	Lower Control Limit
LCL	Lower Control Limit

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações Iniciais.....	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Justificativas	14
1.4	Escopo do Trabalho.....	14
1.5	O Processo Produtivo.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Qualidade	17
2.2	Sistemas de Gestão da Qualidade SGQ	20
2.3	Normas.....	23
2.3.1	ISO:9001	23
2.3.2	IATF 16949.....	24
2.4	MSA.....	27
2.5	Fontes de Variação.....	27
2.5.1	Variação da Localização (Acurácia)	28
2.5.2	Variação da Dispersão (Precisão)	29
2.6.	Diretrizes para a Determinação do R&R (<i>Gage R&R</i>).....	30
2.7	Viscosidade Rotacional	31
2.8	Viscosidade de efluxo.....	33
2.9	Escala Hegman (H) e Fineza de Moagem.....	34
2.10	PTFE	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Medição de temperatura durante a moagem.....	38
3.1.1	Critérios de Aceitação.....	39
3.1.2	Equipamentos	40
3.1.3	Execução.....	40
3.2	Teste de Fineza Hegman.....	40
3.2.1	Critérios de Aceitação.....	41
3.2.2	Equipamentos	41
3.2.3	Execução.....	41
3.3.1	Critérios de aceitação.....	42
3.3.2	Equipamentos	43
3.3.3	Execução.....	44
3.4	Teste de Viscosidade de efluxo (copo)	44

3.4.1	Critérios de aceitação.....	45
3.4.2	Equipamentos	45
3.4.3	Execução.....	45
4	RESULTADOS.....	47
4.1	Temperatura da Moagem	47
4.1.1	Estabilidade.....	47
4.1.2	Tendência	48
4.2	Fineza Hegman	50
4.3	Viscosidade Rotacional	51
4.3.1	Estabilidade.....	51
4.3.2	Tendência	52
4.4	Viscosidade de efluxo.....	53
5	CONCLUSÃO.....	57

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A Qualidade, no cenário industrial contemporâneo, transcendeu a função de mera inspeção para se consolidar como uma filosofia central de gestão e um imperativo estratégico para a sustentabilidade organizacional (JURAN, 1988). Em ambientes de alta exigência, como o setor automotivo, a conformidade não é apenas um diferencial, mas uma condição de fornecimento, sendo formalizada por normas rigorosas como a ISO 9001 e, em especial, a IATF 16949.

No cerne de um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) robusto está a premissa de que toda decisão de controle, ajuste ou liberação de processo deve ser baseada em dados confiáveis. Segundo os princípios de W. Edwards Deming, a maior parte da variabilidade indesejada é inerente ao sistema, e não ao operador. Contudo, para que qualquer análise estatística do processo (CEP) seja válida, é fundamental garantir que a variação do sistema de medição VM seja uma porção insignificante da Variação Total Observada VT, evitando-se o desperdício gerado pela tomada de decisão incorreta (DEMING, 1986).

A Análise do Sistema de Medição (MSA) é a ferramenta estatística mandatória (Core Tool) exigida pela IATF 16949 para avaliar formalmente a adequação de medidores, operadores e métodos. O MSA atua como um mecanismo de prevenção, garantindo que a precisão (repetitividade e reprodutibilidade) e a acurácia (tendência, estabilidade e linearidade) dos instrumentos estejam em conformidade com as tolerâncias de engenharia (AIAG, 2010).

O presente Trabalho de Conclusão de Curso está inserido neste contexto, visando aprofundar a aplicação prática do MSA em medições críticas de uma indústria de revestimentos e tintas, um setor onde as características reológicas (viscosidade) e o controle de partículas (fineza) são vitais para o desempenho e o acabamento final do produto.

1.2 Objetivos

Avaliar a confiabilidade e a adequação estatística de sistemas de medição críticos utilizados no controle de processos de fabricação de tintas e revestimentos, com base nas diretrizes do manual Measurement System Analysis (MSA) da AIAG e nos requisitos da norma IATF 16949.

1.3 Justificativas

O MSA é um dos pilares da estatística aplicada à qualidade, mas sua correta aplicação, em especial o método ANOVA para R&R por variáveis e a análise de atributos, requer rigor metodológico (AIAG, 2010). Este TCC contribui ao detalhar e exemplificar a aplicação dessas ferramentas em um ambiente industrial real, ligando conceitos dos mestres da qualidade à prática regulatória da IATF.

A falta de confiança nos sistemas de medição leva a um alto custo da má Qualidade, pois resulta em erros de julgamento: rejeitar lotes bons (falso alarme, gerando retrabalho desnecessário) ou aceitar lotes ruins (falha, resultando em insatisfação do cliente e potenciais *recalls*). Especificamente para o processo analisado neste trabalho, a validação dos sistemas de medição de temperatura, fineza e viscosidade é crucial para a segurança do processo de moagem, a uniformidade de cor/brilho e a aplicabilidade do produto final, garantindo a conformidade e a competitividade (CROSBY, 1979).

A IATF 16949 torna o MSA obrigatório para a cadeia de fornecimento automotivo. A validação documentada dos sistemas de medição é um requisito fundamental para as auditorias de certificação e para a manutenção da capacidade de fornecimento.

1.4 Escopo do Trabalho

O escopo deste trabalho está delimitado à análise da confiabilidade metrológica de quatro sistemas de medição críticos no controle de qualidade de revestimentos. Foram executados os seguintes estudos, conforme a 4ª edição do manual MSA da AIAG:

Temperatura de Moagem: avaliação da estabilidade e tendência (MSA Tipo A/Estudo de Localização). Viscosidade Rotacional (Brookfield): avaliação da estabilidade e tendência (MSA Tipo A/Estudo de Localização). Viscosidade de Efluxo (Copo DIN): avaliação de repetitividade e reprodutibilidade (*Gage R&R* por variáveis, método ANOVA). Fineza da Moagem (Hegman): avaliação de concordância de atributos (R&R Atributo).

1.5 O processo produtivo

O processo de fabricação de tintas líquidas é uma operação complexa de dispersão e padronização, dividida essencialmente em cinco etapas: pré-mistura, moagem, diluição, filtragem e envase. Em cada uma delas, o controle de variáveis físicas é determinante para a qualidade do produto final.

A pré-mistura inicia o processo com a dispersão de partículas sólidas em meio líquido através de cisalhamento mecânico. Utilizam-se tanques sem chicanas e discos dentados, posicionados estrategicamente em relação ao diâmetro e fundo do tanque (proporção 1/3) para garantir um fluxo laminar e a formação de um vórtice, que serve como indicador visual de eficiência (CREMASCO, 2014).

A etapa subsequente, a moagem, é a mais crítica para a performance da tinta, visando reduzir o tamanho das partículas para patamares inferiores a 20 µm. Na unidade fabril em questão, utilizam-se moinhos de bolas e de pinos. Enquanto o moinho de bolas atua por impacto e rolamento de agentes de moagem em um cilindro giratório, o moinho de pinos opera com alta energia cinética. Devido à natureza energeticamente intensiva desta fase, o controle da temperatura de moagem via sistemas de resfriamento é vital para evitar a degradação térmica dos componentes. É neste estágio que a medição da fineza (Escala Hegman) válida se o objetivo de redução granulométrica foi atingido.

Por fim, na etapa de diluição, busca-se um regime turbulento por meio de pás inclinadas para garantir a homogeneização completa da mistura. Nesta fase, o ajuste da viscosidade, seja ela rotacional ou de efluxo, define as propriedades de aplicação do produto.

A complexidade e a interdependência dessas etapas reforçam a necessidade de um Sistema de Gestão da Qualidade robusto. A variabilidade do processo só pode ser monitorada com precisão se o sistema de medição for confiável. Portanto, a aplicação da ferramenta MSA torna-se o alicerce para assegurar que as decisões tomadas sobre a temperatura de moagem, a fineza do pigmento e a viscosidade final sejam baseadas em dados isentos de variações excessivas causadas por operadores ou equipamentos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade

A Qualidade, longe de ser um conceito estático, evoluiu de uma atividade focada na inspeção do produto final para uma filosofia de gestão estratégica e sistêmica. No ambiente de mercado altamente competitivo, a qualidade é considerada uma vantagem competitiva imprescindível para a sobrevivência das organizações.

No contexto industrial contemporâneo, representa mais do que um atributo do produto final; ela é a própria filosofia central de gestão, um motor de competitividade e um critério fundamental para a sustentabilidade organizacional. A transição da fase de simples inspeção para a Gestão da Qualidade Total (GQT) marca a evolução de uma mentalidade focada na detecção de falhas para uma cultura de prevenção e de melhoria contínua (LOBO, 2020).

W. Edwards Deming é amplamente reconhecido como o principal arquiteto da revolução da Qualidade no pós-guerra, especialmente no Japão. Seu trabalho não se limitava a ferramentas estatísticas, mas propunha uma transformação radical na forma de gerenciar uma organização, conforme detalhado em sua obra *Out of the Crisis* (1986) (DEMING, 1986).

A essência da filosofia Deming reside na crença de que a maior parte dos problemas de qualidade e produtividade (estimada em 85% por ele) é inerente ao sistema, e não aos trabalhadores. Consequentemente, a responsabilidade pela melhoria recai diretamente sobre a alta gerência.

Deming afirmava que: "*Qualidade não vem da inspeção, mas de melhoria do processo de produção.*" (DEMING, 1986).

Essa citação sintetiza a transição do foco: a inspeção é tardia e dispendiosa; o verdadeiro valor reside em prevenir a ocorrência do defeito na fonte, por meio do aprimoramento contínuo do processo produtivo.

A aplicação prática dos princípios de Deming é frequentemente ilustrada pelo ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act / Planejar-Executar-Verificar-Agir), um

modelo de melhoria contínua que garante a estabilidade e o aprimoramento constante dos sistemas industriais.

Joseph M. Juran, outro gigante da área, trouxe uma perspectiva mais orientada para a gestão e o planejamento. Sua contribuição central, articulada em obras como *Juran on Planning for Quality* (1988), é a definição de qualidade como "adequação ao uso" (*fitness for use*).

Juran (1988) define a qualidade como: "*Aquelas características do produto que vão ao encontro das necessidades do cliente e proporcionam satisfação em relação ao produto.*".

Essa definição é crucial, pois introduz o elemento da satisfação do cliente de forma direta, abrangendo o desempenho, a confiabilidade, a durabilidade e o suporte técnico (JURAN, 1988).

O modelo gerencial mais influente de Juran é a trilogia da qualidade, que divide a gestão da qualidade em três processos universais inter-relacionados:

- Planejamento da Qualidade: Identificar os clientes, determinar suas necessidades e projetar produtos e processos que as atendam (Qualidade pelo Design).
- Controle da Qualidade: Manter o processo dentro dos limites operacionais, comparando o desempenho real com as metas e agindo sobre as variações (Corrigir o que está fora do padrão).
- Melhoria da Qualidade: Gerenciar a evolução para níveis de desempenho inéditos, realizando projetos de melhoria *breakthrough* (ultrapassar os padrões atuais, focando na eliminação de problemas crônicos).

