

Guia Prático de Tomografia Computadorizada Industrial para a Cadeia Automotiva - IQA



Índice

1.1. O que são Ensaios Não Destrutivos (END)	3
1.2. A importância estratégica do CT na cadeia automotiva	3
1.3. Benefícios da tomografia industrial frente a outros métodos.....	4
1.4. Objetivo do guia: quando e por que considerar esse ensaio	4
2. Fundamentos Técnicos do Ensaio	5
2.1. Princípios de funcionamento da Tomografia Computadorizada.....	5
2.2. Tipos de tubos (microfoco, minifoco) e suas aplicações.....	5
2.3. Visão geral dos sistemas (2D vs 3D)	5
3. Aplicações Práticas na Cadeia Automotiva	6
3.1. Detecção de falhas internas	6
3.2. Avaliação de processos de fundição, injeção e soldagem	6
3.3. Controle de montagem e junções	7
3.4. Inspeção de componentes eletrônicos e baterias.....	7
3.5. Engenharia reversa e desenvolvimento de produto	8
3.6. Medições internas e espessura de parede.....	8
3.7. Estudos de rugosidade, granulação, fibras e compósitos	8
4. O Que Pode Ser Analisado.....	9
4.1. Materiais compatíveis	9
4.2. Tipos de peças mais comuns na cadeia automotiva	9
4.3. Limitações e restrições técnicas	9
4.4. Requisitos técnicos do ensaio	10
5. Como Avaliar a Viabilidade do Ensaio	11
5.1. Checklist prático: minha peça é adequada para CT?.....	11
5.2. Parâmetros técnicos (mínimos e máximos)	11
5.3. Restrições típicas	11
Referências Bibliográficas	12
Institucional IQA (inclusive contatos)	12

O presente guia nasceu a partir de uma necessidade identificada pela indústria automotiva em contar com testes e métodos de ensaio mais adequados às novas exigências do setor, especialmente diante da introdução de tecnologias e componentes cada vez mais complexos, como baterias automotivas e peças com geometrias internas de difícil inspeção.

Um dos principais desafios enfrentados pelas empresas da cadeia automotiva é encontrar ensaios que atendam, com precisão e eficiência, às características específicas de determinados itens, considerando fatores como material, densidade, espessura e integração de diferentes componentes. Essa carência de informações aplicadas gera dúvidas e, muitas vezes, decisões técnicas que não exploram todo o potencial dos recursos disponíveis no mercado.

Com o objetivo de discutir soluções e alinhar expectativas, o IQA promoveu a formação de um grupo de trabalho, reunindo representantes de empresas da cadeia automotiva, especialistas técnicos e usuários de diferentes perfis. Ao longo dos encontros, foram trocadas experiências, analisados requisitos técnicos e avaliados casos práticos de aplicação.

Como encaminhamento dessas discussões, definiu-se a elaboração deste Guia Prático de Tomografia Computadorizada Industrial, que tem como propósito disseminar o conhecimento em toda a cadeia automotiva, proporcionando aos profissionais subsídios para compreender o potencial do método, avaliar sua viabilidade técnica e identificar, situações em que a aplicação do ensaio pode gerar benefícios em qualidade e desempenho.

1.1. O que são Ensaios Não Destrutivos (END)

Os Ensaios Não Destrutivos (END) constituem um conjunto de técnicas aplicadas para inspecionar, examinar e avaliar materiais, componentes ou estruturas sem causar danos permanentes às peças analisadas. Na cadeia automotiva, os ENDs são amplamente utilizados em processos de controle de qualidade, validação de projeto e diagnóstico de falhas, permitindo identificar defeitos ocultos e garantir a confiabilidade dos produtos ao longo do seu ciclo de vida.

1.2. A importância estratégica do CT na cadeia automotiva

A Tomografia Computadorizada Industrial (CT) é uma das técnicas mais avançadas dentro dos ENDs, pois possibilita a visualização tridimensional completa da estrutura interna e externa das peças, com alta precisão e riqueza de detalhes. Esse recurso é fundamental para identificar falhas que não seriam detectadas por métodos convencionais, como trincas internas, porosidades, inclusões, falta de fusão, entre outros.

