

ORIENTAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA TRANSFERIBILIDADE DA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO DO TIPO CORIOLIS PARA LÍQUIDOS

Documento de caráter orientativo

DOQ-DIMCI-015

Revisão 00 - DEZEMBRO/2024

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 2/21
---	---------------	------------	----------------

SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Campo de aplicação
- 3 Responsabilidade
- 4 Documentos de referência
- 5 Documentos complementares
- 6 Siglas
- 7 Termos e definições
- 8 Princípio de funcionamento de medidores de vazão do tipo Coriolis
- 9 Metodologia para análise da transferibilidade da calibração
- 10 Avaliação da incerteza de medição e critérios de aceitação da transferibilidade
- 11 Histórico de revisão e quadro de aprovação
- ANEXO A – Exemplos de aplicação da metodologia

1 OBJETIVO

1.1 O presente documento orientativo fornece um guia técnico com conceitos, considerações e metodologia para a aplicação da transferibilidade na calibração de medidores de vazão do tipo Coriolis operando nas funções de totalização de massa ou de medição de vazão mássica de líquidos. O objetivo é habilitar a calibração desses medidores em condições de escoamento diferentes daquelas em que estão sendo utilizados, assegurando a confiabilidade dos resultados para a condição operacional desejada.

1.2 A abordagem aqui utilizada baseia-se na análise do desempenho de medidores de vazão do tipo Coriolis em diferentes condições de operação, quando comparados em suas mesmas vazões mássicas de operação. Ressalta-se que a metodologia apresentada neste documento não representa a única estratégia possível para a aplicação da transferibilidade em medidores de vazão do tipo Coriolis.

1.3 Este documento foi elaborado com base em estudos teóricos e experimentais produzidos pela Inmetro/Dimci/Dinam, assim como a partir da experiência do setor industrial, laboratórios, institutos de pesquisas, especialistas e fabricantes, e está consoante com a literatura, bem como com as boas práticas de calibração. As orientações aqui apresentadas não têm o propósito de servir como comprovação metrológica e não substituem requisitos determinados em regulamentos específicos, tampouco estabelecem requisitos regulamentares ou obrigações a serem observadas em mercados regulados. Recomenda-se que seu possível uso seja debatido previamente entre todas as partes envolvidas no processo de medição.

2 CAMPO DE APLICAÇÃO

2.1 Este documento aplica-se a usuários finais, laboratórios de calibração e ensaio, fabricantes, entidades reguladoras, proprietários, avaliadores, auditores, institutos de metrologia e especialistas da área de vazão de fluidos que desejam ou necessitam aplicar conceitos de transferibilidade na calibração de medidores de vazão do tipo Coriolis operando na função de medição de vazão mássica de líquidos.

2.2 As orientações aqui apresentadas são aplicáveis em cenários onde não é viável reproduzir em laboratório as mesmas condições de operação do medidor de vazão do tipo Coriolis em campo, quando há uma oferta

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 3/21
---	---------------	------------	----------------

limitada de laboratórios capazes de atender às condições operacionais específicas ou, ainda, quando se deseja aumentar a confiabilidade das medições, por meio de um maior conhecimento do comportamento do medidor, quando submetido à variação de parâmetros de processo.

2.3 Não fazem parte do campo de aplicação deste DOQ medidores de vazão do tipo Coriolis construídos com tubos retos ou de tubo único. Também não se aplica a instrumentos utilizados para a medição de vazão de fluidos criogênicos, não newtonianos ou não monofásicos.

Nota - Compete ao usuário avaliar criticamente a aplicabilidade do modelo de fluido Newtoniano.

3 RESPONSABILIDADE

A responsabilidade pela elaboração e revisão deste documento é da Dimci/Dinam. A responsabilidade pela aprovação, publicação ou cancelamento deste documento é da Dimci.

4 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

OIML R 117:2019	<i>Dynamic measuring systems for liquids other than water</i>
OIML R 137:2012	<i>Gas meters</i>
ISO 10790:2015	<i>Measurement of fluid flow in closed conduits - Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements)</i>
AGA REPORT 11:2013	<i>Measurement of natural gas by Coriolis meter</i>
API MPMS Chapter 5.6:2021	<i>Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters</i>
GUM:2008	<i>Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão da incerteza de medição, emitido em 2012 pelo Inmetro.</i>
GUM JCGM 106:2012	<i>Avaliação de dados de medição — O papel da incerteza de medição na avaliação da conformidade, emitido em 2022 pelo Inmetro.</i>
ABNT NBR 16084:2012	<i>Medição de vazão de fluidos em condutos fechados — Orientação para a seleção, instalação e uso de medidores Coriolis (medições de vazão mássica, massa específica e vazão volumétrica)</i>
ASME B31.1 - 2022	<i>Power Piping</i>
Costa, F. et al, 2023, presented at 41st Global Flow Measurement Workshop	<i>Optimizing Coriolis Flowmeter Performance for the Brazilian O&G Industry: Influence Factors and Calibration Strategies</i>

(continua)

VIM:2012	<i>Vocabulário Internacional de Metrologia</i>
VIML:2016	<i>Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal</i>

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 4/21
---	---------------	------------	----------------

SI:2021	<i>Sistema Internacional de Unidades</i>
ABNT NBR ISO 4185:2009	<i>Medição de vazão de líquidos em dutos fechados - Método gravimétrico</i>

5 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Não aplicável.

6 SIGLAS

As siglas das UP/UO do Inmetro podem ser acessadas em:
<http://www.inmetro.gov.br/inmetro/pdf/regimento-interno.pdf>.

ISO	<i>International Standardization Organization (Organização Internacional de Normalização)</i>
AGA	<i>American Gas Association (Associação Americana de Gás)</i>
API	<i>American Petroleum Institute (Instituto Americano de Petróleo)</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement (Guia para a expressão da incerteza de medição)</i>

7 TERMOS E DEFINIÇÕES

A este documento são aplicáveis os termos e definições do SI, VIM, VIML e as seguintes definições:

7.1 Transferibilidade

Transferibilidade é a capacidade de aplicar os resultados de calibração de um medidor, inicialmente calibrado em uma condição de referência, a condições de operação diversas.

7.2 Calibração transferível

Calibração cujos resultados são válidos em condições de escoamento distintas daquelas em que foram obtidos.

7.3 Compensação automática

Capacidade de um medidor de vazão realizar automaticamente correções para compensar efeitos indesejados ou erros sistemáticos conhecidos, sem a necessidade de correção em pós-processamento.

7.4 Compensação nula

Condição em que um instrumento é considerado insensível à influência de algum parâmetro de processo.

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 5/21
---	---------------	------------	----------------

7.5 Condições de referência

Condições de calibração utilizadas como base para se determinar a sensibilidade do medidor aos fatores de processo que influenciam seu desempenho.