Ao dar ênfase à responsabilidade da gestão em planejar a qualidade desde o início e não apenas controlá-la no fim, Juran estabeleceu a qualidade como uma função administrativa vital, comparável às finanças ou ao marketing.

Philip B. Crosby (1979), com sua abordagem direta e pragmática, focou na importância da definição clara de requisitos e na implantação de uma cultura de prevenção. Seu principal legado é a popularização do conceito de que a Qualidade, quando bem gerenciada, é financeiramente vantajosa.

Sua definição central é que: "*Qualidade quer dizer conformidade com as exigências*" (CROSBY, 1979).

Crosby defendia os quatro absolutos da qualidade, que são pilares conceituais de sua filosofia: definição (qualidade é conformidade com os requisitos), sistema (o sistema de qualidade é a prevenção), padrão de desenvolvimento (o padrão de desempenho é zero defeito) e medição (a medição da qualidade é o preço da não conformidade) (CROSBY, 1979).

A ideia de Zero Defeito (fazer certo da primeira vez, *Doing It Right The First Time* - DIRFT) é um padrão de desempenho moral e gerencial, que exige o compromisso de todos. A máxima "Qualidade é Grátis" (*Quality is Free*) reflete a visão de que os custos incorridos para *prevenir* defeitos são sempre menores do que o Custo da Má Qualidade (PNC), que inclui perdas por sucata, retrabalho, garantias, inspeção e perda de clientes (CROSBY, 1979).

Armand V. Feigenbaum é creditado por cunhar o termo Controle da Qualidade Total (CQT), enfatizando que a qualidade é um esforço que deve envolver toda a organização, e não apenas o departamento de produção.

O cerne da sua contribuição é a visão holística e interfuncional da Qualidade. Ele argumentava que a qualidade é influenciada desde o *design* (engenharia), passando pelas compras (fornecedores), vendas, até a instalação e o serviço pós-venda.

Feigenbaum também introduziu o conceito de "Planta Escondida" (*Hidden Plant*), sugerindo que uma parte significativa da capacidade produtiva de uma fábrica (ele estimava em até 40%) é desperdiçada em atividades não essenciais, como retrabalho e correção de erros. O TQC busca resgatar essa capacidade, eliminando o desperdício inerente à não qualidade (FEIGENBAUM, 1991).

A materialização dessa filosofia no cenário industrial é o Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ), padronizado por normas internacionais como a ISO 9001. Tais normas consolidam a abordagem de processo, o pensamento baseado em risco e o ciclo de melhoria contínua (*Plan-Do-Check-Act*) como requisitos mínimos para que uma indústria demonstre sua capacidade de

fornecer consistentemente produtos e serviços que atendam aos requisitos do cliente e aos regulatórios aplicáveis (AIAG, 2010).

A Qualidade na Indústria representa uma jornada estratégica que exige o comprometimento da liderança, o envolvimento de todos os colaboradores, a sistematização dos processos e o uso contínuo de dados para a tomada de decisão, uma disciplina essencial para a perenidade e o sucesso competitivo global (SOUZA, 2018).

2.2 Sistemas de Gestão da Qualidade SGQ

O Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) representa o ponto de convergência entre a teoria acadêmica da Qualidade e a prática gerencial. Sua função primordial é estabelecer uma estrutura formal, documentada, interfuncional e cíclica, que permite a uma organização, seja ela industrial ou de serviços, alcançar consistentemente seus objetivos de qualidade. O SGQ, em sua forma mais reconhecida (baseado na ISO 9001), não é prescritivo em termos de resultados, mas sim em termos de processos e métodos gerenciais.

Deming insistia que a má qualidade é, em grande parte, resultado de um sistema falho, não de pessoas mal-intencionadas. O SGQ responde diretamente a essa crítica ao formalizar a interconexão entre todos os departamentos (o "sistema" da empresa). Ele exige que a Alta Direção não apenas *apoie* a Qualidade, mas que seja a liderança ativa na definição da política e dos objetivos (DEMING, 1986).

O SGQ da ISO 9001 é estruturado explicitamente em torno do ciclo Planejar-Executar-Verificar-Agir (PDCA), a ferramenta essencial de Deming:

- P (Planejar): Corresponde às cláusulas de Contexto da Organização (4), Liderança (5) e Planejamento (6), onde se definem riscos, oportunidades, objetivos e recursos necessários.
- D (Executar): Coberto pelas cláusulas de Suporte (7) e, principalmente, Operação (8), onde os processos planejados são executados.

- C (Verificar): Materializado na cláusula de Avaliação de Desempenho (9), que exige monitoramento, medição, auditorias internas e a análise crítica pela direção.
- A (Agir): Formalizado na cláusula de Melhoria (10), que trata de não conformidades, ações corretivas e a melhoria contínua do SGQ.

Desta forma, o SGQ traduz a filosofia de Deming de que a Qualidade é uma espiral ascendente de aprendizado e aprimoramento, e não um estado final estático.

Abordando a visão por Juran, a ótica do SGQ aborda: planejamento, foco no cliente e liderança gerencial. O SGQ moderno reflete a abordagem de gestão de Juran, que prioriza o planejamento e a definição de qualidade pela satisfação do cliente.

O princípio Juraniano de "adequação ao uso" é o propósito final de um SGQ. A ISO 9001 exige, na cláusula de contexto da organização, que a empresa compreenda as necessidades e expectativas de suas partes interessadas, em particular o cliente. Além disso, a cláusula de operação, que trata dos requisitos para produtos e serviços, garante que a "voz do cliente" seja traduzida em especificações concretas, alinhando-se perfeitamente com a fase de planejamento da qualidade da trilogia de Juran.

Ao exigir que a Qualidade seja tratada como um processo gerencial fundamental, e não como uma atividade para isso, o SGQ consolida a visão de Juran sobre a responsabilidade da Alta Direção em gerenciar a Qualidade.

A contribuição de Crosby é a base conceitual e o imperativo financeiro do SGQ. O primeiro absoluto de Crosby – "Qualidade é conformidade com os requisitos" – é o fundamento prático de todas as atividades de *Controle* dentro do SGQ. A meta implícita do SGQ é o zero defeito (fazer certo da primeira vez), pois qualquer não conformidade dispara o processo de ação corretiva.

O SGQ da ISO 9001 adota a Mentalidade de Risco (Cláusula 6.1) como o mecanismo de prevenção que Crosby tanto defendia. Em vez de esperar pelo defeito e inspecioná-lo (detecção), a empresa deve identificar proativamente o que pode dar errado (riscos) e o que pode dar certo (oportunidades). Isso

representa a institucionalização do Segundo Absoluto de Crosby, transformando a Prevenção em um requisito de sistema.

Embora a ISO 9001 não use diretamente o termo "Preço da Não Conformidade (PNC)", ela exige o monitoramento do desempenho e a avaliação dos resultados (Cláusula 9). A implantação de um SGQ bem-sucedido visa, invariavelmente, a redução dos custos operacionais decorrentes de falhas, comprovando a máxima de Crosby de que "Qualidade é Grátis" – ou seja, o SGQ é um investimento que se paga pela eliminação do desperdício (CROSBY, 1979).

O conceito de CQT (Controle da Qualidade Total) de Feigenbaum é a espinha dorsal do escopo de um SGQ.

O SGQ é, por definição, um sistema de Qualidade Total. A ISO 9001 exige que o planejamento e a operação envolvam todas as áreas que impactam o produto ou serviço, desde a aquisição (compras) até os recursos humanos (treinamento), e a infraestrutura (manutenção), conforme detalhado na cláusula Suporte (7) (AIAG, 2010). Isso impede que a qualidade se torne uma responsabilidade isolada de um único departamento, abordando a crítica de Feigenbaum de que "qualidade é trabalho de todos, mas pode acabar sendo de ninguém" se não for gerida de forma integrada.

A exigência da norma de que a Alta Direção demonstre liderança e compromisso (Cláusula 5) e garanta o alinhamento da Política da Qualidade com o direcionamento estratégico da empresa é o reconhecimento formal do papel da gestão em ser o motor do CQT.

Em suma, o Sistema de Gestão da Qualidade é o instrumento de governança que permite à indústria moderna transformar as filosofias de Deming (sistema e ciclo de melhoria), Juran (foco no cliente e planejamento), Crosby (prevenção e conformidade) e Feigenbaum (envolvimento total) em uma disciplina operacional robusta, certificável e, acima de tudo, estratégica. É a garantia de que a Qualidade não é um evento casual, mas sim um resultado planejado e gerido.

2.3 Normas

A consolidação de um sistema de gestão da qualidade em escala global foi impulsionada pela criação de normas internacionais que padronizam requisitos e processos, garantindo a consistência dos produtos e serviços oferecidos ao mercado (Souza, 2018). No setor industrial, e especificamente no automotivo, duas normas destacam-se como pilares fundamentais para a excelência operacional: a ISO 9001 e a IATF 16949.

2.3.1 ISO:9001

A criação e a evolução da família de normas ISO 9000 são marcos cruciais na história da Qualidade, fornecendo o arcabouço internacionalmente aceito para a implementação de um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ). A principal norma certificável, a ISO 9001, é o padrão pelo qual as organizações demonstram sua capacidade de fornecer consistentemente produtos e serviços que satisfazem os requisitos do cliente e os estatutários e regulamentares aplicáveis (ISO, 2019).

A norma é desenvolvida e publicada pela *International Organization for Standardization (ISO)*, através do Comitê Técnico (TC) 176, sendo revisada periodicamente para garantir que permaneça relevante frente às transformações do mercado global.

A trajetória da norma ISO 9001 reflete uma transição fundamental na filosofia da qualidade, movendo-se progressivamente do foco em inspeção e documentação para uma gestão estratégica e preventiva. Iniciada em 1987 com ênfase na Garantia da Qualidade, a norma passou por uma mudança radical em 2000, unificando padrões e introduzindo a Abordagem por Processos e o ciclo PDCA de Deming, transformando o Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) em um sistema integrado. O amadurecimento ocorreu com a versão de 2015, que alinhou o SGQ aos objetivos estratégicos do negócio ao adotar a Mentalidade de Risco (cumprindo o princípio de prevenção de Crosby) e exigir o envolvimento da Alta Liderança, consolidando a qualidade como um motor de sustentabilidade e excelência.

A revisão de 2000 foi o momento em que a ISO 9001 internalizou de forma mais clara a filosofia de Deming e Juran. Ao abandonar a rigidez dos 20 elementos de 1994 e adotar a abordagem por processos, a norma passou a exigir que as organizações gerenciassem suas atividades como uma rede interconectada de processos, nos quais as saídas de um são as entradas de outro. Essa mudança alinhou o SGQ diretamente ao Ciclo PDCA (Planejar-Executar-Verificar-Agir) de Deming, exigindo melhoria contínua e foco na prevenção, em vez de apenas na correção.

A versão ISO 9001:2015, a atual, representa o amadurecimento do SGQ, consolidando-o como uma ferramenta de gestão estratégica, e não apenas um requisito técnico. As grandes mudanças refletem a necessidade do mercado global de que a qualidade seja integrada à tomada de decisão da alta direção (ISO, 2019).