Além da função de inspeção, a tomografia também é aplicada no desenvolvimento de produtos, engenharia reversa, validação de processos de fundição, injeção e montagem, bem como na metrologia de geometrias complexas. Com isso, seu uso tem se tornado cada vez mais estratégico em empresas que buscam elevar seus padrões de qualidade e competitividade.

1.3. Benefícios da tomografia industrial frente a outros métodos

Diferentemente de métodos de inspeção superficial ou bidimensional, a tomografia computacional industrial permite uma análise volumétrica sem necessidade de corte, destruição ou desmontagem da peça, gerando um modelo digital tridimensional (3D) completo do corpo de prova.

Entre os principais benefícios, destacam-se:

- Inspeção interna e externa em um único ensaio;
- Geração de imagens e dados com precisão micrométrica;
- Identificação automatizada de defeitos com auxílio de software e algoritmos;
- Redução de retrabalhos e falhas em campo;
- Otimização do tempo de desenvolvimento e de correção de ferramentas de produção.

1.4. Objetivo do guia: quando e por que considerar esse ensaio

Este guia prático tem por objetivo orientar profissionais da cadeia automotiva na compreensão e uso da Tomografia Computadorizada Industrial, apresentando de forma didática e direta:

- O que é o ensaio;
- Quais tipos de peças podem ser analisadas;
- Quais aplicações práticas justificam seu uso;
- Quais parâmetros técnicos devem ser observados;
- Como avaliar se o CT é adequado para sua realidade.

Ao final da leitura, o leitor estará capacitado a tomar decisões objetivas sobre a aplicabilidade da tomografia em seu contexto, seja para fins de inspeção de qualidade, desenvolvimento de produto, diagnóstico de falhas ou validação de processo.

2.1. Princípios de funcionamento da Tomografia Computadorizada

A Tomografia Computadorizada Industrial (CT) é um método de inspeção baseado na emissão de raios X e na reconstrução digital de imagens, permitindo visualizar o interior de uma peça em três dimensões, com alta resolução e sem a necessidade de cortá-la ou danificá-la.

O processo inicia-se com a emissão de raios X por um tubo de alta voltagem, que atravessam a peça e são atenuados de forma diferente conforme a densidade e espessura dos materiais. Os feixes emergentes são captados por um detector digital, gerando centenas ou milhares de imagens 2D (radiografias) em diferentes ângulos.

Essas imagens são então processadas por algoritmos computacionais, que realizam a reconstrução volumétrica da peça com base em técnicas matemáticas, como a transformada de Radon e a retroprojeção filtrada. O resultado final é um modelo tridimensional digital altamente detalhado, que pode ser manipulado, fatiado em qualquer plano (X, Y ou Z), medido ou analisado com ferramentas específicas.

2.2. Tipos de tubos (microfoco, minifoco) e suas aplicações

A fonte de raios X é um dos elementos mais importantes do sistema de tomografia, e sua escolha depende diretamente do tipo de peça a ser analisada.

- **Tubo microfoco:**

Possui ponto focal reduzido (em micrômetros), oferecendo alta resolução e definição de imagem. É ideal para peças pequenas, com detalhes finos, baixa espessura ou defeitos muito pequenos – como eletrônicos, conectores, peças plásticas, soldas finas ou microfundidos.

- **Tubo minifoco:**

Tem ponto focal maior, o que permite maior penetração em materiais densos ou espessos, embora com menor definição de bordas. É indicado para análise de peças metálicas robustas, componentes estruturais, blocos fundidos e peças com grande volume ou densidade.

A seleção entre microfoco e minifoco deve considerar o compromisso entre resolução e penetração, além das características físicas da amostra.