7.6 Calibração de referência

Calibração realizada em condições de referência, tipicamente água em temperatura próxima à ambiente e baixa pressão, que será utilizada na avaliação da transferibilidade de um medidor. Estas condições também poderão ser utilizadas para calibrações subsequentes.

7.7 Fluido criogênico

Fluido líquido com ponto de ebulição normal abaixo de -150 °C (123 K).

7.8 Número de Reynolds

Adimensional utilizado em mecânica dos fluidos que estabelece o regime de escoamento de um fluido por meio da relação entre as suas forças de inércia e viscosas. O número de Reynolds permite a comparação de regimes de escoamento em condições distintas, a partir da similaridade dinâmica do escoamento.

8 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE MEDIDORES DE VAZÃO DO TIPO CORIOLIS

8.1 O princípio de funcionamento dos medidores de vazão de fluidos do tipo Coriolis baseia-se na medição do intervalo de tempo detectado em um par de tubos sensores curvos que oscilam fora do plano e ao redor do eixo de vibração, sendo excitados a vibrar próximos à sua frequência natural por meio de bobinas elétricas. Na ausência de escoamento, os tubos sensores vibram em fase ao longo de toda sua extensão. Quando há vazão mássica, a força de Coriolis atua no fluido em escoamento, provocando um movimento de torção nos tubos sensores. Esse movimento de torção resulta em uma diferença de fase na frequência de vibração dos tubos, proporcional à vazão mássica do fluido e que é detectada por sensores posicionados em pontos específicos dos tubos sensores.

8.2 Devido à natureza complexa das interações fluido-estrutura que ocorrem neste tipo de medidor, fatores de processo podem influenciar a exatidão e a precisão das medidas. Desse modo, diversas correções podem ser aplicadas, e recursos de compensação e ajuste vêm sendo desenvolvidos por fabricantes ao longo dos anos. Com isso, é desejável a existência de critérios capazes de definir o nível de influência de fatores de processo no desempenho de medidores de vazão do tipo Coriolis, de forma a compreender em que condições os resultados de uma calibração são aplicáveis.

8.3 Nas subseções seguintes, são discutidos os principais fatores e condições de escoamento que impactam diretamente na capacidade de um medidor de vazão do tipo Coriolis manter seu desempenho em diferentes contextos de aplicação, abordando a questão central da transferibilidade da calibração.

Nota - Para os fins deste documento, é razoável assumir que todos os fatores de influência podem ser considerados independentes, e cuja correção de tais influências pode ser realizada aplicando-se um fator

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 6/21
---	---------------	------------	----------------

multiplicativo ao fator de calibração do medidor ou diretamente sobre a medição de vazão ou a totalização mássica.

8.4 Temperatura

8.4.1 A variação da temperatura do fluido e do ambiente exercem uma influência significativa no desempenho dos medidores de vazão do tipo Coriolis, principalmente sobre o módulo de elasticidade dos tubos sensores. Além disso, em menor escala, podem ocorrer mudanças geométricas, como variações no diâmetro e comprimento desses tubos, devido aos efeitos térmicos de dilatação ou contração. Essas alterações térmicas também podem impactar o ajuste de zero do medidor.

8.4.2 Geralmente, a influência da variação da temperatura segue um padrão linear. A maioria dos modelos comerciais disponíveis atualmente possui sensores de temperatura integrados aos tubos vibratórios para compensar automaticamente os efeitos térmicos, de forma imperceptível ao usuário final.

8.4.3 Os efeitos de temperatura para a maioria dos materiais empregados, na faixa de -50 °C a 150 °C, e em condições de temperatura homogênea e constante, já são bem conhecidos e, de modo geral, são satisfatoriamente compensados pela maior parte dos fabricantes. No entanto, o desempenho exato dessas compensações depende da eficácia dos algoritmos desenvolvidos por cada fabricante e da qualidade do processo de fabricação do medidor.

8.4.4 É importante destacar que a temperatura também afeta a viscosidade e a densidade do fluido, influenciando diretamente no número de Reynolds do escoamento. Recomenda-se que esse fenômeno seja tratado separadamente da variação da temperatura.

8.5 Pressão

8.5.1 Os efeitos de mudanças na pressão do fluido medido abrangem o enrijecimento e a deformação dos tubos vibratórios. Esses efeitos tendem a causar uma diminuição linear nos valores das leituras para medidores com tubos curvos à medida que a pressão aumenta. A magnitude desses efeitos depende do material do tubo e das características do projeto, como diâmetro, espessura de parede dos tubos vibratórios e geometria. Esses efeitos tendem a ser mais evidentes em tubos de maior diâmetro e paredes mais finas. Além disso, ressalta-se que a pressão do fluido também pode impactar a estabilidade do zero do medidor.

8.5.2 De modo geral, os fabricantes não implementam um sensor de pressão integrado, mas permitem a aplicação de uma correção constante, a partir da configuração pelo operador, ou, preferencialmente, automática, a partir da entrada de sinal de um sensor de pressão em linha. Normalmente, os manuais de operação dos medidores apresentam os coeficientes de correção para pressão do fluido, cuja aplicação é eficaz para corrigir satisfatoriamente os efeitos da pressão.

8.6 Número de Reynolds

8.6.1 A interação da força de cisalhamento no fluido, causada pelas paredes dos tubos vibratórios, e a força inercial de Coriolis produz um escoamento rotacional secundário dentro dos tubos, que consome parte da energia da força de Coriolis, podendo causar assim uma medição subestimada. Como esse fenômeno depende da espessura da camada de cisalhamento nos tubos vibratórios, que apresenta um aumento

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 7/21
---	---------------	------------	----------------

exponencial à medida que o número de Reynolds diminui, o erro de medição está associado ao número de Reynolds e, com isso, este parâmetro pode ser utilizado como base para a aplicação de correções.

8.6.2 Esses efeitos surgem, especialmente, quando um medidor de vazão do tipo Coriolis é operado com fluidos de viscosidade superior à da água, tendo um efeito importante para a medição de fluidos de alta viscosidade. Medidores de maior diâmetro são tipicamente mais afetados por este parâmetro.

9 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA TRANSFERIBILIDADE DA CALIBRAÇÃO

9.1 Para analisar a viabilidade de utilização dos medidores de vazão do tipo Coriolis calibrados sob condições diferentes do ambiente operacional, é essencial avaliar a sua sensibilidade aos parâmetros de processo que influenciam seu desempenho e a capacidade de corrigir os resultados adequadamente, determinando os limites operacionais nos quais as incertezas dos resultados de medição sejam adequadas para o propósito pretendido.