A ISO 9001 é o modelo que define o que é um SGQ para fins de certificação e conformidade internacional. A norma fornece os requisitos que a organização deve atender para gerenciar a Qualidade de forma eficaz e consistente.

2.3.2 IATF 16949

A IATF 16949:2016 (International Automotive Task Force) representa a norma de Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) global e específica para o setor automotivo. Ela não é uma norma autônoma, mas atua como um suplemento à ISO 9001:2015, definindo os requisitos adicionais de SGQ para o projeto, desenvolvimento, produção e, quando relevante, instalação e serviços de produtos relacionados ao setor automotivo (AIAG, 2010).

A existência desta norma é uma resposta direta à necessidade de padronização e mitigação de riscos em uma cadeia de suprimentos globalizada, complexa e exigente, onde a falha de um único componente pode resultar em *recalls* dispendiosos e impactar a segurança do consumidor.

O desenvolvimento da norma começou na década de 1990, com o objetivo de harmonizar os diferentes requisitos de qualidade automotiva que existiam em

países como EUA (QS-9000), Alemanha (VDA 6.1), França (EAQF) e Itália (AVSQ) (IATF, 2016).

Em 1999, a International Automotive Task Force (IATF) – um grupo de fabricantes automotivos globais (OEMs) – colaborou com a ISO para publicar a ISO/TS 16949. A sigla 'TS' indicava uma Especificação Técnica, demonstrando sua ligação direta, mas suplementar, à ISO 9001 (IATF, 2016).

A transição para a IATF 16949:2016 marcou a separação formal da publicação (a IATF detém a propriedade da norma) e a exigência de que ela fosse implementada em conjunto com a ISO 9001:2015. Esta evolução garantiu alinhamento estrutural, a IATF 16949 adota a estrutura de alto nível (Anexo SL) da ISO 9001:2015, facilitando a integração com outros sistemas de gestão (como a ISO 14001).

O corpo da IATF 16949 contém todos os requisitos da ISO 9001:2015, adicionando requisitos automotivos sob o mesmo número de cláusula, proporcionando uma fácil integração entre as duas normas, porém com um olhar mais crítico e detalhista (IATF, 2016).

A IATF 16949 eleva o patamar do SGQ ao introduzir requisitos obrigatórios que abordam os riscos inerentes à produção automotiva, concentrando-se em prevenção de defeitos, redução de variação e eliminação de desperdício.

Diferentemente da ISO 9001, que apenas sugere o uso de ferramentas, a IATF 16949 torna mandatório o uso das Ferramentas Essenciais (Core Tools) do AIAG (Automotive Industry Action Group), que são técnicas de engenharia da Qualidade para Planejamento e Controle (IATF, 2016). Sendo elas:

- APQP (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto): Garante que a Qualidade seja planejada *desde o início* do design e desenvolvimento do produto e processo.
- FMEA (Análise de Modos e Efeitos da Falha): Ferramenta de Prevenção de Defeitos (Crosby) utilizada para identificar e mitigar potenciais falhas no design do produto e no processo de manufatura antes que ocorram.

- CEP (Controle Estatístico do Processo): Aplica a estatística para monitorar e manter a estabilidade e capacidade dos processos, combatendo a variabilidade.
- PPAP (Processo de Aprovação de Peça de Produção): Formaliza a aprovação das peças pelo cliente, assegurando que o fornecedor compreende e atende a todos os requisitos.

Além desses pontos, a IATF 16949 introduz uma ênfase inédita na Segurança do Produto, exigindo processos documentados que abordam questões de segurança relacionadas a produtos e processos, incluindo requisitos de rastreabilidade (Cláusula 8.5.2.1), gerenciamento de risco e responsabilidade (IATF, 2016).

A norma impõe ainda, um controle rigoroso sobre a cadeia de suprimentos, estendendo o SGQ para os fornecedores. Ela exige uma análise de risco e, dependendo do resultado, a realização de auditorias de segunda parte (auditorias em fornecedores), garantindo que a Qualidade Total de Feigenbaum seja estendida e controlada ao longo de toda a teia produtiva automotiva.

É obrigatório avaliar a viabilidade de manufatura de novos produtos ou mudanças em processos (Cláusula 8.3.4.4), um requisito que força o pensamento preventivo. Além disso, a IATF exige o desenvolvimento de Planos de Contingência muito mais robustos (Cláusula 6.1.2.3) para lidar com falhas de equipamentos, interrupções externas e outros eventos que possam afetar a entrega.

A IATF 16949 não é apenas uma certificação de Qualidade; ela é a formalização dos mais altos padrões de gestão de risco e excelência operacional para a indústria automotiva. Ao complementar a ISO 9001, ela integra as melhores práticas gerenciais e técnicas em um único sistema, garantindo que a Qualidade seja inerente, e não acidental, aos componentes que sustentam a segurança e o desempenho dos veículos globais.

2.4 MSA

No contexto da Qualidade, a capacidade de tomar decisões corretas – seja para aprovar um produto, ajustar um processo ou implementar uma melhoria – depende diretamente da confiabilidade dos dados utilizados. A Análise do Sistema de Medição (MSA) é a metodologia científica e experimental projetada para avaliar a qualidade e a adequação de um sistema de medição antes que seus dados sejam utilizados para controle de processo ou aceitação de produto.

O MSA atende diretamente ao princípio de W. Edwards Deming sobre a necessidade de eliminar a variabilidade e garante que o foco na Prevenção (Crosby) seja apoiado por dados isentos de erros significativos. Sem um sistema de medição validado, a variância observada no processo não pode ser separada da variância induzida pela própria medição.

O MSA, como um manual padronizado, foi desenvolvido no âmbito da AIAG (Automotive Industry Action Group), um consórcio de fabricantes e fornecedores automotivos norte-americanos, no início dos anos 90, como parte das Core Tools (Ferramentas Essenciais). Seu desenvolvimento ocorreu paralelamente ao surgimento da QS-9000 e, posteriormente, da ISO/TS 16949 e IATF 16949. O objetivo era harmonizar e elevar a exigência na validação de dados, um requisito crítico em um setor onde a segurança e a precisão dimensional são vitais (AIAG, 2010).

A base conceitual do MSA é a metrologia e a estatística, formalizada no modelo da Variação Total de um processo. Este modelo estabelece que a variância total observada (aquilo que o medidor nos mostra) é a soma da variância do processo real e da variância do sistema de medição:

2.5 Fontes de Variação

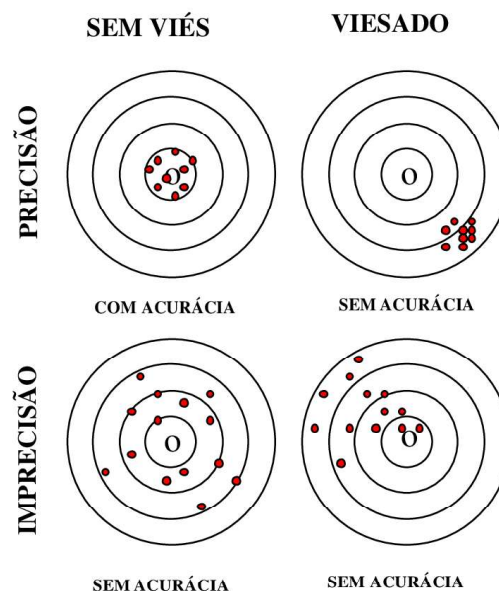
O SGQ, conforme a IATF 16949, exige que as fontes de variação sejam investigadas. O MSA as classifica em dois grupos principais: Localização (Acurácia) e Dispersão (Precisão) (AIAG, 2010).

As fontes mais importantes de variação no sistema de medição são: instrumento (dispositivo de medição/gage), pessoa (avaliador/operador) e método (procedimento de medição).

2.5.1 Variação da Localização (Acurácia)

A variação da localização é um componente da acurácia do sistema de medição e se refere à proximidade da média das medições obtidas em relação ao valor de referência verdadeiro. Ela é decomposta em três fatores principais que quantificam e caracterizam a exatidão do sistema (AIAG, 2010). . A figura 1 mostra como se comportam conjuntos de dados em relação dispersão de precisão e acurácia.

Figura 1: Precisão e acurácia



Fonte: Martinez, 2025

O primeiro fator é a Tendência (*Bias* ou Vício), que é definida como a diferença entre a média observada de múltiplas medições de uma amostra e o seu valor de referência conhecido. Uma Tendência elevada indica que o sistema está medindo de forma consistente um valor acima ou abaixo daquele que deveria ser o valor real, sinalizando um erro sistemático no equipamento ou no método (AIAG, 2010).

O segundo fator é a Estabilidade, que avalia a variação total nas medições de uma mesma amostra padrão, ao longo de um período de tempo prolongado. Um sistema de medição é considerado estável quando sua Tendência e dispersão se mantêm constantes com o passar do tempo, não apresentando desvios na média (AIAG, 2010).

Por fim, a Linearidade refere-se à variação da Tendência (*Bias*) em diferentes pontos de toda a faixa de operação do instrumento. Um instrumento com alta linearidade terá uma Tendência constante, independentemente de estar medindo um valor no limite inferior ou no limite superior de sua faixa de medição. A falta de linearidade indica que o erro sistemático do instrumento muda conforme a magnitude da característica medida (AIAG, 2010).

2.5.2 Variação da Dispersão (Precisão)

A variação da dispersão, que está associada à precisão do sistema de medição, refere-se à magnitude das variações observadas entre medições sucessivas, realizadas sob condições controladas. Ela se decompõe em dois componentes principais, que, juntos, formam o estudo de aceitabilidade do sistema.

O primeiro componente é a Repetitividade (*Equipment Variation - EV*), que mede a variação inerente ao próprio instrumento de medição. A Repetitividade é observada quando o mesmo operador mede a mesma peça várias vezes, utilizando o mesmo dispositivo (AIAG, 2010). A pergunta central respondida pela Repetitividade é: "Quanto o instrumento é capaz de repetir a mesma leitura?"

O segundo componente é a Reprodutibilidade (*Appraiser Variation - AV*), que quantifica a variação entre as médias das medições obtidas por diferentes operadores, usando o mesmo dispositivo e na mesma peça. Essa variação reflete o erro causado pelo fator humano ou pela inconsistência no método de execução do teste entre os indivíduos (AIAG, 2010). A questão chave é: "Os operadores concordam entre si?"

A combinação dessas duas fontes de erro resulta no R&R do Dispositivo de Medição *Gage Repeatability & Reproducibility*, que é a variação total

combinada da repetitividade e da reprodutibilidade. Este estudo é o principal indicador estatístico utilizado para determinar a aceitabilidade do sistema de medição para uma aplicação específica, comparando a variação total do sistema com a tolerância de engenharia ou a variação do processo.

2.6. Diretrizes para a Determinação do R&R (*Gage R&R*)

O manual MSA (4ª Edição) estabelece diretrizes claras para a execução dos estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R), geralmente utilizando 10 peças, 3 operadores e 3 repetições (10 x 3 x 3). Para calcular os componentes da variação R&R, existem três métodos primários com diferentes níveis de complexidade e poder de análise (AIAG, 2010).