2.3. Visão geral dos sistemas (2D vs 3D)

Os sistemas de inspeção por raio-X podem ser classificados em dois grandes grupos:

Sistemas 2D (Radioscopia):

Producem imagens planas em tempo real, semelhantes a radiografias convencionais. Embora mais rápidos e simples, oferecem uma visualização limitada, sem profundidade e com possível sobreposição de estruturas internas. São úteis para inspeções visuais rápidas, detecção de falhas superficiais ou acompanhamento de processos produtivos.



Imagen cedida por TDSA

Sistemas 3D (Tomografia Computadorizada):

Producem modelos tridimensionais completos da peça, por meio da reconstrução das radiografias em múltiplos ângulos. Permitem a análise interna em qualquer plano, com medições precisas, mapeamento de defeitos e exportação de modelos digitais. São a escolha ideal para análises técnicas, metroológicas e críticas.



Imagen cedida por TDSA

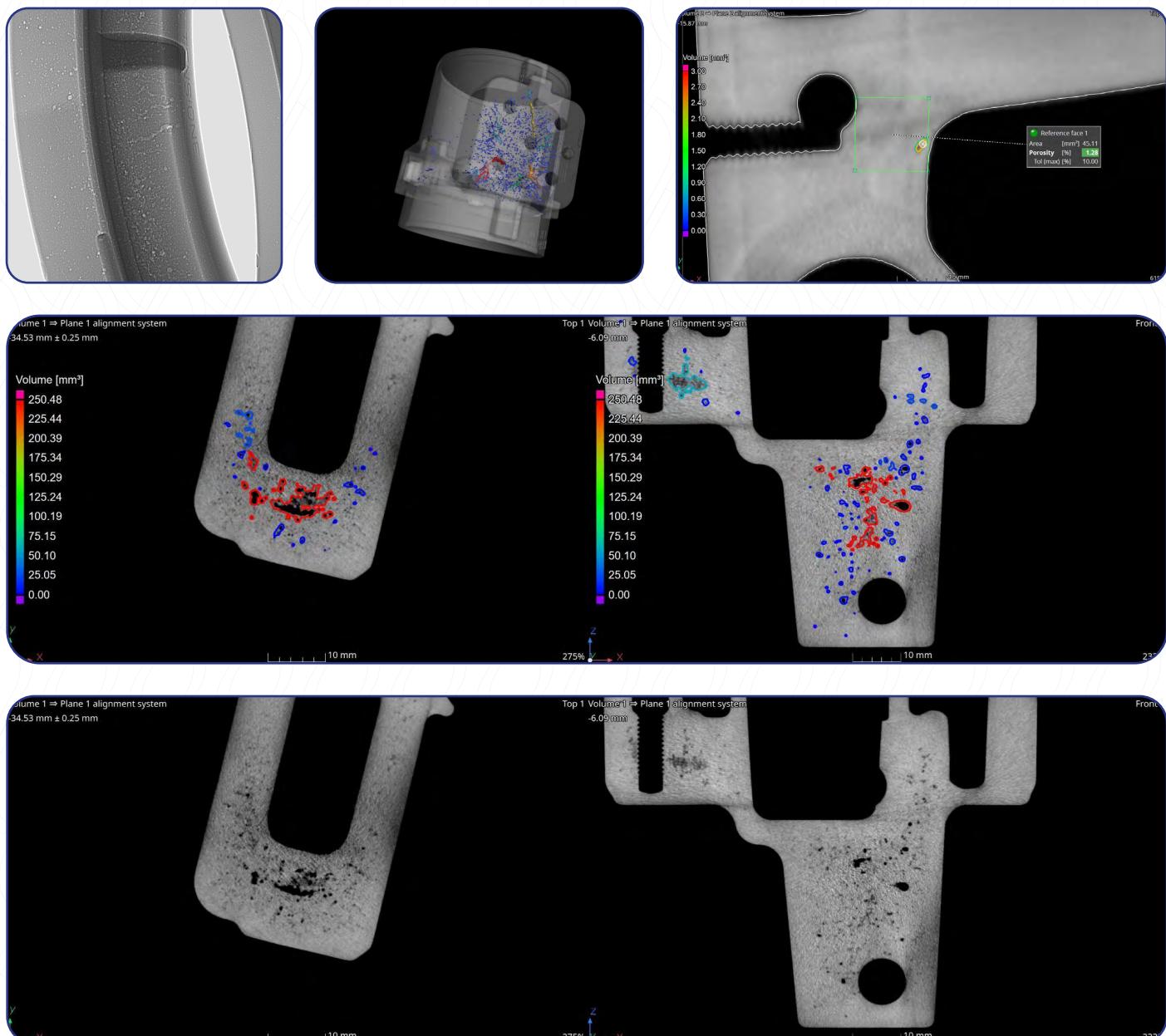
A Tomografia Computadorizada Industrial tem se consolidado como uma ferramenta poderosa e versátil no setor automotivo, proporcionando ganhos significativos em qualidade, segurança, confiabilidade e inovação. Abaixo estão reunidas as principais aplicações práticas do ensaio na cadeia de fornecimento, desde sistemistas até montadoras.