9.2 São sugeridas as seguintes etapas para a análise da transferibilidade em medidores de vazão do tipo Coriolis:

- a) definir as condições de aplicação da transferibilidade:
 - a.1) identificar os parâmetros de influência relevantes, como temperatura, pressão, viscosidade e número de Reynolds, aos quais o medidor estará submetido; e
 - a.2) definir os limites de operação para cada um dos parâmetros listados.
- b) estabelecer as condições para as calibrações de referência:
 - b.1) as condições de referência recomendadas são: utilização de fluido água, temperatura ambiente e baixa pressão;
 - b.2) as condições de referência podem ser separadas por parâmetro em análise; e
 - b.3) essas calibrações serão utilizadas para estimar a incerteza adicional de transferibilidade e as condições escolhidas servirão como base para calibrações posteriores.
- c) selecionar os parâmetros de influência a serem analisados:
 - c.1) identificar os parâmetros de influência a serem ensaiados; e
 - c.2) estabelecer um limite mínimo de diferença entre a condição de referência e a condição de operação que justifique a necessidade de avaliação de um parâmetro.
- d) listar as correções e as incertezas:
 - d.1) para cada parâmetro de influência, determinar as correções necessárias (para os casos de correção em pós processamento), suas incertezas, fatores de abrangência e graus de liberdade; e
 - d.2) para medidores considerados insensíveis a variações de um determinado parâmetro, ou com recursos de correção automática, determinar apenas as incertezas, fatores de abrangência e graus de liberdade.
- e) realizar os ensaios em bancada laboratorial:
 - e.1) escolher padrões de calibração adequados e capazes de proporcionar a confiabilidade metrológica necessária à detecção das variações no desempenho do medidor ensaiado. Recomenda-se, quando possível, que os padrões utilizados para calibração de referência sejam os mesmos utilizados para os demais ensaios, de modo a garantir boa correlação entre os resultados; e
 - e.2) avaliar a sensibilidade do medidor a cada parâmetro de influência considerado.
- f) analisar os resultados obtidos:
 - f.1) comparar os resultados com as condições de referência e identificar as tendências; e

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 8/21
---	---------------	------------	----------------

- f.2) calcular as incertezas adicionais decorrentes da transferibilidade.
- g) monitorar o desempenho do medidor ao longo do tempo de acordo com os requisitos do sistema de gestão da qualidade ao qual o medidor está submetido.

Nota 1 - Para as aplicações deste documento, podem ser consideradas pressão da condição de referência não superior a 10 bar e temperatura entre 15 °C e 30 °C.

Nota 2 - O escopo dos ensaios realizados é determinado de acordo com o uso pretendido e as necessidades específicas do usuário. Cabe ao usuário decidir se os resultados dos ensaios serão aplicáveis apenas à amostra ensaiada, a outros medidores idênticos (mesmo modelo e diâmetro) ou uma família de medidores. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros de projeto que influenciam na sensibilidade do medidor a determinados parâmetros.

Nota 3 - As condições de referência podem ser variadas. Entretanto, é fundamental garantir que não haja a ocorrência simultânea de diferentes efeitos ou, se existirem, que sejam corretamente considerados nos cálculos. Recomenda-se considerar o aumento de complexidade na elaboração da matriz de testes quando efeitos simultâneos forem observados.

Nota 4 - As correções para os parâmetros de influência podem ter valor esperado nulo, mas é recomendável que sempre haja uma incerteza associada.

Nota 5 - É recomendado que nenhuma alteração de configuração no medidor seja realizada após a calibração de referência. Caso isso seja necessário, é importante verificar se essa alteração não invalida a calibração de referência.

Nota 6 – Considerar a necessidade de avaliar um parâmetro de influência específico com base nas contribuições associadas a esse parâmetro, no nível de confiança do usuário e na capacidade do medidor de compensar compensá-lo.

Tabela 1 - Influência de parâmetros de projeto

Efeito	Parâmetros de projeto	Observação
Pressão	Geometria	---
	Espessura da parede dos tubos vibratórios	Maior influência com menor espessura
	Diâmetro	Maior influência em maiores diâmetros (recomendado correções para medidores acima de 1")
	Material	Maior influência com menor módulo de elasticidade
Temperatura	Geometria	---
	Material	Maior influência com maior sensibilidade do módulo de elasticidade à temperatura
Número de Reynolds	Geometria	---
	Diâmetro	Maior influência em maiores diâmetros

(continua)

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

9.3 Caracterização do medidor quanto aos parâmetros de influência

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 9/21
---	---------------	------------	----------------

Para caracterizar o comportamento do medidor com relação a cada parâmetro de influência de interesse, o seguinte procedimento laboratorial é sugerido:

- a) realizar o ajuste ou verificação do zero do medidor segundo recomendações do fabricante;
- b) efetuar a calibração do medidor nas condições de referência, abrangendo toda a faixa de vazão mássica de interesse. Recomenda-se que o número de pontos seja igual ou superior ao usualmente utilizado em uma calibração, com um mínimo de cinco pontos igualmente espaçados;
- c) definir e documentar os limites de variação do parâmetro de influência em avaliação, estabelecendo as condições dos ensaios. As condições exatas dependerão do parâmetro avaliado e da faixa de operação desejada. A Tabela 2 fornece orientações para determinação das condições exatas;
- d) determinar e registrar as correções aplicáveis para ajuste do parâmetro de influência de interesse, caso o medidor não tenha recurso de correção automática; e
 - d.1) registrar o valor da correção, o(s) parâmetro(s) medidos(s) para realização da correção e o procedimento necessário para aplicação da correção.
- e) realizar medições nos mesmos pontos de vazão mássica testados durante a calibração de referência, variando o parâmetro de influência de interesse, de acordo com valores definidos em c).
 - e.1) para cada alteração no parâmetro em análise, pode ser necessário realizar um novo ajuste ou verificação de zero;
 - e.2) caso o medidor tenha recurso de correção automática para o parâmetro de interesse, garantir que o recurso esteja ativado;
 - e.3) registrar os valores medidos; e
 - e.4) aplicar correção em pós-processamento, caso necessário.

Nota - Nem sempre é possível ou viável realizar correções em pós-processamento. Nesse caso, a transferibilidade só é aplicável aos parâmetros que possuem compensação nula ou automática.

Tabela 2 – Sugestões para determinação das condições de ensaio

Efeito	Faixa	Condições de ensaio	Medições auxiliares
Pressão	Dentro dos limites de variação elástica do material dos tubos sensores.	Mínimo de três pressões distribuídas uniformemente, entre as pressões máxima e a pressão de referência.	Pressão do fluido (medidor de pressão em linha)
Temperatura	Dentro dos limites de linearidade do módulo de elasticidade do material dos tubos sensores.	Mínimo de três temperaturas distribuídas uniformemente, entre as temperaturas máxima e mínima.	Temperatura do fluido medida por poço termométrico ou por sensor integrado aos tubos vibratórios.