O Método da Amplitude (*Range*) é o mais simples e frequentemente utilizado para uma avaliação inicial (*screening*) rápida do sistema. Sua limitação, no entanto, reside no fato de não conseguir decompor a variação em Repetitividade e Reprodutibilidade, nem identificar a variação entre operadores, sendo, por isso, considerado menos robusto.

Um método mais comum é o Método da Média e Amplitude ($\bar{X}$ -bar/R), que já fornece estimativas separadas da Repetitividade (*Equipment Variation* - EV) e da Reprodutibilidade (*Appraiser Variation* - AV). Sua base de cálculo utiliza a média das amplitudes dentro de cada operador para estimar a Repetitividade, e as médias das medições de cada operador para estimar a Reprodutibilidade (AIAG, 2010). A principal limitação deste método é a suposição de que não há interação estatística entre o operador e a peça, ou seja, assume-se que o erro de um operador é o mesmo em toda a faixa de medição, o que nem sempre corresponde à realidade.

O Método ANOVA (Análise de Variância) é reconhecido como o método estatístico mais preciso e poderoso, sendo o preferido para a validação de sistemas de medição críticos. Sua grande vantagem é permitir o isolamento do componente de variância devido à interação entre o operador e a peça (AIAG, 2010). Essa interação é crucial, pois ocorre quando um operador mede peças pequenas de forma consistentemente diferente de peças grandes. A ANOVA utiliza a análise de variância para estimar as contribuições de variância para as

peças, operadores, a interação operador-peça e o erro residual (repetitividade), oferecendo a decomposição mais completa e confiável das fontes de erro.

O sucesso de um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) depende diretamente da confiabilidade desses dados. A aplicação rigorosa do MSA, especialmente por meio dos estudos de R&R, garante que as decisões de Qualidade – em linha com a prevenção e o controle estatístico (Deming) – sejam baseadas em medições que reflitam a realidade do processo, e não no erro do sistema de medição.

2.7 Viscosidade Rotacional

A viscosidade é uma característica reológica fundamental que mede a resistência de um fluido ao movimento sob a aplicação de uma força mecânica, conhecida como tensão de cisalhamento. O controle rigoroso dessa propriedade é vital para prever e garantir o escoamento, manuseio, processamento, qualidade do revestimento e a estabilidade dos produtos. Para essa análise reológica, o viscosímetro rotacional é amplamente reconhecido como um padrão de referência global (MEZGER, 2014). A Figura 2 mostra uma fotografia de um viscosímetro rotacional.

Figura 2: Fotografia de um viscosímetro rotacional



Fonte: Comunicação Braseq, 2025

O Princípio de Funcionamento do Viscosímetro Rotacional Brookfield baseia-se na medição do torque necessário para girar um elemento sensor, chamado *spindle* (eixo ou fuso), que está imerso no fluido de teste, a uma velocidade angular controlada (ABNT, 2011). O mecanismo opera girando o

spindle através de uma mola calibrada. A resistência viscosa que o fluido exerce ao movimento rotacional gera um torque que, por sua vez, resulta na deflexão dessa mola. O torque medido é, então, diretamente proporcional à viscosidade do fluido. O instrumento calcula a viscosidade a partir desta deflexão, da velocidade de rotação do *spindle* e de suas dimensões geométricas. Na prática, quanto maior for a força (torque) necessária para manter a rotação constante, maior será a viscosidade do material (MEZGER, 2014). O *spindle* é o elemento que entra em contato direto com o fluido, e sua forma e tamanho são cruciais para definir a faixa de medição. A Figura 3 mostra uma figura dos spindles empregados em um viscosímetro rotacional para viscosidades regulares.

Figura 3: Spindles para um viscosímetro (RV)



Fonte: Laboraltec, 2025.

Uma das maiores vantagens do viscosímetro rotacional reside na sua versatilidade em medir tantos fluidos newtonianos (cuja viscosidade é constante, independente da taxa de cisalhamento) quanto fluidos não-newtonianos (onde a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento, como tintas e revestimentos). Outra vantagem é sua precisão, relacionada ao fato do método de medição ser em regime permanente.

Para cobrir a ampla faixa de viscosidades industriais, a Brookfield classifica seus equipamentos com base no torque de mola (capacidade de deflexão) em categorias como LV (*Low Viscosity*), RV (*Regular Viscosity*), HA

(*High Viscosity A*) e HB (*High Viscosity B*), abrangendo desde solventes finos até asfaltos e resinas de alta concentração.

2.8 Viscosidade de efluxo

Os copos de escoamento são projetados com base em normas técnicas que definem rigorosamente suas dimensões, volume e, crucialmente, o diâmetro de seus orifícios calibrados, sendo amplamente utilizados para o controle de qualidade rápido na indústria.

Um desses modelos, o Copo Ford, é essencial para tintas, vernizes e lacas, seguindo normas como a ABNT NBR 5849 e a ASTM D1200. É fabricado com diferentes orifícios (Nº 1 a 5), onde cada diâmetro abrange uma faixa específica de viscosidade. Contudo, o Copo Ford possui uma limitação técnica: ele não deve ser empregado em produtos tixotrópicos ou não-newtonianos, pois o escoamento rápido ou lento demais, gera um cisalhamento que pode causar imprecisão na leitura da viscosidade, dependendo da reologia do fluido (ASTM, 2010).

De maneira similar, o Copo DIN (em conformidade com a norma DIN 53211) também é um aparelho simples e seguro, baseado no princípio de efluxo. Ele é igualmente empregado em indústrias de tintas e revestimentos, oferecendo uma rápida avaliação da viscosidade, tipicamente com um tempo de avaliação em até 100 segundos.

A medição de viscosidade utilizando os viscosímetros de efluxo (Copo DIN ou Copo Ford) é um procedimento padronizado que transforma uma medida de tempo em uma inferência de viscosidade cinemática aparente, sendo fundamental para o controle em linha da diluição dos produtos.

O processo inicia-se com a etapa mais crítica: o controle de temperatura. A viscosidade dos fluidos é extremamente sensível à variação térmica; portanto, a amostra de tinta deve ser rigorosamente estabilizada na temperatura especificada pela norma ou pela empresa (ASTM, 2010). Isso é frequentemente realizado por meio de banho-maria.

Primeiramente, realiza-se o bloqueio e enchimento: o operador deve bloquear o orifício de efluxo na base do copo, tipicamente com um dedo ou uma placa, e em seguida, preencher o recipiente com a amostra de tinta até o nível da borda ou da linha de enchimento marcada. Feito isso, procede-se à remoção do excesso de material, utilizando uma espátula ou régua que é deslizada sobre a borda superior do copo, garantindo que o volume de teste seja exato e preciso. O terceiro passo é o Início do Efluxo e Cronometragem: o operador, com um cronômetro em mãos, deve iniciar a contagem do tempo no momento exato em que o orifício é liberado e o fluxo de líquido é iniciado. Essa ação deve ser simultânea, pois qualquer atraso no acionamento do cronômetro introduzirá erro sistemático na medição. Por fim, chega-se ao ponto crítico de leitura: a contagem do tempo é interrompida no momento em que a primeira interrupção no fluxo contínuo ocorre — ou seja, quando a corrente de líquido que sai do orifício é quebrada (ASTM, 2010). Este é o ponto de maior subjetividade do teste e, consequentemente, a principal fonte de erro de Reprodutibilidade (*Appraiser Variation* - AV) entre diferentes operadores, o que justifica a necessidade de treinamento rigoroso, conforme identificado na análise do MSA. O resultado da medição em segundos (ex: 40 segundos DIN 4mm), pode ser convertido para viscosidade cinemática utilizando uma equação empírica específica para cada tipo e tamanho de furo de um copo. Quanto maior o tempo de escoamento, maior é a viscosidade do fluido. Essa medição rápida e prática permite aos operadores de produção fazerem ajustes imediatos de diluição, garantindo que a viscosidade esteja dentro da faixa ideal para a aplicação (seja por *spray*, rolo ou imersão), prevenindo defeitos como escorrimento (*sagging*) ou falhas na atomização.

2.9 Escala Hegman (H) e Fineza de Moagem

O teste de tamanho de partícula é um procedimento fundamental de controle de qualidade realizado durante e após a etapa de moagem de tintas e revestimentos. O instrumento mais utilizado para essa avaliação, tanto em laboratório quanto na produção, é o grindômetro — também chamado de gradiômetro ou gage de Hegman. Embora simples, trata-se de uma ferramenta de alta precisão composta por um bloco de aço plano e polido, no qual uma ou duas canaletas são usinadas.

Para realizar o teste o produto é pipetado sobre a extremidade de faixa 0 H dentro da canaleta do grindômetro e arrastado com o auxílio da lâmina até a outra extremidade. O valor na escala que houve arrasto de produto é então anotado.

A leitura no gradrômetro Hegman não fornece o tamanho real da partícula individual, mas sim o tamanho dos aglomerados de partículas ou das partículas grosseiras presentes na amostra, o que permite inferir a qualidade da dispersão. A escala mais comum utilizada para essa inferência é a Escala Hegman (H), que possui uma correlação linear direta com o sistema métrico em micrômetros. Uma leitura 8H corresponde a 0 microns (dispersão perfeita no ponto zero da ranhura), enquanto 0H corresponde a 100 microns (presença de aglomerados grosseiros no ponto máximo de profundidade). Essa correlação linear garante que um número Hegman mais alto sempre indique uma maior fineza de moagem, ou seja, partículas mais dispersas.

Figura 4: Grindômetro Hegman



Fonte: MAST, 2025

O grindômetro Hegman é uma ferramenta essencial no Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) de indústrias de revestimento, sendo utilizado para diversas funções de controle. Ele é crucial no controle de *lote*, pois determina se um lote de produção atingiu o nível de moagem e dispersão exigido antes de ser liberado. Atua também como uma ferramenta de prevenção de, uma vez que partículas grosseiras e aglomerados são a causa direta de defeitos de acabamento, como riscos, perda de brilho ou sedimentação; o teste, ao identificar essas falhas precocemente, evita o retrabalho e a não-conformidade. Além disso, é utilizado para a Validação de Processo, aferindo a eficácia de equipamentos de moagem e dispersão, como os moinhos de bolas. Embora o

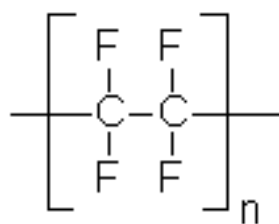
teste Hegman seja inerentemente subjetivo, pois a leitura depende da interpretação visual do operador sobre o momento exato em que as estrias aparecem, ele é amplamente aceito na indústria. Consequentemente, no contexto de um SGQ robusto (como exigido pelas normas ISO 9001 e IATF 16949), a padronização rigorosa do método de raspagem, o treinamento constante do operador e a definição clara dos limites de aceitação tornam-se fatores cruciais para assegurar a confiabilidade da medição.