3.1. Detecção de falhas internas: porosidades, inclusões, trincas e cavidades

Uma das aplicações mais recorrentes do CT é a identificação de falhas internas invisíveis a olho nu ou por inspeção superficial. A tecnologia permite detectar:

- Porosidades decorrentes de fundição ou injeção;
- Inclusões de materiais indesejados (escória, areia, resíduos);
- Trincas internas por tensões térmicas ou mecânicas;
- Cavidades formadas por bolhas de ar ou retração.

Esse tipo de análise é fundamental para evitar falhas em campo, rupturas sob carga ou rejeição em auditorias de cliente.



Imagens cedidas por TDSA

3. Aplicações Práticas na Cadeia Automotiva

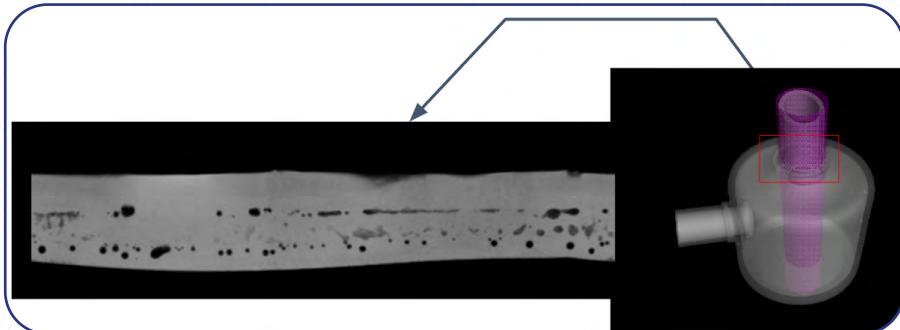
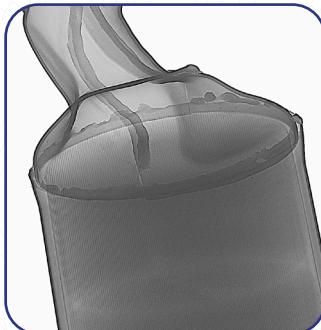
7

3.2. Avaliação de processos de fundição, injeção e soldagem

A tomografia permite validar e aprimorar os processos produtivos, identificando desvios na conformidade de peças metálicas ou plásticas, como:

- Falta de preenchimento no molde;
- Falhas de fusão ou adesão entre camadas;
- Deformações internas;
- Resíduos remanescentes do processo de fabricação.

É particularmente útil em fases de desenvolvimento e ajustes de ferramentas.



Imagens cedidas por TDSA

3.3. Controle de montagem e junções (solda, colagem, rebitagem)

Componentes montados podem ser avaliados quanto à qualidade da união entre as partes, incluindo:

- Soldas por resistência, laser ou por pontos;
- Aplicação de adesivos e colagens;
- Cravações e rebitagens;
- Inserções metálicas em peças plásticas.

A tomografia permite verificar se houve penetração adequada, falhas de cobertura ou bolhas entre superfícies.