(continua)

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 10/21
---	---------------	------------	-----------------

Número de Reynolds	Sugerido apenas para viscosidades cinemáticas superiores à da água.	Mínimo de três viscosidades cinemáticas (além do fluido de referência), cobrindo toda a faixa de números de Reynolds de interesse. É recomendado que haja sobreposição da faixa de números de Reynolds entre viscosidades adjacentes. As viscosidades podem ser dispostas geometricamente para uma melhor análise do número de Reynolds: $v_i = v_{min} \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right)^{\frac{i}{n}}$ v_i: Cada viscosidade a ser ensaiada ($i = 1, 2, \dots, n$). v_{min}, v_{max}: Viscosidades mínima e máxima de operação. n: número de viscosidades.	Número de Reynolds do escoamento no interior dos tubos vibratórios. Calculado a partir da medição da vazão mássica, da viscosidade e da densidade do fluido e diâmetro interno dos tubos vibratórios
--------------------	---	---	---

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

Nota 1 – Para a maioria das ligas metálicas apresentadas na norma ASME B31.1, a faixa de -50 °C a 150 °C apresenta não-linearidades no módulo de elasticidade abaixo de 0,5 %.

Nota 2 - Caso a menor viscosidade de operação não seja a determinada nas condições de referência, $i = 0, 1, 2, \dots, n$, de forma que uma viscosidade adicional será ensaiada

9.4 Primeira calibração

Nos casos em que os procedimentos dispostos no item 9.2 não forem executados em cada unidade produzida, recomenda-se que a primeira calibração de cada unidade seja realizada em toda a faixa de vazão mássica de operação, na condição de referência escolhida, e que ao menos a avaliação da influência do número de Reynolds seja realizada. Neste caso, uma única viscosidade cinemática pode ser utilizada, desde que cubra toda a faixa de números de Reynolds de interesse.

9.5 Calibrações subsequentes

9.5.1 As calibrações subsequentes podem ser conduzidas nas condições de referência, em toda a faixa de vazão mássica de operação.

9.5.2 Na ocorrência de qualquer alteração no comportamento do medidor, é recomendado que o procedimento descrito no item 9.2 seja realizado novamente.

Nota - A alteração no comportamento do medidor pode ser caracterizada por meio de modificação nos indicadores de diagnósticos do medidor ou por uma mudança estatisticamente significativa nos resultados de calibração do medidor entre calibrações consecutivas ou em relação à calibração inicial.

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 11/21
---	---------------	------------	-----------------

9.6 Operação dos medidores

9.6.1 Para garantia da compensação adequada dos parâmetros de influência do medidor, é importante que os procedimentos utilizados durante a operação sejam os mesmos definidos na alínea d) do item 9.2. É importante que o medidor sempre opere dentro dos limites estabelecidos na alínea c) do item 9.2.

9.6.2 Nas seções anteriores foram dispostas orientações sobre efeitos que podem afetar o desempenho de um medidor de vazão do tipo Coriolis em condições de escoamento adequadas. No entanto, efeitos adversos ainda podem ocorrer ao se utilizar fluidos diferentes. Em especial, é importante considerar a possibilidade de ocorrência de cavitação quando medidores do tipo Coriolis forem operados com fluidos de menor pressão de vapor ou sob pressões menores às quais foram calibrados.

9.6.3 Nos casos em que é viável realizar compensações em pós-processamento, a prática de transferibilidade da calibração pode ser implementada. No entanto, é importante que os procedimentos de correção aplicados durante a operação sejam os mesmos estabelecidos durante a análise da transferibilidade.

9.7 Extrapolação

9.7.1 É sempre desejável evitar a extrapolação de resultados. No entanto, algumas condições, especialmente de pressão e de temperatura, podem ser difíceis ou inviáveis de serem replicadas em laboratório. Nesse caso, a critério do usuário, a extrapolação do parâmetro para valores superiores aos ensaiados (9.2c) pode ser considerada.

9.7.2 Para se estimar os valores de incerteza associados ao valor do parâmetro extrapolado, é recomendado que seja utilizada uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. Não é recomendável que seja realizada a extrapolação da curva de correção do número de Reynolds.

Nota - É importante assegurar que a extrapolação não ultrapasse a região de linearidade do parâmetro testado. Para a temperatura, esta região pode ser estabelecida como a faixa linear do módulo de elasticidade da liga metálica dos tubos vibratórios. Para a pressão, o limite de escoamento (valor da tensão a partir do qual o material começa a se deformar plasticamente) pode ser utilizado para a determinação da região de linearidade.

10 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DA TRANSFERIBILIDADE

Quando um medidor de vazão de fluidos do tipo Coriolis opera fora das condições em que foi calibrado, é conveniente que componentes adicionais de incertezas, relativos à contribuição de cada um dos parâmetros de influência considerados, sejam incluídos no balanço de incerteza. A metodologia aqui apresentada não é a única abordagem possível, porém apresenta uma metodologia conservadora e viável.

Nota – Apesar de a abordagem sugerida apresentar componentes adicionais de incerteza, ressalta-se que parâmetros importantes de reprodutibilidade das medidas obtidas com o medidor, que não ocorrem em uma calibração convencional, serão considerados, trazendo uma maior confiabilidade à medição.

10.1 Avaliação da incerteza para cada parâmetro de influência na transferibilidade

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 12/21
---	---------------	------------	-----------------

10.1.1 A incerteza expandida para cada parâmetro de influência na transferibilidade, após a realização dos ensaios, pode ser calculada como:

$$U_{t,i} = k_{t,i} \sqrt{\left(\frac{U_{r,i}}{k_{r,i}}\right)^2 + \left(\frac{U_{e,i}}{k_{e,i}}\right)^2 + \left(\frac{U_i}{k_i}\right)^2} \quad (1)$$

Onde:

$U_{t,i}$, $k_{t,i}$ são as incertezas expandidas e fatores de abrangência de transferibilidade, para cada parâmetro, respectivamente.

$U_{r,i}$, $k_{r,i}$ são a incerteza expandida e o fator de abrangência obtidos na calibração de referência para o parâmetro em análise (9.1 b), respectivamente.

$U_{e,i}$, $k_{e,i}$ são a incerteza expandida e fator de abrangência obtidos no ensaio de cada parâmetro de influência (9.1 e), respectivamente.

U_i e k_i são a incerteza expandida e fator de abrangência associados à correção de cada um dos parâmetros de influência.

Nota - A equação para cálculo de incertezas pode ser modificada para que constem as correlações existentes entre as grandezas de entrada.