2.10 PTFE

Os revestimentos antiaderentes revolucionaram a culinária e diversas indústrias, sendo o mais famoso deles baseado no PTFE (politetrafluoretileno). O PTFE é um fluoropolímero termoplástico conhecido por sua inércia química, resistência a altas temperaturas e, crucialmente, seu baixo coeficiente de atrito, o que o torna ideal como antiaderente (PUTS, 2019).

O PTFE é popularmente conhecido pela marca Teflon, registrada pela DuPont (agora de propriedade da Chemours, que foi desmembrada da DuPont). Sua estrutura química é notavelmente estável, consistindo em longas cadeias de carbono totalmente saturadas por átomos de flúor. A figura 5 mostra a representação de uma molécula de PTFE.

Figura 5: Politetrafluetileno



Fonte: GESTIS, 2025

O mero básico é o tetrafluoretileno (C₂F₄)_n. A forte ligação carbono-flúor confere ao material uma alta resistência térmica e química, bem como sua característica antiaderente (PUTS, 2019).

A produção de PTFE ocorre por meio da polimerização do monômero tetrafluoretileno (TFE), um processo no qual pequenas moléculas se unem para

formar longas cadeias poliméricas. O ponto de partida é o próprio TFE (C_2F_4), um gás altamente reativo utilizado como monômero básico. Para que a reação ocorra, o TFE é submetido a condições controladas de alta pressão e temperatura, na presença de um iniciador — normalmente um peróxido ou outro composto capaz de gerar radicais livres. Esses radicais iniciam o processo ao atacar a dupla ligação do TFE, abrindo-a e transformando o monômero em uma estrutura ativa que continua reagindo. A partir desse momento, tem início o crescimento da cadeia por meio da polimerização via radicais livres: cada novo radical formado reage sucessivamente com outras moléculas de TFE, repetindo o ciclo milhões de vezes até formar as longas cadeias que caracterizam o PTFE (PUTS, 2019).

O produto obtido é um polímero branco, sólido e altamente cristalino. Dependendo da aplicação desejada, ele pode ser disponibilizado sob a forma de pó ou de dispersão aquosa, permitindo seu uso em processos industriais variados, especialmente na produção de revestimentos de alta performance.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo terá como finalidade a verificação do sistema de medição nos testes de processo e de liberação das características especiais do processo produtivo, de acordo com o PFMEA e Plano de Controle dos produtos.

Inicialmente serão levantados os testes que se enquadram nesses pontos e avaliados os mais críticos analisando juntamente o histórico de reclamações e problemas de qualidade.

Todas as amostras coletadas serão de lotes de produtos comuns de linha com frequência de produção aceitável, ao menos um lote por mês, e os operadores analisados serão escolhidos aleatoriamente nos dois turnos de operação.

3.1 Medição de temperatura durante a moagem

O controle de temperatura é um fator essencial durante o processo de moagem de tintas e revestimentos. Nessa etapa, os pigmentos e as cargas são desagregados e distribuídos de forma uniforme no veículo líquido ou na resina, normalmente por meio de equipamentos como moinhos de esfera (*bead mills*) ou moinhos de rolo. A energia mecânica aplicada pelo equipamento, seja pelo atrito ou colisão das esferas ou pela rotação dos rolos, é convertida em energia térmica, elevando a temperatura do sistema. Esse aumento ocorre devido à dissipação de energia e ao atrito constante entre o meio de moagem, as partículas sólidas e o veículo líquido.

A temperatura no processo é aferida automaticamente por um medidor de temperatura digital localizado na saída do moinho. Se a temperatura atinge o limite máximo para aquele determinado produto, a operação é parada automaticamente, evitando assim o superaquecimento daquele lote.

Para se determinar o valor de referência da temperatura os dados de temperatura de moagem de um determinado produto avaliado no experimento foram acompanhados durante 10 lotes de produção. O valor no momento em que a temperatura se estabiliza-se foi definido como referência.

Para a realização desse MSA foram analisados em diferentes dias e diferentes lotes do mesmo produto a variação da temperatura durante o processo de moagem.

As medições foram realizadas durante os dois turnos de operação e com diferentes operadores durante o processo de moagem e aferição. A característica crítica para esse processo é a temperatura de saída do produto no moinho.

3.1.1 Critérios de Aceitação

O critério de aceitação foi determinado pela empresa segundo a criticidade do processo e do modo de falha proveniente do controle ineficiente dessa etapa.

A figura 6 mostra os critérios de aceitação para um estudo de estabilidade para uma análise gráfica dos resultados.

Figura 6: Critérios de aceitação para estabilidade - temperatura de moagem

Análise dos Resultados – Gráfico Estabelecer os limites de controle e avaliar as condições fora de controle utilizando-se da análise gráfica convencional de uma carta de controle. Critérios de Aceitação: <u>Análise Gráfica para as Médias e para as Amplitudes</u> Existem pontos fora do limite de controle? Existem sete ou mais pontos consecutivos acima ou abaixo da linha média? Existem sete ou mais pontos consecutivos crescentes ou decrescentes? OBS: Caso a resposta para alguma das perguntas seja positiva, o resultado está reprovado.

Fonte: O autor, 2025.

A figura 7 mostra os critérios de aceitação para um estudo de tendência para uma análise de resultados numérica.

Figura 7: Critérios de aceitação para a tendência - temperatura de moagem

Análise dos resultados – Numérica

- Calcular a tendência média nas n leituras
- Calcular o desvio padrão da repetitividade
- Determine se a repetitividade (%VE) é aceitável baseada na variação esperada do processo (máx 10%), e caso a repetitividade esteja acima de 10% o resultado está reprovado

Tendência é aceitável (estatisticamente zero) no nível α se:

- Determinar o valor da estatística t para a tendência
- Zero cai dentro do intervalo de confiança, e caso o zero não caia dentro do intervalo de confiança, o resultado está reprovado

Fonte: O autor, 2025.

3.1.2 Equipamentos

- Controlador de temperatura
- Termômetro de espeto

Todos os equipamentos foram calibrados no mês em que os estudos foram realizados.

3.1.3 Execução

Para a realização do teste foi determinado um produto em específico. Após uma hora de operação a temperatura de saída do produto foi aferida e comparada com a temperatura indicada no controlador de temperatura da máquina.

Cada um dos lotes foi avaliado pelo mesmo operador e durante variados momentos durante os dois turnos de produção.

3.2 Teste de Fineza Hegman

Para a realização desse MSA foram considerados diferentes produtos com especificação de liberação $>7H$ na escala HEGMAN, onde qualquer amostra com especificação abaixo de 7 foi classificada como “REPROVADA”.

Para a realização das medições foram separadas 50 amostras de produtos com especificação de liberação de tamanho de partícula durante várias

etapas do processo de moagem e avaliado a competência do operador em aprovar ou reprovar os lotes testados.

As amostras estavam distribuídas aleatoriamente com 40 amostras aprovadas e 10 reprovadas, cada avaliador avaliou a mesma amostra três vezes, totalizando 150 medições por operador. A característica crítica desse processo é o tamanho de partícula, que impacta diretamente na aderência do produto ao substrato.

3.2.1 Critérios de Aceitação

O critério de aceitação foi determinado pela empresa segundo a criticidade do processo e do modo de falha proveniente do controle ineficiente dessa etapa. A figura 8 mostra um critério de aceitação para um estudo de R&R atributivo.

Figura 8: Critérios de aceitação para um estudo de R&R Atributo

Decisão para o sistema de medição quanto ao avaliador	Eficácia	% de Falha	% de Falso Alarme
Aceitável	≥90%	≤2%	≤5%
Marginalmente Aceitável	≥80%	≤5%	≤10%
Inaceitável	≥80%	> 5%	> 10%

Fonte: O autor, 2025.

3.2.2 Equipamentos

- Grindômetro HEGMAN
- Pipeta de pasteur

Todos os equipamentos foram calibrados no mês em que os estudos foram realizados.

3.2.3 Execução

Para a realização do teste, uma quantidade do produto é pipetada sobre a extremidade de escala Hegman 0. Com o auxílio da lâmina o produto é puxado aplicando força constante e com a lâmina posicionada perpendicularmente a superfície do equipamento.

Após a realização o operador avalia a amostra como “APROVADA” ou “REPROVADA”. O valor é anotado e comparado com o valor de referência para aquela amostra.

3.3 Teste de Viscosidade (viscosímetro rotacional)

O Viscosímetro Brookfield funciona medindo o torque necessário para girar um elemento sensor — o *spindle* — imerso no fluido, mantendo uma velocidade de rotação constante e controlada.

Para a realização do teste o operador homogeneíza a amostra de produto já ajustada para a temperatura determinada de medição durante 50 segundos a uma rotação de 500 RPM.

O spindle correto é acoplado ao viscosímetro, de acordo com a faixa de viscosidade, e abaixado para que o spindle seja submerso no produto. Após o acionamento do viscosímetro aguarda-se o tempo de 30 segundos para estabilização e a viscosidade é anotada.

Para a realização desse MSA, foi utilizado um lote de um produto comum de linha de produção.

A amostra analisada foi avaliada anteriormente ao longo de uma semana para garantir que sua viscosidade se apresentasse estável ao longo do estudo. A temperatura definida pela empresa para medições de viscosidade com o viscosímetro rotacional é de 25 °C para todos os produtos de linha de produção. Durante essa análise a média dos valores ao longo da semana foi definida como referência para as medições do estudo.

3.3.1 Critérios de aceitação

O critério de aceitação foi determinado pela empresa segundo a criticidade do processo e do impacto gerado a variação de viscosidade atingir o cliente final.

A figura 9 mostra os critérios de aceitação para um estudo de estabilidade para uma análise gráfica dos resultados:

Figura 9: Critérios de aceitação para estabilidade - viscosidade rotacional

Análise dos Resultados – Gráfico
Estabelecer os limites de controle e avaliar as condições fora de controle utilizando-se da análise gráfica convencional de uma carta de controle.
Critérios de Aceitação: <u>Análise Gráfica para as Médias e para as Amplitudes</u> Existem pontos fora do limite de controle? Existem sete ou mais pontos consecutivos acima ou abaixo da linha média? Existem sete ou mais pontos consecutivos crescentes ou decrescentes?
OBS: Caso a resposta para alguma das perguntas seja positiva, o resultado está reprovado.

Fonte: O autor, 2025.

A figura 10 mostra os critérios de aceitação para um estudo de tendência para uma análise de resultados numérica.

Figura 10: Critérios de aceitação para a tendência - viscosidade rotacional

Análise dos resultados – Numérica
- Calcular a tendência média nas n leituras - Calcular o desvio padrão da repetitividade - Determine se a repetitividade (%VE) é aceitável baseada na variação esperada do processo (máx 10%), e caso a repetitividade esteja acima de 10% o resultado está reprovado Tendência é aceitável (estatisticamente zero) no nível α se: - Determinar o valor da estatística t para a tendência - Zero cai dentro do intervalo de confiança, e caso o zero não caia dentro do intervalo de confiança, o resultado está reprovado

Fonte: O autor, 2025.