Imagens cedidas por TDSA

3.4. Inspeção de componentes eletrônicos e baterias

A crescente presença de sistemas eletrônicos e de propulsão elétrica nos veículos requer ensaios não destrutivos compatíveis com conjuntos sensíveis e complexos. O CT permite:

- Análise de placas de circuito (PCBs);
- Verificação de conectores e soldas;
- Avaliação de células e módulos de baterias (físico e estrutural);
- Identificação de curto-circuitos internos ou falhas de empacotamento.

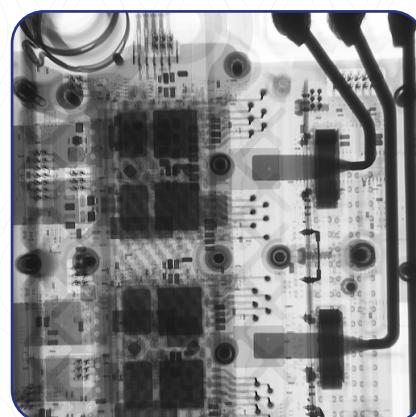


Imagen cedida por TDSA

3. Aplicações Práticas na Cadeia Automotiva

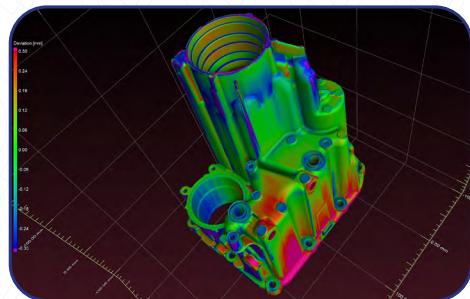
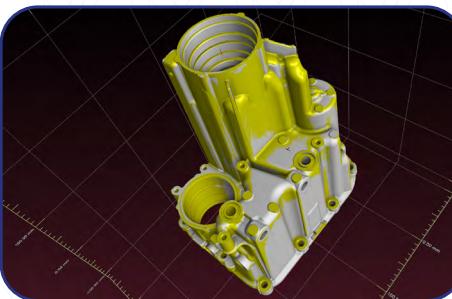
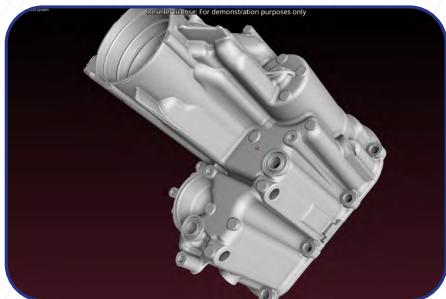
8

3.5. Engenharia reversa e desenvolvimento de produto

A partir do modelo 3D gerado na tomografia, é possível realizar engenharia reversa, reproduzindo digitalmente peças para:

- Criação ou atualização de modelos CAD;
- Comparação com protótipos físicos;
- Otimização de design;
- Simulações estruturais com base em geometrias reais.

Essa aplicação acelera o ciclo de desenvolvimento e facilita a digitalização de peças complexas.



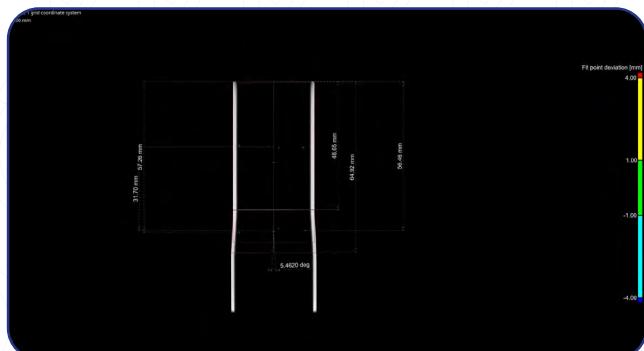
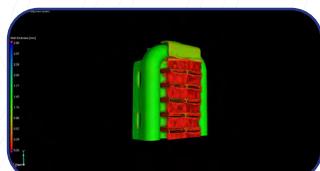
Imagens cedidas por TDSA

3.6. Medição internas, comparação CAD x peça real e espessura de parede

A tomografia viabiliza análises metrológicas detalhadas, mesmo em geometrias de difícil acesso, como:

- Medidas internas e entre cavidades;
- Comparação entre o modelo real e o CAD (nominal x real);
- Análise de espessura de parede, com representação por mapas de cores;
- Identificação de conicidade, ovalização e variações dimensionais.