10.1.2 Para assegurar a adequação dos valores de incerteza atribuídos a cada um dos parâmetros de influência, o seguinte método estatístico pode ser aplicado:

$$\frac{|e_r - e_{e,i}|_{max}}{\sqrt{U_r^2 + U_i^2}} \leq 1 \quad (2)$$

10.1.3 É recomendável que as incertezas expandidas (U_i) e parâmetros de abrangência (k_i) associados à correção dos parâmetros de influência sejam determinadas previamente aos ensaios. Caso contrário, U_i pode ser estimada como a máxima diferença entre os erros apresentados pelo medidor obtidos na calibração de referência (e_r) e nos ensaios de cada um dos parâmetros ($e_{e,i}$), com distribuição de probabilidades (k_i) retangular, tal que:

$$\frac{U_i}{k_i} = \frac{|e_r - e_{e,i}|_{max}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 13/21
---	---------------	------------	-----------------

10.2 Incerteza de calibração com transferibilidade

A incerteza associada ao valor do fator de calibração do medidor, após a aplicação de todas as correções ($U_{c,t}$), pode ser estimada como:

$$U_{c,t} = k_{c,t} \sqrt{\left(\frac{U_c}{k_c}\right)^2 + \sum \left(\frac{U_{t,i}}{k_{t,i}}\right)^2} \quad (4)$$

Onde $k_{c,t}$ é o fator de abrangência da calibração transferível, U_c e k_c são a incerteza expandida e o fator de abrangência da calibração, respectivamente.

Nota 1 - A equação para cálculo de incertezas pode ser modificada para que constem as correlações existentes entre as grandezas de entrada.

Nota 2 - Os cálculos para obtenção dos valores de incerteza, fatores de abrangência e graus de liberdade efetivos podem ser obtidos nas recomendações contidas no GUM.

10.3 Avaliação da incerteza para valores extrapolados

Nos casos onde há extrapolação, a incerteza associada à regressão linear pode ser combinada à incerteza relacionada à transferibilidade do parâmetro em análise.

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 14/21
---	---------------	------------	-----------------

10.4 Recomendações sobre os critérios de aceitação da transferibilidade

10.4.1 Para a aceitação da transferibilidade da calibração de um medidor de vazão do tipo Coriolis, sugere-se que a incerteza expandida, após a aplicação de todas as correções, seja menor ou igual à incerteza máxima aceitável (U_{max}) para a aplicação, em todos os pontos de vazão mássica ensaiados:

$$U_{c,t} \leq U_{max} \quad (5)$$

10.4.2 A critério do usuário, outros aspectos podem ser avaliados nos resultados dos ensaios, a exemplo da repetibilidade, linearidade e erros máximos admissíveis.

11 HISTÓRICO DE REVISÃO E QUADRO DE APROVAÇÃO

Revisão	Data	Itens Revisados
00	Xxx/2024	▪ Emissão Inicial

Quadro de Aprovação		
	Nome	Atribuição
Elaborado por:	Fábio Ouverney Costa	Pesquisador Tecnologista em Metrologia e Qualidade
Verificado por:	Carlos Leonardo Da Silva Azeredo	Técnico em Metrologia e Qualidade
	Caroline Margarida Mendes Salgado	Assistente Executiva
	Douglas de Almeida Garcia	Engenheiro Pesquisador
	Jorge Gomez Sanchez	Bolsista
	Marcos Henrique Gonçalves De Aquino	Pesquisador Tecnologista em Metrologia e Qualidade
Aprovado por:	Priscila Costa Gabriel	Chefe do Laliq
	Samuel Araujo	Chefe do Lagas
Aprovado por:	Erlon Henrique Martins Ferreira	Gestor da Qualidade da Dimci

/ANEXO A

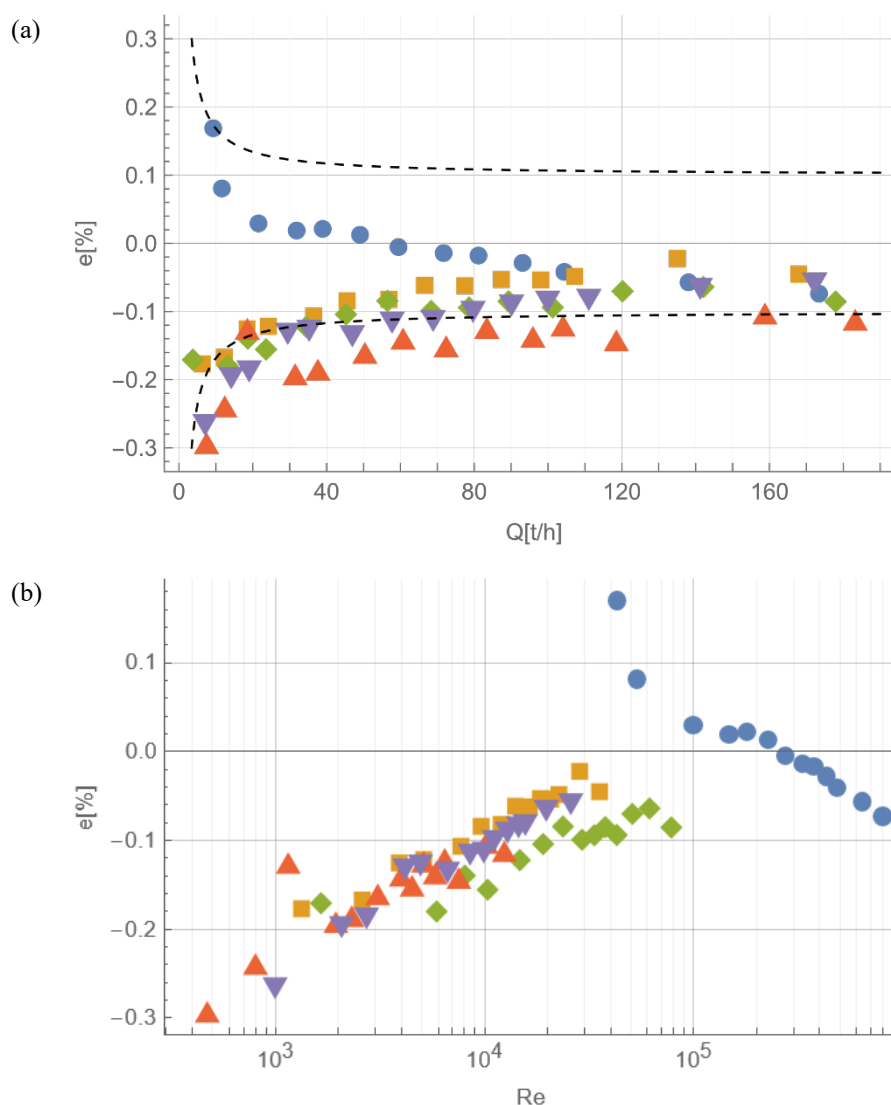
	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 15/21
---	---------------	------------	-----------------

ANEXO A - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A-1 Exemplo 1 – Transferibilidade com influência do número de Reynolds

A-1.1 O primeiro exemplo ilustra um medidor de vazão do tipo Coriolis de 80 mm de diâmetro nominal (DN 80 – 3 polegadas), no qual os efeitos associados a baixos números de Reynolds podem levar a erros sistemáticos de até -0,3 %, conforme demonstrado na Figura 1(a). A Figura 1(b) apresenta os resultados dos ensaios em função do número de Reynolds, onde é possível observar claramente a correlação do erro de medição do medidor com o número de Reynolds. Neste exemplo, o fluido utilizado como referência foi água (círculos azuis) a 23 °C, e os ensaios para avaliar a influência do número de Reynolds foram realizados com óleos minerais (demais símbolos), de viscosidades cinemáticas de até 86 mm²/s (86 cSt).