3.3.2 Equipamentos

- Viscosímetro rotacional Brookfield
- Béquer de 200 ml
- Termômetro de espeto
- Homogeneizador
- Banho maria

3.3.3 Execução

Para a realização das medições os operadores homogeneizaram a amostra a 500 RPM durante 50 segundos utilizando o homogeneizador de bancada, posteriormente a amostra foi colocada em banho maria a 25 °C até que a temperatura se estabilize a 25 °C.

A amostra então foi levada ao viscosímetro já configurado para medições com o Spindle 4, viscosidades de 500 cP a 1000 cP. O equipamento operou por 30 segundos para que a viscosidade medida se estabilize.

3.4 Teste de Viscosidade de efluxo (copo)

O teste de viscosidade com viscosímetro de copo DIN é um método simples, rápido e amplamente utilizado na indústria de tintas e revestimentos, especialmente para controle de qualidade em linha de produção e no *site* do cliente. Este método mede a viscosidade de efluxo ou a viscosidade cinemática aparente.

Para a realização do teste o produto é ajustado para a temperatura adequada, informada no exame do item. É escolhido então o copo adequado (DIN 2, DIN 4, DIN 8, FORD 4, ZHAN 2, ZHAN 3) de acordo com o produto a ser analisado.

O copo é colocado sobre um suporte para sua medição e nivelamento, o operador interrompe o escoamento do produto com o dedo. Após essa etapa produto é adicionado ao topo e nivelado com o auxílio de uma espátula. O cronômetro é acionado ao mesmo tempo que o dedo é removido do orifício do copo. A contagem de tempo é finalizada ao primeiro interrompimento do fluxo de produto escoando pelo copo.

Para a realização desse MSA foram utilizados 10 lotes de produtos diferentes com diferentes faixas de especificação de liberação em um mesmo modelo de viscosímetro.

A amostra analisada foi avaliada anteriormente ao longo de uma semana para garantir que sua viscosidade se apresentasse estável ao longo do estudo, a média durante esse período foi definida como referência.

A temperatura definida pela empresa para medições de viscosidade com o viscosímetro de efluxo para o produto analisado é de 23 °C.

3.4.1 Critérios de aceitação

O critério de aceitação foi determinado pela empresa segundo a criticidade do processo e do impacto gerado a variação de viscosidade atingir o cliente final.

Figura 11: Critérios de aceitação Gage R&R - viscosidade de efluxo

Analisar Total Gage R&R:
<u>Ndc</u> > 5, caso menor, o resultado está reprovado
GAGE R&R:
≤ 10% aceitável
≥ 20% aceitável se aprovado pelo cliente
≥ 30% não aceitável

Fonte: O autor, 2025.

3.4.2 Equipamentos

- Viscosímetro de efluxo tipo DIN 4
- Termômetro digital
- Banho maria
- Cronômetro

3.4.3 Execução

Foram separadas 10 amostras de diferentes produtos com faixas variadas de viscosidade. A amostra foi homogeneizada durante 5 minutos na velocidade de 150 RPM, após a homogeneização foi levada ao banho maria para que atingisse a temperatura de 23 °C.

Com a amostra na temperatura adequada o produto foi adicionado ao viscosímetro e o operador bloqueou o furo do copo com o dedo, o excesso de produto na parte superior do copo foi removido com a ajuda de uma espátula.

Com o cronômetro em mãos o operador acionou o tempo ao mesmo tempo que liberou o produto para fluir pelo furo. Foi analisado o escoamento e o cronômetro acionado no momento que o fluxo apresentou o primeiro interrompimento de fluxo.

Cada operador realizou a medição de cada amostra em triplicata repetindo o procedimento de medição.

RESULTADOS

Os resultados obtidos foram compilados e analisados utilizando o software Minitab e comparados com os critérios de aceitação já definidos pela empresa.

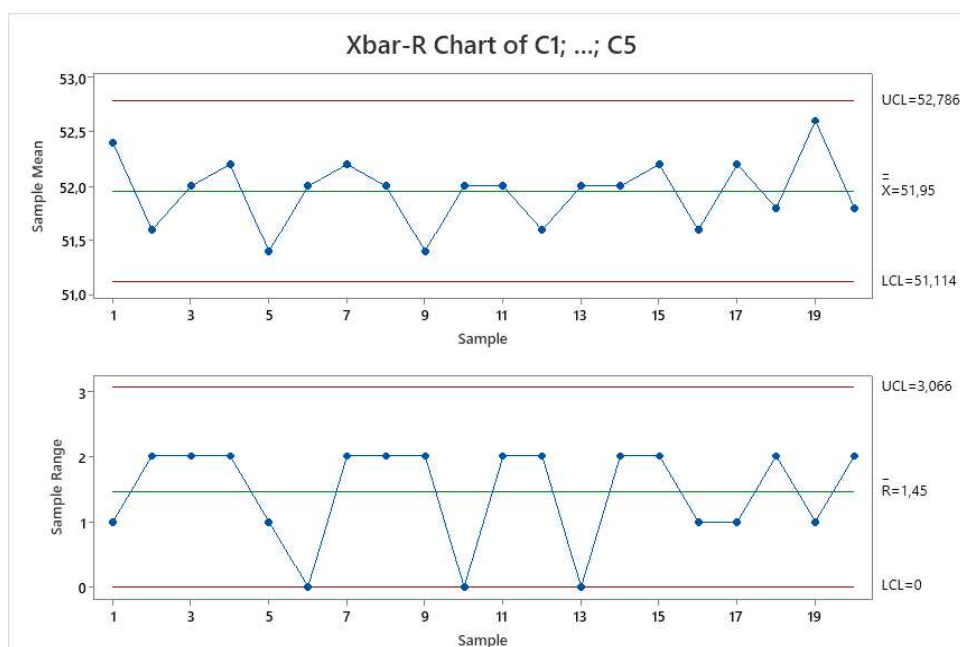
4.1 Temperatura da Moagem

Durante a coleta de dados notou-se que a temperatura do produto durante a moagem aumenta a medida que operação se inicia até seu ponto de estabilização. O planejamento da coleta de informações após um determinado tempo se mostrou eficaz para que a temperatura aferida fosse representativa com o esperado do processo.

4.1.1 Estabilidade

A Figura 12 mostra a carta X-Barra/R utilizada na análise da estabilidade do método gráfico de acordo com o Manual MSA 4 Edição para o teste de temperatura da moagem.

Figura 12: Carta X-barra/R - temperatura de moagem



Fonte: O autor, 2025.

Foram avaliados os graficamente a média e amplitude das medições realizadas, avaliando se houveram pontos fora do limite de controle, sete ou mais

pontos consecutivos acima ou abaixo da linha da média e sete ou mais pontos consecutivos crescentes ou decrescentes.

O Gráfico de Média não apresentou nenhum ponto fora dos Limites de Controle Superior (UCL = 52,786) e Inferior (LCL = 51,114). Todos os pontos se distribuíram aleatoriamente em torno da Linha Central ($\bar{X}$ = 51,95), indicando que a média das medições não variou significativamente ao longo das medições. O Gráfico de Amplitude (R) também não mostrou pontos fora dos limites (UCL = 3,066), confirmando que a variação de curto prazo (Repetitividade) se manteve constante.

Também não se apresentaram sete ou mais pontos acima ou abaixo da média e sete ou mais pontos crescentes ou decrescentes. O sistema de medição está sob controle estatístico, fornecendo dados consistentes ao longo do tempo para o ponto de controle de temperatura.

4.1.2 Tendência

A tabela 1 mostra os resultados obtidos para o estudo de estabilidade utilizando o a análise de t-valor do software Minitab.

Tabela 1: Resultados tendência - temperatura da moagem

Número de amostras	Média	Desvio padrão	Erro padrão da média	Índice de confiança de 95% para μ
15	52,01	0,1598	0,0413	-0,0751 ; 0,1018

Fonte: O autor, 2025.

Para que a tendência seja aceitável, o intervalo de confiança de 95% para a tendência deve conter o valor zero. Como mostra a Figura 11 o intervalo de confiança obtido foi de (-0,0751;0,1018).

A tabela 2 mostra os resultados para o teste de hipótese.

Tabela 2: Teste estatística t - temperatura da moagem

Teste	
Hipótese nula	$H_0: \mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \mu \neq 0$
Valor-T	0,32
Valor-P	0,751

Fonte: O autor, 2025.

Uma vez que o valor zero está contido no intervalo de confiança, conclui-se que não há evidência estatística de tendência significativa no sistema de medição da temperatura de moagem. O desvio de 0,1598 é aceitável dentro da faixa de erro aleatório.

Como o p-valor é alto, superior a 0,05, não há evidência significativa para rejeitar-se a hipótese nula, e, portanto, a média é representativa. O t-valor apresenta um resultado de 0,32, o que indica que o sistema de medição está levemente deslocado positivamente do centro das medições.

Figura 13: Análise numérica de repetitividade - temperatura da moagem

Componentes	n(m)	Média (X)	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média	Estatística t	g (Grau de Liberdade)		Tendência	Intervalo de Confiança da Tendência - 95%	
									Inferior	Superior
Valor Medido	15	52,0133	0,1598	0,0413	0,32	14		0,1598	-0,0751	0,1018
$Tendência - [\sigma_b(t_{v,1-\frac{\alpha}{2}})] \leq zero \leq Tendência + [\sigma_b(t_{v,1-\frac{\alpha}{2}})]$ portanto $-0,0751 \leq zero \leq 0,1018$										
Análise Numérica da Repetitividade: $\%VE = 100 [VE/VT] = 100[\sigma_r/VT] = 9,59\%$										

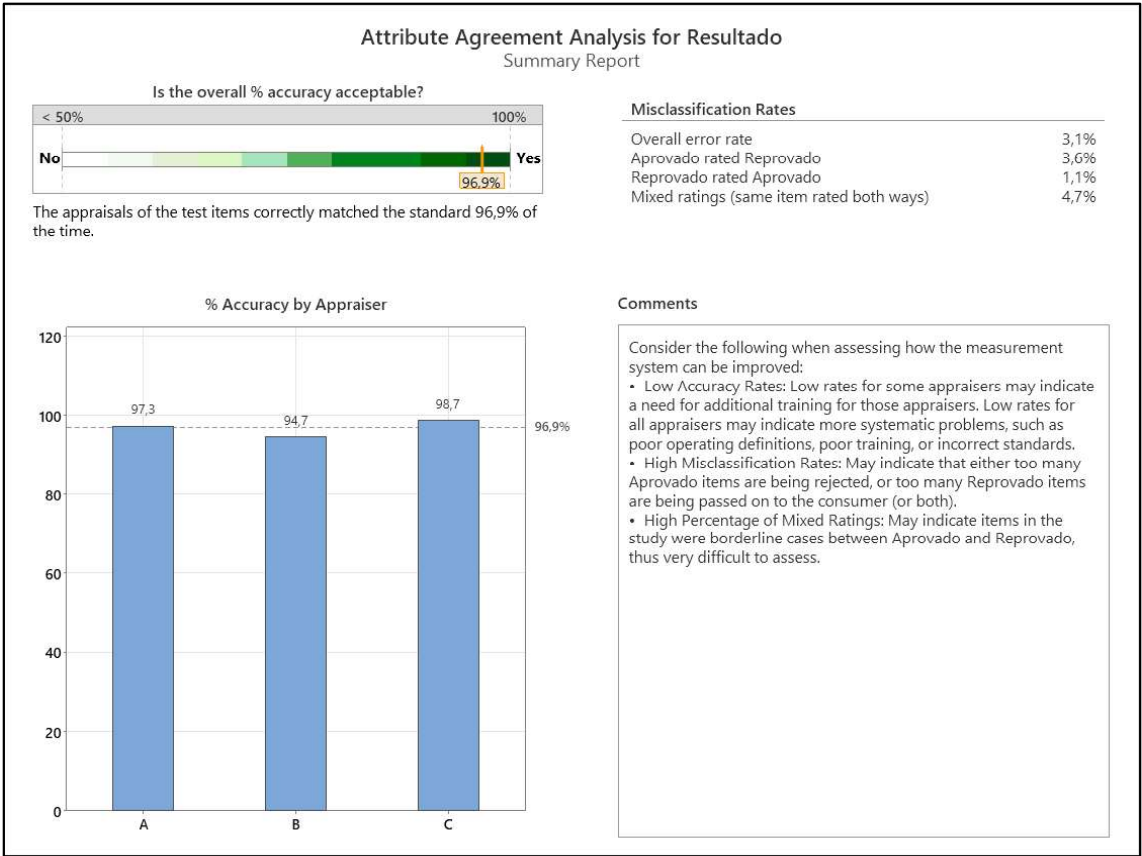
Fonte: O autor, 2025.