Tais recursos são úteis tanto para controle de qualidade quanto para validação de fornecedores.



Imagens cedidas por TDSA

3.7. Estudos de rugosidade, granulação, fibras e compósitos

Além da inspeção estrutural, o CT também permite análises avançadas de materiais, como:

- Distribuição e orientação de fibras em compósitos;
- Granulometria e estrutura interna de materiais fundidos ou sinterizados;
- Avaliação de rugosidade em superfícies internas inacessíveis por contato.

Essas análises contribuem para o controle de desempenho mecânico e térmico dos materiais aplicados.

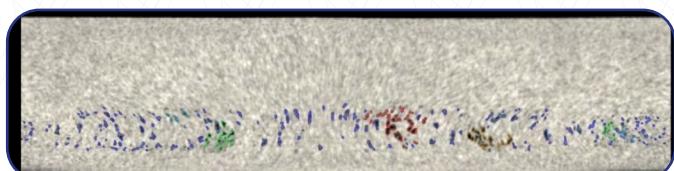


Imagen cedida por TDSA

A escolha do ensaio por tomografia depende diretamente das características da peça a ser analisada. Este capítulo apresenta os critérios técnicos que devem ser considerados para verificar a viabilidade do CT, abordando materiais, formatos, limitações físicas e requisitos do equipamento.

4.1. Materiais compatíveis:

Atomografia industrial é capaz de inspecionar uma ampla gama de materiais utilizados na cadeia automotiva. A seguir, os principais grupos e suas características quanto à penetração de raios X:

- Materiais metálicos

Como alumínio, aço e ligas especiais. O alumínio apresenta boa transparência à radiação X, o que facilita a inspeção. Já materiais mais densos, como aço e ligas com tungstênio ou cobre, exigem maior energia do tubo emissor e, em alguns casos, podem limitar a resolução da imagem.

- Polímeros, compósitos e borrachas

São materiais ideais para tomografia, devido à sua baixa densidade e alta transparência ao raio X. Permitem análises com excelente definição, mesmo em geometrias complexas ou em peças sobrepostas.

4.2. Tipos de peças mais comuns na cadeia automotiva

Diversos componentes típicos do setor automotivo são compatíveis com a tomografia industrial, incluindo:

- Peças fundidas de alumínio (blocos, cabeçotes, suportes);
- Componentes plásticos injetados (conectores, carcaças, dutos);
- Elementos estruturais metálicos de menor espessura;
- Conjuntos eletrônicos ou sensores encapsulados;
- Válvulas, engrenagens, mancais, pistões e bielas;
- Prototipagem em manufatura aditiva.

O importante é verificar se o tamanho, a densidade e o grau de detalhamento da peça são compatíveis com os parâmetros técnicos do equipamento utilizado.

4.3. Limitações e restrições técnicas:

Embora bastante versátil, a tomografia apresenta algumas limitações operacionais que devem ser observadas antes da solicitação do ensaio:

- Montagens com múltiplos materiais

Peças compostas por materiais com diferentes densidades (como plástico e metal) podem gerar artefatos na imagem, dificultando a reconstrução e interpretação. Equipamentos com software de correção por materiais mistos ajudam a mitigar esse efeito.

- Limitações quanto à densidade e absorção de raio-X

Materiais muito densos (aço carbono espesso, ligas com elementos pesados) exigem tubos de maior energia e podem apresentar sombra ou perda de definição. O sucesso da inspeção dependerá da espessura total da peça e da capacidade do equipamento em uso.