Figura 1 – Influência de baixos números de Reynolds em medidores Coriolis. (a) Erro em função da vazão mássica. (b) Erro em função do número de Reynolds.

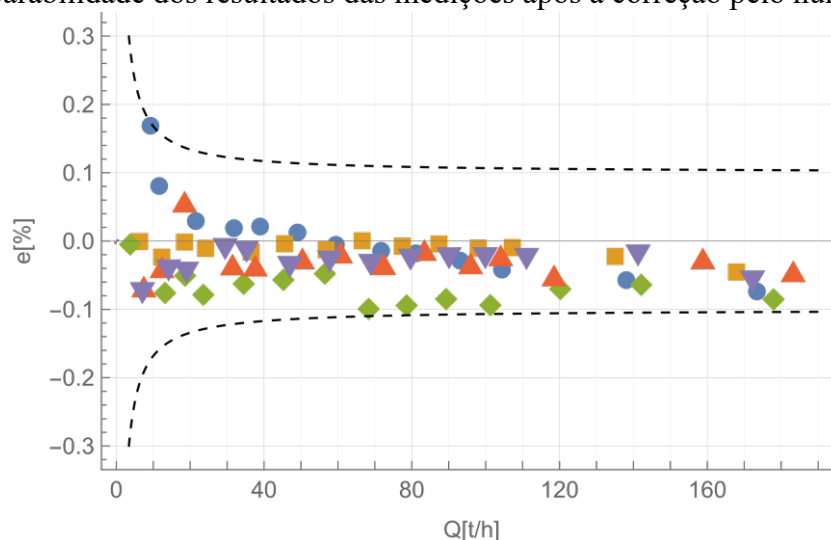


Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

A-1.2 Para este medidor, o erro sistemático devido ao efeito de baixos números de Reynolds pode ser corrigido de acordo com a seguinte equação:

$$e(Re) = \begin{cases} 0 & Re > 2,5 \cdot 10^4 \\ 0,048 \ln(Re) - 0,551 & Re < 2,5 \cdot 10^4 \end{cases} \quad (1)$$

Figura 3 – Comparabilidade dos resultados das medições após a correção pelo número de Reynolds.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

Tabela 3 - Valores de erro de medida após a aplicação da correção pelo número de Reynolds.

Água		Óleo 1		Óleo 2		Óleo 3		Óleo 4	
Q [t/h]	E [%]	Q [t/h]	E [%]	Q [t/h]	E [%]	Q [t/h]	E [%]	Q [t/h]	E [%]
9,25	0,169	3,77	-0,005	6,31	-0,001	7,07	-0,076	7,46	-0,066
11,62	0,081	13,21	-0,076	12,30	-0,024	14,15	-0,043	12,39	-0,038
21,53	0,029	18,64	-0,051	18,50	-0,001	19,01	-0,046	18,50	0,058
31,87	0,019	23,57	-0,079	24,20	-0,011	29,47	-0,012	31,46	-0,034
38,94	0,021	34,50	-0,063	36,50	-0,016	35,24	-0,016	37,64	-0,036
49,05	0,013	45,23	-0,057	45,54	-0,004	46,96	-0,038	50,37	-0,025
59,46	-0,005	56,47	-0,048	56,85	-0,013	57,74	-0,030	60,71	-0,017
71,69	-0,014	68,32	-0,099	66,56	0,000	68,87	-0,035	72,39	-0,034
81,15	-0,018	78,60	-0,094	77,45	-0,008	79,66	-0,027	83,41	-0,013
93,10	-0,029	89,29	-0,085	87,36	-0,004	90,09	-0,025	95,90	-0,032
104,41	-0,042	101,27	-0,094	98,01	-0,011	99,89	-0,025	104,06	-0,021
138,06	-0,057	120,19	-0,070	107,22	-0,010	111,05	-0,026	118,50	-0,050
173,43	-0,074	142,08	-0,064	135,05	-0,022	141,24	-0,021	158,78	-0,025
		177,92	-0,085	167,91	-0,045	172,22	-0,059	183,24	-0,044

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

A-1.3 A Tabela 3 apresenta os valores de erro de medida após a aplicação da correção pelo número de Reynolds. Realizando a comparação entre os resultados da calibração com água e das calibrações com os diferentes óleos, para aproximadamente a mesma vazão, é possível determinar a maior diferença entre a

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 17/21
---	---------------	------------	-----------------

condição de referência e os demais ensaios. Para o óleo 1, à vazão de 68,32 t/h, o erro obtido foi de -0,099 %. A vazão mais próxima obtida em água foi de 71,69 t/h, com um erro de medição de -0,014 %, resultando em uma diferença de 0,085 %.

A-1.4 As incertezas obtidas durante a calibração com o fluido de referência foram de 0,06 % e para os ensaios com os outros fluidos foram 0,09 % ($k = 2$ para um nível da confiança de aproximadamente 95 %). A incerteza adicional associada à correção $f(Re)$ é de 0,07 % ($k = 2$ para um nível da confiança de aproximadamente 95 %). Após a aplicação da correção, os resultados demonstram que os erros de medição em função da vazão mássica são coerentes para todos os fluidos ensaiados, e todos os pontos resultaram dentro dos limites de erro informados pelo fabricante, conforme pode ser observado na Figura 3. A incerteza associada à transferibilidade pode, então, ser estimada como:

$$U_{t,i} = 2 \sqrt{\left(\frac{0,06}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,09}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,07}{2}\right)^2} = 0,13 \% \quad (2)$$

A-1.5 A maior diferença entre os resultados obtidos na calibração de referência e nas calibrações com outros fluidos para vazões acima de 30 t/h foi de aproximadamente 0,085 %. A adequação do valor associado à incerteza de $f(Re)$ pode ser confirmada de acordo com o método estatístico sugerido:

$$\frac{|e_r - e_{e,i}|}{\sqrt{U_r^2 + U_i^2}} = \frac{0,085}{\sqrt{0,06^2 + 0,7^2}} = 0,92 < 1 \quad (3)$$