A análise da Repetitividade (%VE) indicou que a Variação do Equipamento (VE) representa 9,59% da Variação Total (VT), um valor aceitável, ou seja, menor que 10%.

4.2 Fineza Hegman

A figura 14 mostra os resultados do estudo de Gage R&R para o teste de fineza Hegman.

Figura 14: Resultados R&R - fineza Hegman



Fonte: O autor, 2025.

Consegue-se notar uma variação nos resultados de cada operador que participou dos estudos, com resultados para acurácia de 98,7% para o operador C; 97,3% para o operador A; 94,7% para o operador B.

A maior dificuldade durante esse processo de medição foi a avaliação individual de cada operador em cada amostra, essa avaliação apesar de ser bem detalhada em métodos documentados pela empresa e os operados terem sido retreinados para a realização do estudo, ainda há a variação proveniente da visualização e entendimento de cada um no método. Notamos isso mais claramente pois não houve nenhum operador com 100% de acerto nas avaliações de amostras.

Como demonstrado na Figura 13, o método de medição se mostrou aceitável uma vez sua acurácia superou os limites designados de 90%. A porcentagem de falso alarme também foi aceitável, uma vez que ficou em apenas 1,1%. A maior fonte de erro vem porcentagem de falhas, com o valor de 3,6% mostra uma tendência preocupante do método de aprovar amostras reprovadas, ainda sim o estudo foi aprovado por ficar abaixo do limite de recomendação de aprovação por ressalvas. Todavia é necessário um retreinamento dos operadores e a realização de um novo estudo se falhas subsequentes forem encontradas no processo.

O relatório aponta 4,7% de discordâncias entre os operadores, que são itens onde o operador deu classificações diferentes em suas repetições (ex: Aprovado, Reprovado, Aprovado).

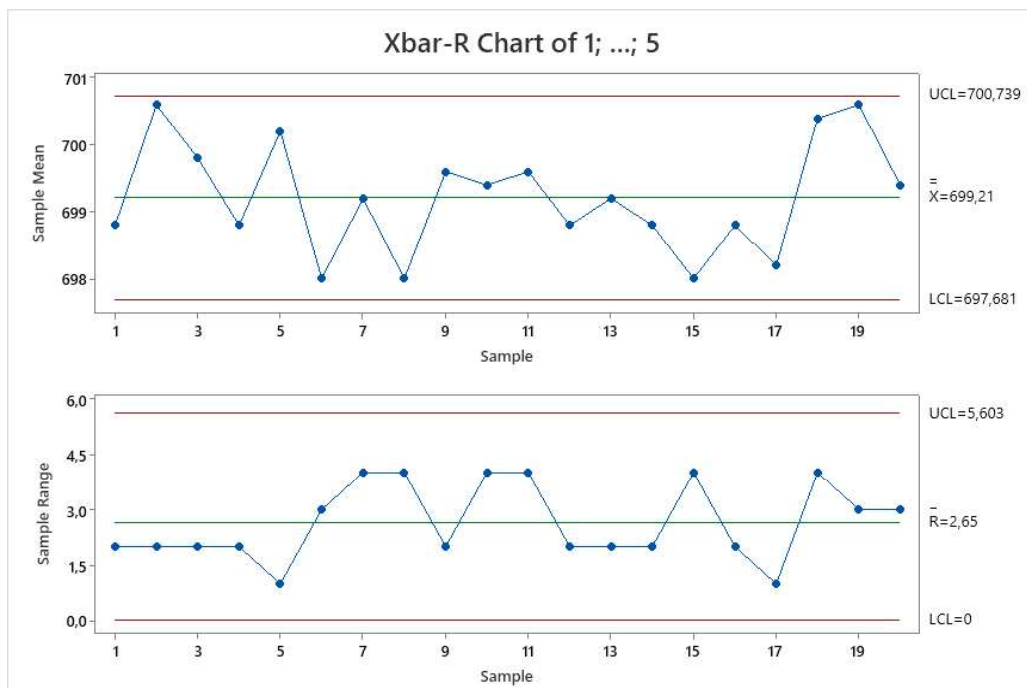
4.3 Viscosidade Rotacional

Esse método de determinação da viscosidade mostrou-se sensível a variações de temperatura, em um cenário ideal a amostra deveria ser medida com o laboratório climatizado para a temperatura de medição. Realizando esses ajustes durante o processo de medição eliminou-se uma fonte de erro e contribuiu para o sucesso do estudo.

4.3.1 Estabilidade

A Figura 15 mostra a carta X-Barra/R utilizada na análise da estabilidade do método gráfico de acordo com o Manual MSA 4 Edição para o teste de viscosidade rotacional.

Figura 15: Carta X-barra/R - viscosidade rotacional



Fonte: O autor, 2025.

No método gráfico, como mostra a Figura 15, o método se provou eficaz pois não apresentou desvios e seguiu os critérios para aprovação. Não houveram pontos fora do limite de controle, não houveram sete ou mais pontos consecutivos acima ou abaixo da linha média e não houveram sete ou mais pontos consecutivos crescentes ou decrescentes.

4.3.2 Tendência

A tabela 1 mostra os resultados obtidos para o estudo de estabilidade utilizando o a análise de t-valor do software Minitab.

Tabela 3: Resultados tendência - viscosidade rotacional

Número de amostras	Média	Desvio padrão	Erro padrão da média	Índice de confiança de 95% para μ
12	699,37	0,91	0,263	-0,211 ; 0,945

Fonte: O autor, 2025.

Para a tendência o método provou-se novamente eficaz. Como apresentado na 18 zero ficou dentro do intervalo de confiança de 95% da tendência ($-0,211 < 0 > 0,945$) e o sistema apresentou repetitividade aceitável com 1,4%.

A tabela 2 mostra os resultados para o teste de hipótese.

Tabela 4: Teste estatística t - viscosidade rotacional

Teste	
Hipótese nula	$H_0: \mu = 0$
Hipótese alternativa	$H_1: \mu \neq 0$
Valor-T	1,40
Valor-P	0,19

Fonte: O autor, 2025.

Como o p-valor é alto, superior a 0,05, aceita-se a hipótese nula, e, portanto, não há evidências para se rejeitar a hipótese nula. O t-valor apresenta um resultado de 1,40, o que indica que o sistema de medição está levemente deslocado positivamente do centro das medições.

Figura 16: Análise numérica de repetitividade - viscosidade rotacional

Análise Numérica dos Resultados:									
Componentes	n(m)	Média (X)	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média	Estatística t	g (Grau de Liberdade)		Tendência	Intervalo de Confiança da Tendência - 95%
									Inferior Superior
Valor Medido	12	699,367	0,910	0,263	1,40	11		0,367	-0,211 0,945
$Tendência - [\sigma_b(t_{v,1-\frac{\alpha}{2}})] \leq zero \leq Tendência + [\sigma_b(t_{v,1-\frac{\alpha}{2}})]$ portanto $-0,211 \leq zero \leq 0,945$									
Análise Numérica da Repetitividade:									
$\%VE = 100 [VE/(VT/6)] = 100[\sigma_r/(VT/6)] = 1,4\%$									

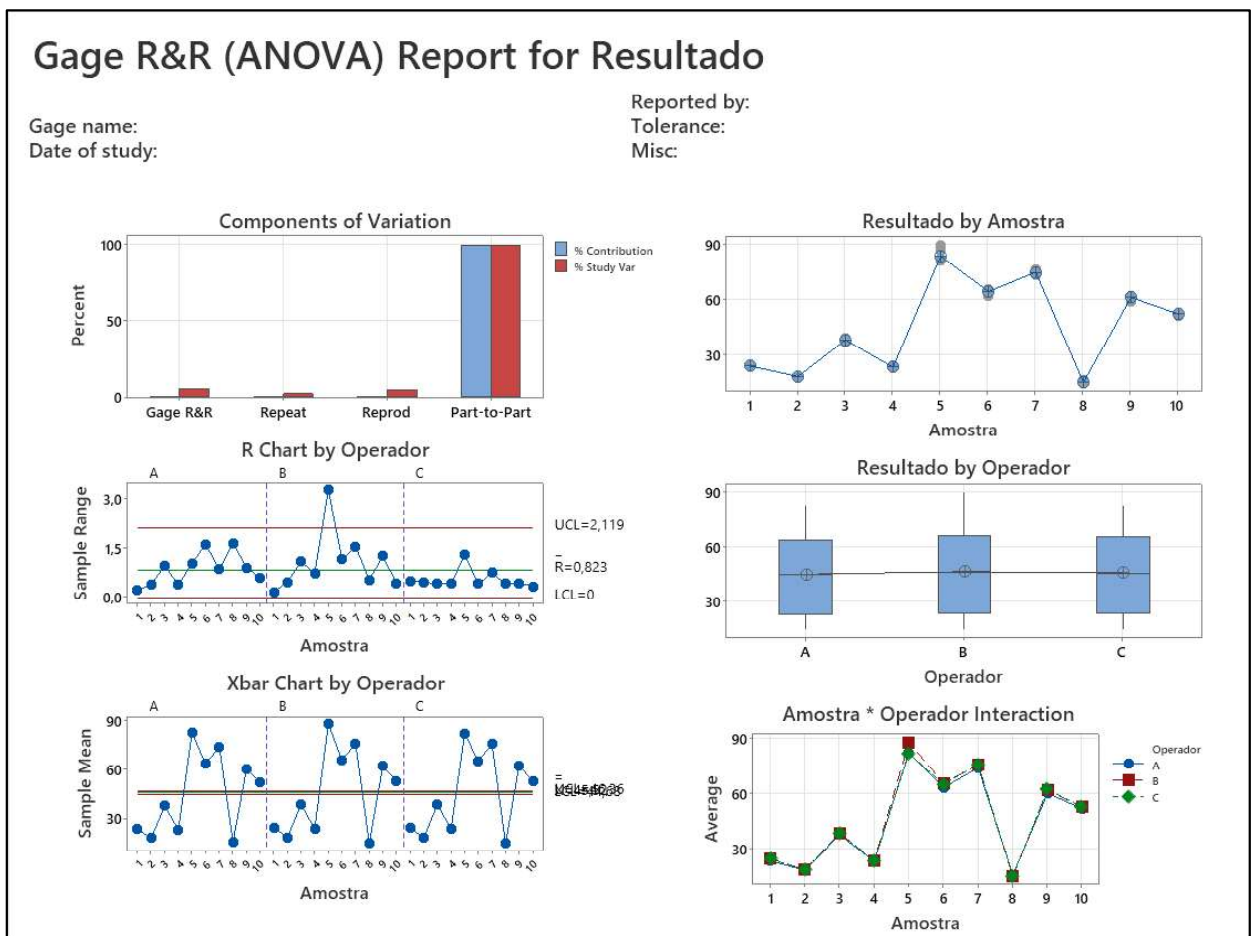
Fonte: O autor, 2025.