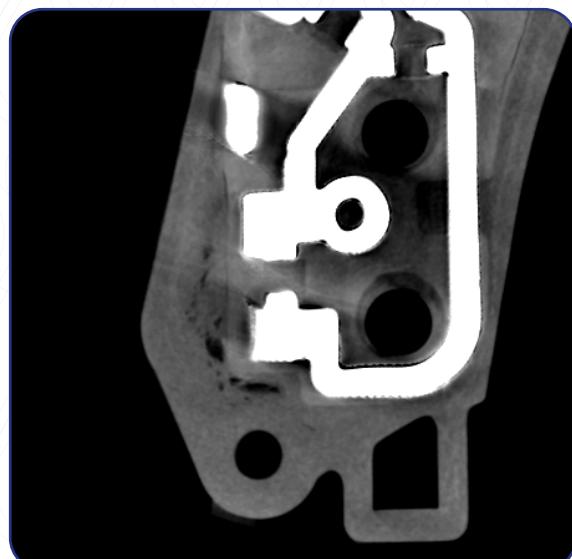


Imagen cedida por TDSA

4.4. Requisitos técnicos do ensaio:

Para verificar a compatibilidade da peça com o ensaio tomográfico, é importante considerar os seguintes parâmetros técnicos, observados nos equipamentos mais comumente utilizados na indústria:

- **Dimensões da peça**

A maioria dos sistemas de tomografia atende peças com diâmetro entre 100 mm e 500 mm. No entanto, há equipamentos de grande porte capazes de inspecionar peças com até 750 mm de diâmetro e comprimento similar, embora geralmente com menor resolução.

- **Peso da amostra**

Os sistemas convencionais suportam peças de até 20 a 25 kg. Equipamentos industriais robustos podem operar com cargas de até 500 kg, desde que compatíveis com o volume da câmara e a capacidade da plataforma de giro.

- **Resolução e precisão**

A resolução da imagem varia conforme a configuração do equipamento e é diretamente influenciada pela potência do tubo de raio-X (kV/mA) e pelo tamanho do ponto focal.

oEquipamentos de microfoco (geralmente entre 90 kV e 160 kV) alcançam resolução de 1 µm a 10 µm, indicados para peças pequenas e materiais de baixa densidade.

oSistemas com potência entre 200 kV e 450 kV são utilizados para peças maiores e mais densas, com resolução de 50 µm a 150 µm, dependendo do material e espessura.

A escolha do equipamento deve sempre equilibrar a resolução desejada com a capacidade de penetração necessária, conforme o tipo de material e o volume da peça.

Antes de solicitar um ensaio por Tomografia Computadorizada Industrial (CT), é fundamental realizar uma avaliação preliminar sobre a adequação da peça ao método. Essa etapa reduz desperdícios, agiliza o processo de contratação e evita frustrações com ensaios mal dimensionados.

5.1. Checklist prático: minha peça é adequada para CT?

- A peça possui geometrias internas de difícil acesso por outros métodos?
- É necessário avaliar defeitos internos como porosidade, trinca ou inclusão?
- O material da peça é compatível com raio-X (ex: polímero, alumínio, aço)?
- O diâmetro da peça está entre 100 mm e 750 mm?
- O peso da peça está abaixo de 25 kg (ou até 500 kg em equipamentos específicos)?
- A espessura da peça permite penetração do raio-X, considerando sua densidade?
- A análise exigida requer alta resolução (ex: inferior a 25 µm)?
- Há necessidade de gerar um modelo 3D da peça para medição ou comparação?

Se a maioria das respostas for sim, o CT é um candidato viável e vantajoso.

5.2. Parâmetros técnicos (mínimos e máximos):

Para simplificar, seguem os limites usuais adotados por laboratórios com equipamentos de portes diferentes:

- Diâmetro: 100 a 500 mm ou até 750 mm
- Altura/comprimento: Até 500 mm ou até 960 mm
- Peso: até 25 kg ou até 500 kg
- Resolução: 1 µm a 150 µm
- Potência: 60 a 450 kV

5.3. Restrições típicas:

Mesmo peças que atendam aos critérios acima podem apresentar restrições operacionais:

- Peças muito densas: aço espesso ou ligas pesadas exigem tubos de alta voltagem e podem reduzir a nitidez da imagem.
- Materiais com diferentes densidades (múltiplos materiais): podem gerar artefatos visuais, exigindo calibração e correção por software.
- Geometria com superfícies paralelas próximas: podem provocar interferência (efeito de anel) na reconstrução.
- Necessidade de fixação estável durante o giro: a amostra deve estar bem posicionada para garantir precisão no volume reconstruído.
- Contaminações superficiais ou resíduos: devem ser evitados para não gerar ruído na imagem.

É recomendável consultar o laboratório com imagens da peça, peso e dimensões reais, para confirmação da viabilidade antes da execução do ensaio. Também é importante indicar, quando aplicável, a região da peça que se espera maiores detalhes.

Para informações adicionais sobre o ensaio e como o IQA pode apoiar a sua empresa na avaliação por tomografia industrial, entre em contato conosco.

ASTM E1441-22 - Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging

ASTM E1695-20 - Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance. ASTM International, 2020.

ISO 15708-4:2017 - Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography – Part 4: Use in industrial applications. ISO, 2017.

Institucional IQA

Quem somos

O IQA - Instituto da Qualidade Automotiva é um organismo de certificação sem fins lucrativos especializado no setor automotivo, criado e dirigido por Anfavea, Sindipeças e outras entidades.

Representante de organismos internacionais e acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO, atuando em Certificação de Produtos, de Serviços Automotivos, de Sistemas de Gestão, Publicações e Treinamentos.

Histórico

A formação do IQA foi consequência do desenvolvimento natural de várias ações com o intuito de aprimorar a qualidade e produtividade da cadeia automotiva nacional.

Atuando desde 1995, a estruturação do IQA é resultado de um trabalho conjunto de uma parceria envolvendo a indústria, o governo e os trabalhadores, dentro de uma visão estratégica necessária para o progresso social e econômico, em uma economia global cada vez mais competitiva.

Política da Qualidade

Realizar as atividades de avaliação e certificação de acordo com os requisitos do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade e conforme padrões internacionais, assegurando sua imparcialidade, objetividade e gestão de conflitos de interesse.

Aperfeiçoar continuamente o padrão dos serviços prestados e as competências do pessoal envolvido, atendendo as necessidades dos clientes e da Cadeia Automotiva.

A satisfação do cliente é o objetivo a ser perseguido, suportado pelo comprometimento de todos os colaboradores com a eficácia e eficiência das operações e princípios do IQA.

Diferencial

O Instituto da Qualidade Automotiva é o único organismo dirigido pelo setor automotivo, importante diferencial reconhecido pelos principais representantes das categorias envolvidas.

Contato:

 Email: falecom@iqa.org.br

 Telefone 11 3181-9181

Aviso de Responsabilidade

Este Guia de Tomografia Industrial foi elaborado pelo IQA (Instituto da Qualidade Automotiva) com o objetivo de fornecer informações gerais e de referência sobre o tema. Os dados, conceitos, ilustrações e exemplos aqui apresentados são baseados em conteúdo cedidos e fornecidos por terceiros.

O IQA atuou como curador e editor deste material, buscando a precisão e a qualidade das informações. No entanto, o Instituto não assume responsabilidade pela exatidão, integridade ou adequação do conteúdo para fins específicos. As informações contidas neste guia não devem ser interpretadas como uma recomendação técnica oficial do IQA ou como garantia de desempenho.

Recomendamos que os leitores consultem as fontes originais ou especialistas para aplicações específicas e tomadas de decisão. O uso deste material é de inteira responsabilidade do leitor.

Direitos Autorais

A reprodução total ou parcial deste guia, por qualquer meio, sem a autorização prévia por escrito do IQA, é estritamente proibida. Conforme a Lei nº 9.610 de 19 de fevereiro de 1998 (Lei de Direitos Autorais).

Ano de Publicação: 2025