A-1.6 Finalmente, a incerteza associada ao fator de calibração do medidor, considerando uma calibração nas condições de referência com 0,06 % e a incerteza de transferibilidade de 0,13 %, pode ser calculada como:

$$U_{c,t} = 2 \sqrt{\left(\frac{0,06}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,13}{2}\right)^2} = 0,14 \% \quad (4)$$

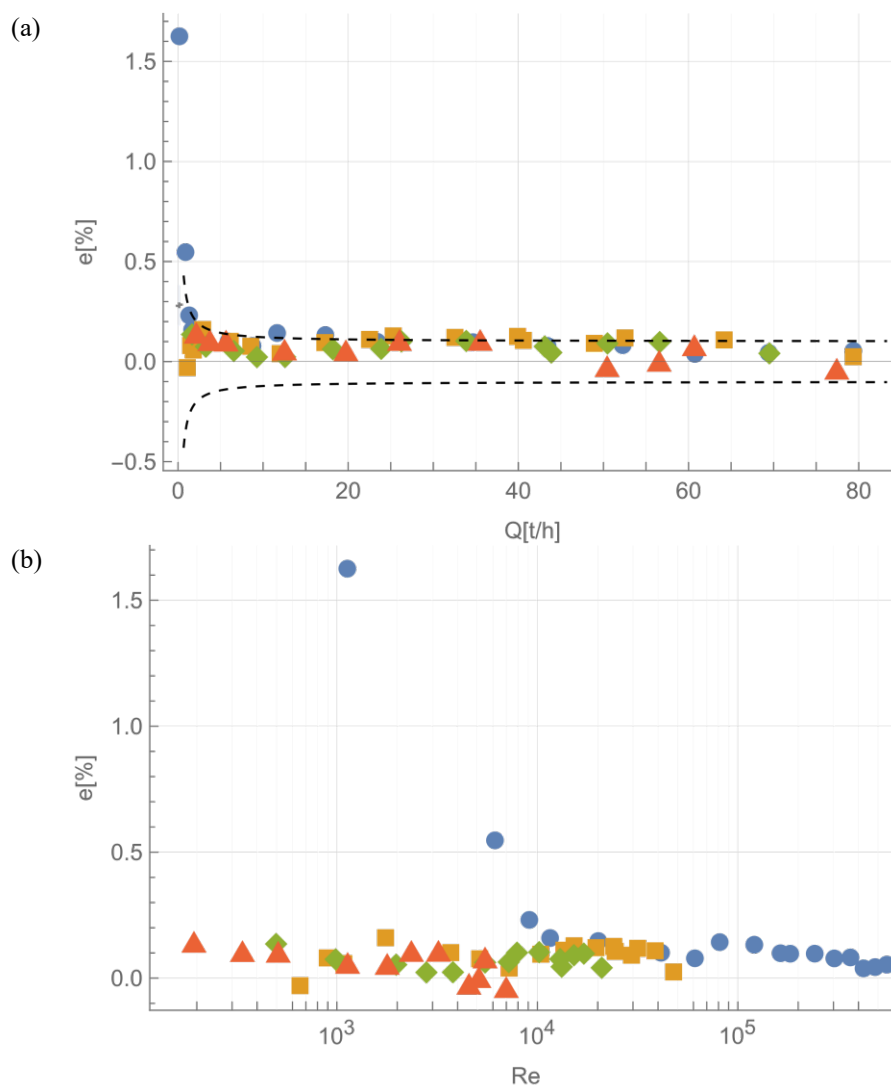
A-2 Exemplo 2 – Transferibilidade sem influência do número de Reynolds

A-2.1 O segundo exemplo trata de um medidor de vazão do tipo Coriolis de 50 mm de diâmetro nominal (DN 50 – 2 polegadas), cujo efeito do número de Reynolds não influencia os resultados de medição. Para este medidor, a condição de referência utilizada foi água (círculos azuis) a 19 °C, e os ensaios foram realizados com óleos de viscosidade de até 89 mm²/s (89 cSt) (demais símbolos).

A-2.2 É possível observar, a partir da Figura 2(a), que, independentemente da viscosidade do fluido ensaiado, os resultados de erro de medição estão compreendidos nos limites declarados pelo fabricante (linhas pretas tracejadas). A Figura 2(b) mostra que o comportamento do medidor apresenta comportamento uniforme ao longo de toda a faixa de números de Reynolds.

Figura 2 – Resultados de medição para um medidor Coriolis insensível ao número de Reynolds. (a) Erro de medida em função da vazão mássica. (b) Erro de medida em função do número de Reynolds.

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 18/21
---	---------------	------------	-----------------



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

A-2.3 A transferibilidade, neste caso, será considerada para valores de vazão acima de 10 t/h, onde os efeitos de zero do medidor não são expressivos. A máxima diferença entre resultados com água foi de 0,13 % (para este caso, esta será considerada a incerteza de correção de número de Reynolds). As incertezas para a calibração de referência foram de 0,07 % e 0,09 % para óleos ($k = 2$). A incerteza associada à transferibilidade será, portanto:

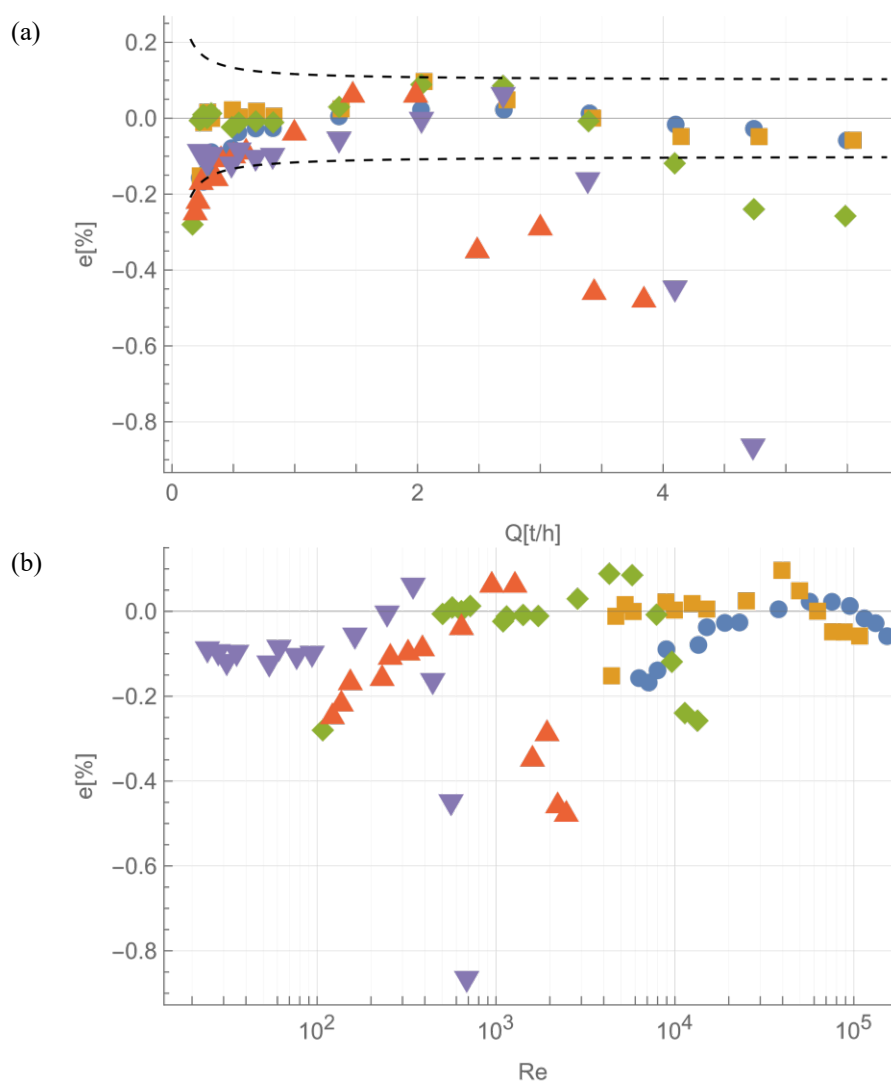
$$U_{t,i} = 2 \sqrt{\left(\frac{0,07}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,09}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,13}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,19 \% \quad (5)$$