A análise da Repetitividade (%VE) indicou que a Variação do Equipamento (VE) representa 9,59% da Variação Total (VT), um valor aceitável, ou seja, menor que 10%.

4.4 Viscosidade de efluxo

A figura 17 mostra o relatório obtido através do software Minitab para o estudo de Gage R&R do teste de viscosidade de efluxo medido através de um copo DIN 4.

Figura 17: Gage R&R ANOVA - viscosidade de efluxo



Fonte: O autor, 2025.

A figura 18 mostra os resultados numéricos do teste de Gage R&R.

Figura 18: Gage R&R resultados numéricos - viscosidade de efluxo

Gage R&R

Variance Components

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	1,859	0,29
Repeatability	0,308	0,05
Reproducibility	1,551	0,24
Operador	0,393	0,06
Operador*Amostra	1,157	0,18
Part-To-Part	633,607	99,71
Total Variation	635,466	100,00

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1,3633	8,180	5,41
Repeatability	0,5548	3,329	2,20
Reproducibility	1,2453	7,472	4,94
Operador	0,6272	3,763	2,49
Operador*Amostra	1,0758	6,455	4,27
Part-To-Part	25,1716	151,029	99,85
Total Variation	25,2084	151,251	100,00

Number of Distinct Categories = 26

Fonte: O autor, 2025.

Para o total Gage R&R valor de 5,41% está bem abaixo do limite de 10%, o que classifica o sistema de medição de viscosidade copo DIN como aceitável. O sistema é excelente para distinguir as variações entre as amostras.

A variação entre as amostras é a fonte dominante, o que é o resultado ideal em um estudo R&R, significando que o sistema de medição tem capacidade (Número de Categorias Distintas = 26) para separar lotes bons de ruins.

A Reprodutibilidade 4,94% é significativamente maior que a Repetitividade 2,20%. Este é um achado comum em testes de efluxo, indicando que a variação entre os operadores é o maior contribuinte para o erro do sistema, possivelmente devido à subjetividade na técnica de cronometragem, também demonstra que o método utilizado de medição e preparação da amostra foi eficiente.

A contribuição de 4,27% para a interação é notável. Isso indica que a diferença nas medições entre os operadores não é constante; a variação do operador "A" é diferente da variação do operador "B" em certas faixas de viscosidade (amostras). Isso reforça a necessidade de padronização do método de execução do teste.

CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo geral avaliar a confiabilidade metrológica de quatro sistemas de medição críticos no controle de processos de fabricação de tintas e revestimentos, alinhando-se aos rigorosos requisitos do Measurement System Analysis (MSA) da AIAG e da norma IATF 16949. O estudo de caso, de natureza quantitativa e experimental, demonstrou ser um instrumento eficaz para a garantia da qualidade e para a minimização do custo da má qualidade.

Os objetivos específicos foram integralmente alcançados. Os estudos de estabilidade e tendência para a temperatura de moagem confirmaram que o sistema está estatisticamente estável, sem pontos fora dos limites de controle ($UCL = 52,786$; $LCL = 51,114$). A análise numérica de tendência validou a acurácia do sistema, uma vez que o valor zero foi incluído no intervalo de confiança de 95% ($-0,0751$; $0,1018$). Além disso, a Repetitividade (%VE) apresentou um valor de 9,59%, situando-se abaixo do limite crítico de 10% exigido para a aceitação do equipamento.

Quanto à viscosidade rotacional, o método também se provou eficaz e sob controle estatístico, com a média das medições distribuída aleatoriamente em torno da linha central de 699,21 cP. O estudo de tendência reforçou a confiabilidade do sistema, apresentando um intervalo de confiança de ($-0,211$; $0,945$), o qual contempla o valor zero e valida a ausência de vícios significativos no medidor. A repetitividade para este teste foi considerada excelente, representando apenas 1,4% da variação total, valor significativamente inferior ao teto de aceitação da norma

Para a Viscosidade de Efluxo (Copo DIN), o estudo Gage R&R por ANOVA resultou em um valor de Total Gage R&R de apenas 5,41%, classificando o sistema como aceitável e com alta capacidade de distinção entre as amostras.

Por fim, o Teste de Fineza Hegman demonstrou um sistema aceitável com 96,9% de eficácia e uma taxa de falha que apesar de baixa é um ponto de melhoria pertinente para o futuro.

Apesar da aceitabilidade estatística global, a análise aprofundada revelou a Reprodutibilidade (variação entre operadores) como a maior fonte de variação no teste de viscosidade copo, e a subjetividade na interpretação visual como o ponto fraco no teste de Fineza Hegman, evidenciado pela alta taxa de Classificações Mistas (Mixed Ratings). As principais recomendações convergem para a padronização do fator humano através de treinamentos focados na reprodutibilidade e na criação de bancos de amostras de fronteira para a calibração visual do teste de fineza.

Vale ressaltar que é extrema importância o estudo para garantir que o sistema de medição da planta seja robusto e garantir a conformidade com a norma IATF:16949.

BIBLIOGRAFIA

ARGAZINSKI, J. K. et al. Fluoropolímeros Termoprocessáveis em Aplicações de Proteção à Corrosão para a Indústria Química. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 5849: Tintas e vernizes – Determinação da viscosidade pelo copo Ford – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 3219: Plásticos: Polímeros/resinas no estado líquido, emulsões ou dispersões: Determinação da viscosidade utilizando um viscosímetro rotacional com velocidade de cisalhamento definida. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 9000: Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASTM. ASTM D1200: Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup. West Conshohocken: ASTM International, 2010.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). Measurement Systems Analysis (MSA). 4. ed. Detroit: Chrysler Corporation; Ford Motor Company and General Motors Corporation, 2010.

BROOKFIELD, L. Viscosity Testing with the Brookfield Viscometer. Middleboro: AMETEK Brookfield, 2020.

COMUNICAÇÃO BrasEq. Exatidão dos viscosímetros Brookfield. BrasEq Blog, 20 mar. 2012. Disponível em: <https://braseq.blogspot.com/2012/03/exatidao-dos-viscosimetros-brookfield>. Acesso em: 04 set. 2025.

CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos. 2. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2014.

CROSBY, P. B. Quality is Free: The Art of Making Quality Certain. New York: McGraw-Hill, 1979.

DEMING, W. E. Out of the Crisis. Cambridge: MIT Center for Advanced Engineering Study, 1986.

FEIGENBAUM, A. V. Total Quality Control. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

FUNDO, A. J. S.; FONSECA, L. M. Metrologia e Qualidade. 2. ed. Lisboa: LIDEL, 2018.

GAZETA DA SEMANA. PPG comemora 50 anos no Brasil com expansão das operações, digitalização e tecnologias mais sustentáveis. São Paulo, 13 dez. 2023. Disponível em: [endereço do site]. Acesso em: 18 ago. 2025.

GRUPO MAST. Grind Gage (Grindômetros): Linha de Produtos - Dispersão e Moagem. [S.l.]: Grupo MAST. Disponível em: <https://www.mastgrupo.com.br/produto/146/grind-gage-grindometros>. Acesso em: 29 jul. 2025.

IATF – INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE. IATF 16949: 2016: Sistemas de gestão da qualidade: requisitos particulares para a aplicação da ABNT NBR ISO 9001: 2015 para a produção de peças originais e peças de serviço pertinentes na indústria automotiva. 1. ed.: IATF, 2016

INSTITUTO ALEMÃO DE SEGURO SOCIAL DE ACIDENTES (DGUV). GESTIS-Stoffdatenbank (Base de Dados de Substâncias). Disponível em: [Endereço da página inicial/busca da base de dados]. Acesso em: 29 jul. 2025.

INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA (IQA). Análise de sistemas de medição – MSA, Manual de referência. 2. ed. São Paulo: IQA, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 2431: Paints and varnishes — Determination of flow time by use of flow cups. Genebra: ISO, 2019.

JURAN, J. M. Juran on Planning for Quality. New York: The Free Press, 1988.

KIRCHNER, Arndt et al. Gestão da qualidade: segurança do trabalho e gestão ambiental. Tradução de Ingeborg Sell. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 240 p.

LABORALTEC. Spindles RV HA HB - Viscosímetro Brookfield. [S.l.]: Laboraltec. Disponível em: <https://laboraltec.com.br/produto/spindles-rv-ha-hb-viscosimetro-brookfield/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

LOBO, Renato Nogueirol. Gestão da Qualidade. São Paulo: Saraiva, 2020.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

MARTINEZ, A. L. Ilustração sobre os conceitos de viés, precisão e acurácia. ResearchGate. [S.l.], [2014]. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Ilustracao-sobre-os-conceitos-de-vies-precisao-e-acuracia_fig1_265842871. Acesso em: 30 ago. 2025.

MEZGER, Thomas G. The Rheology Handbook: For users of rotational and oscillatory rheometers. 4. ed. Hannover: Vincentz Network, 2014.

NETZSCH GRINDING & DISPERSING. Sistema de Moinho de Circulação ZETA. Selb: Netzsch. Disponível em: <https://grinding.netzsch.com/pt-BR/produtos-e-solucoes/moagem-a-umido/sistema-de-moagem-zeta>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PROLAB. Viscosímetro Copo Ford Kit Completo em Aço Inox. [S.l.]: Prolab. Disponível em: <https://www.prolab.com.br/produtos/materiais-de-metal/viscosimetro-em-metal/viscosimetro-copo-ford-kit-completo-em-aco-inox/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

PUTS, G. J.; CROUSE, P.; AMEDURI, B. M. Polytetrafluoroethylene: Synthesis and Characterization of the Original Extreme Polymer. Chemical Reviews, v. 119, n. 3, p. 1763–1805, 2019.

SOUZA, Stefania Márcia de Oliveira. Gestão da qualidade e produtividade [recurso eletrônico]. Porto Alegre: SAGAH, 2018.