A-3 Exemplo 3 – Inviabilidade da transferibilidade

	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 19/21
---	---------------	------------	-----------------

O terceiro exemplo trata de um medidor de 15 mm de diâmetro nominal (DN 15 - ½ polegada), testado com água (círculos azuis) e fluidos de viscosidade cinemática de até 270 cSt (demais símbolos). Como é possível observar na Figura 3, não foi possível, a partir dos ensaios realizados, demonstrar uma correlação entre o desempenho do medidor e o número de Reynolds. Deste modo, não é possível comprovar a transferibilidade.

Figura 3 – Exemplo de medidor de vazão do tipo Coriolis não apto à aplicação de transferibilidade. (a) Erro de medida em função da vazão mássica. (b) Erro de medida em função do número de Reynolds.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

A-4 Exemplo 4 - Transferibilidade com influência da pressão

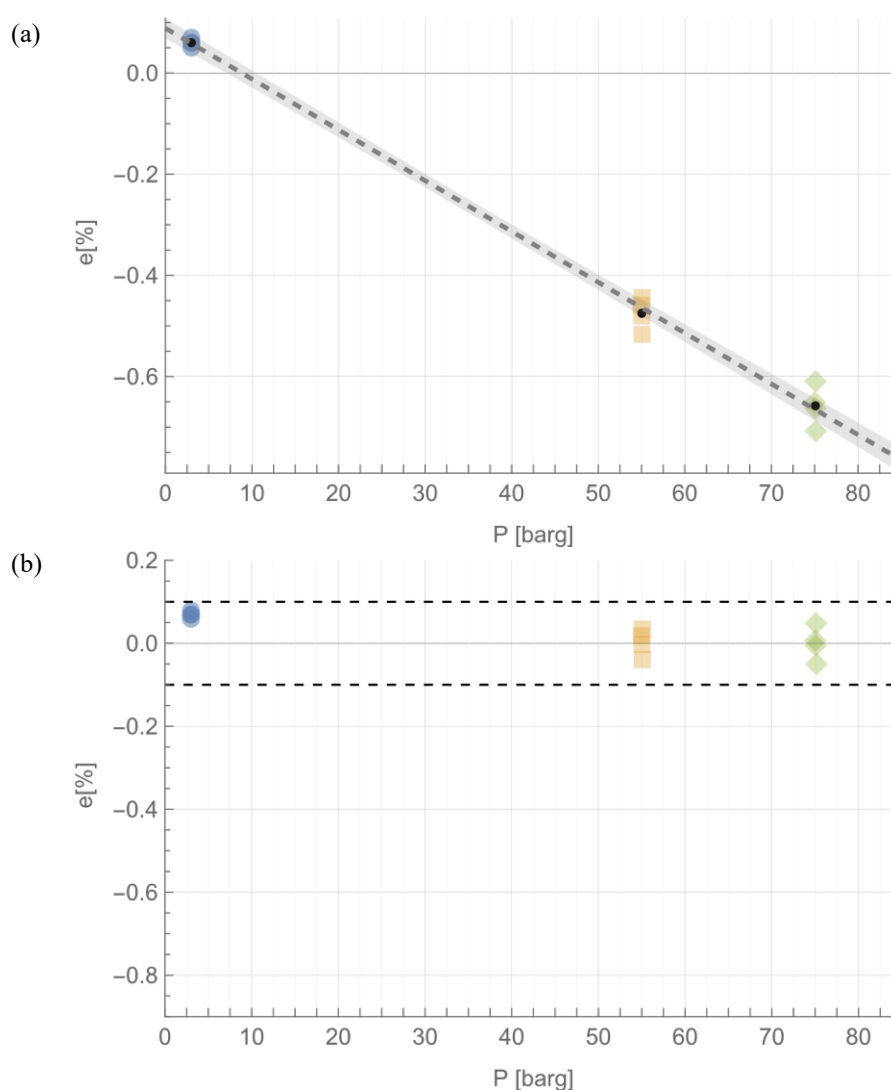
	DOQ-DIMCI-015	REV. 00	PÁGINA 20/21
---	---------------	------------	-----------------

A-4.1 No exemplo 4, é analisada a influência da pressão do fluido em um medidor de vazão do tipo Coriolis DN 80. Apesar de ser um parâmetro de influência já bem conhecido e normalmente corrigido, em alguns casos pode ser interessante assegurar o bom desempenho do medidor em condições de pressões elevadas.

A-4.2 Para este caso, apenas o efeito da pressão foi estudado. A condição de referência foi a pressão de 2,6 bar, obtida em uma calibração do medidor com querosene (círculos azuis), com incerteza de 0,08 % ($k = 2$ para um nível da confiança de aproximadamente 95 %), enquanto os ensaios para análise de influência foram realizados com óleo mineral (demais símbolos), nas pressões de 55 bar e 75 bar, com incerteza de 0,08 %.

A-4.3 Antes da aplicação da correção de pressão, $f(P)$, os erros chegaram a 0,75 % (Figura 4(a)). A incerteza associada ao fator de correção de pressão é de 0,06 % ($k = 2$) e a máxima diferença entre a calibração de referência e as calibrações dos ensaios, após a correção, foi de 0,10 % (Figura 4(b)).

Figura 4 – Efeitos da pressão do fluido em medidores de vazão do tipo Coriolis. (a) Sem correção. (b) Após correção.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam