

Particularidades Relativas à Aferição e Calibração de Dilatômetros

Nelson de Barros Pinto

BP Engenharia Indústria e Comércio Ltda

Rua Dr. Elton César 441, Amarais, C.P. 700, 13082-025 Campinas - SP

e-mail: bp@bpengenharia.com.br

Resumo: Este trabalho define os diversos aspectos que interferem na aferição e calibração de dilatômetros, ressaltando a importância da natureza do Sistema Porta Amostra. Descreve um método de calibração especialmente desenvolvido para Sistemas Porta Amostra com elevado valor de dilatação Térmica.

Palavras-chaves: *Aferição, calibração, dilatômetro*

1. Introdução

A determinação da dilatação térmica tem sido realizada por diversos tipos de equipamentos dentre os quais destacamos o **Dilatômetro ótico**, onde as variações dimensionais são acompanhadas por dispositivos óticos (catetômetros ou dispositivos digitais de captura de imagem), e **Dilatômetros diferenciais**.

Dentre os diversos tipos de Dilatômetros, os mais utilizados atualmente são os **Dilatômetros diferenciais**, ou aqueles que possuem um sistema porta amostra constituído por um tubo que suporta o corpo de prova no interior de um forno, e um êmbolo, que tem uma extremidade em contato com o corpo de prova e transmite a variação dimensional que este experimenta, durante o aquecimento, até um transdutor, localizado na extremidade oposta do êmbolo.

O sistema porta amostra é complementado por um sensor de temperatura (termopar) localizado junto ao corpo de prova em ensaio.

Esquemáticamente temos a Fig. 1.

A **dilatação térmica** é representada geralmente por um gráfico que relaciona a variação dimensional à temperatura correspondente. Assim, a definição da dilatação térmica depende da determinação da variação dimensional, geralmente detectada por um transdutor L.V.D.T. (micro transformador diferencial), e da determinação da temperatura detectada por um termopar.

A princípio poderíamos supor que a exatidão de um Dilatômetro decorre exclusivamente da perfeita calibração

destes dois sensores (L.V.D.T. e termopar), porém, esta afirmação está muito longe de ser verdadeira, o que justifica o presente trabalho que tem como objetivos:

- Esclarecer alguns pontos que influem na performance de um Dilatômetro.
- Oferecer orientação para a escolha do Dilatômetro mais adequado às suas necessidades.
- Apresentar métodos corretos de calibração.

Existem dois pontos de extrema importância que influem definitivamente na exatidão de um Dilatômetro. O primeiro ponto está relacionado com a determinação da temperatura, e o segundo com as interferências decorrentes da dilatação do sistema porta amostra (S.P.A.).

2. Determinação da Temperatura

O primeiro ponto a considerar decorre do fato de a temperatura nos ensaios dilatométricos ser detectada por um sensor metálico localizado nas proximidades do corpo de prova; por ser metálico e bastante delgado, o termopar registra a temperatura do ambiente muito melhor e mais rápido que o corpo de prova em ensaio, com dimensões bem mais avantajadas.

O ideal seria que o termopar indicasse sempre a temperatura média do corpo de prova em ensaio, o que realmente não ocorre.

Para comprovar este fato, basta a realização de um ensaio com um cristal de Quartzo, o qual apresenta uma indiscutível inversão térmica a 573 °C. Observamos, especi-

almente através da derivada, que a inversão geralmente está indicada a uma temperatura diferente da teórica, ou seja, a temperatura média do corpo de prova é diferente da temperatura registrada pelo termopar. Se variarmos a posição do termopar e repetirmos o ensaio, veremos que a temperatura da inversão térmica indicada varia em função do posicionamento do termopar, ilustrando o que foi dito. Imagine que a diferença muitas vezes encontrada entre laboratórios, na determinação da temperatura de amolecimento em fritas e esmaltes, por exemplo, é realmente decorrente deste fato.

O exemplo de ensaio com cristal de Quartzo CAL0573 (Fig. 2) e sua derivada mostra a inversão do Quartzo indicada a 584,5 °C. Isto quer dizer que quando o corpo de prova (cristal de Quartzo) estava a uma temperatura média de 573 °C (temperatura da inversão) o termopar já estava registrando 584,5 °C.

Observando posição e dimensões do corpo de prova e termopar, fica fácil aceitar esta discrepância. Alguns pesquisadores em ensaios de maior precisão perfuram o corpo de prova e introduzem um termopar em seu interior na expectativa de determinar a temperatura média do corpo de prova.

Atualmente, a correção desta discrepância deve ser feita pelo *Soft* que acompanha o equipamento, e consiste na re-

alização de ensaios com padrões com inversão térmica conhecida (como o Quartzo), ou ponto de amolecimento conhecido, em diversas faixas de temperatura. Com base nestes ensaios o *Soft* vai realizar uma correção na temperatura detectada pelo termopar, de tal sorte que a temperatura indicada coincida com a temperatura média do corpo de prova.

Por exemplo, após a realização do ensaio de calibração exemplificado, "CAL0573", utilizando um cristal de Quartzo, o *Soft* calcula um fator de linearização específico para esta faixa de temperatura.

Os ensaios subsequentes realizados com cristais de Quartzo vão indicar a temperatura da inversão a 573 °C, constatando a eficiência do método.

Usualmente são utilizados três ou quatro coeficientes de linearização para baixa, média, média alta e alta temperatura, sendo cada coeficiente definido a partir de ensaio realizado com um corpo de prova que apresente um acidente térmico dentro da faixa a ser corrigida. Por exemplo, o Quartzo cristalino é um excelente padrão para correção da faixa de temperatura "média" entre 450 e 800 °C aproximadamente.

Além do Quartzo, que pode ser considerado universal, o próprio operador pode selecionar os padrões mais indicados para o seu caso, como vidros com temperatura de amolecimento conhecida etc., bastando informar ao *Soft* a temperatura onde o acidente térmico deve ocorrer.

Considerando que a maioria das fritas e esmaltes apresentam temperatura de amolecimento relativamente próxima à temperatura de inversão do Quartzo, a aferição do Dilatômetro com Quartzo cristalino é condição indispensável para a correta determinação das temperaturas de amolecimento, acoplamento e transição vítrea.

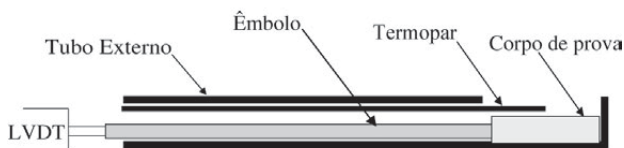


Figura 1.

Bp Engenharia

Sistema de análises térmicas modelo RB-3000-20

Análise Dilatométrica

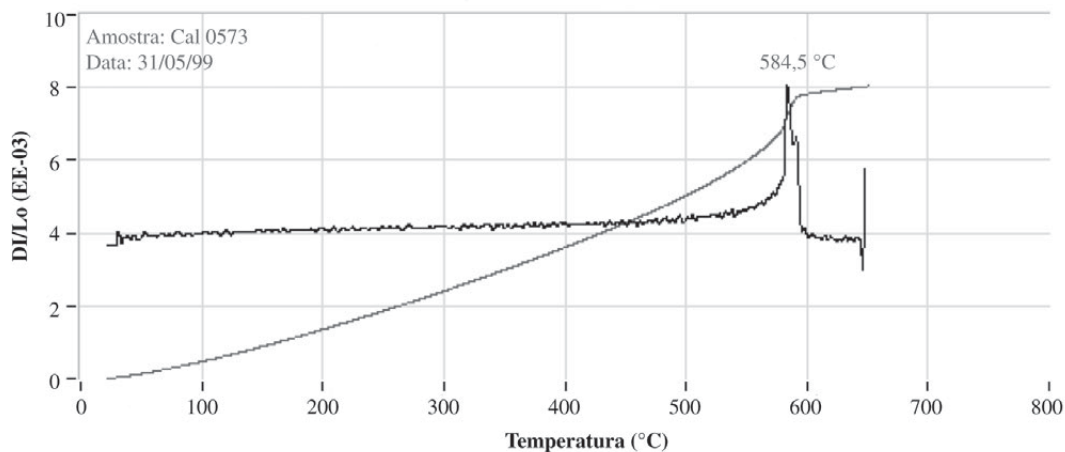


Figura 2. Ensaio com quartzo cristalino.

O Quartzo cristalino é o padrão ideal, não só pela temperatura em que apresenta a inversão, mas também pela repetibilidade, grande intensidade do acidente térmico, e facilidade de obtenção.

Outra fonte de erros, também relacionada com a determinação da temperatura, decorre da característica dos termopares de detectarem apenas a diferença de temperatura entre a extremidade que está em contato com o interior do forno (junta quente) e a extremidade oposta (junta fria). Para exemplificar, um termopar com a junta quente no interior de um forno exatamente a 500 °C e com a outra extremidade à temperatura ambiente de 25 °C estará registrando exatamente 475 °C.

A correção desta diferença exige que um outro dispositivo esteja lendo a temperatura ambiente, de tal sorte que a temperatura indicada seja a soma da temperatura detectada pelo termopar e a temperatura ambiente indicada detectada pelo dispositivo mencionado. O dispositivo que realiza esta correção (**compensação da temperatura ambiente**), geralmente um circuito eletrônico, precisa ser periodicamente aferido e calibrado sempre que necessário; qualquer erro na determinação da temperatura ambiente vai afetar diretamente a determinação das temperaturas de amolecimento, acoplamento e transição vítrea, ou qualquer outro acidente térmico.

3. Compensação da dilatação do Sistema Porta Amostra (S.P.A.)

O **segundo ponto** que influi na performance de um Dilatômetro decorre da interferência provocada pela dilatação do Sistema Porta Amostra (S.P.A); de fato, quando o corpo de prova é posicionado dentro do forno e submetido ao tratamento térmico, todo o Sistema Porta Amostra que o sustenta também é aquecido e experimenta dilatações específicas à sua natureza, que vão interferir no resultado da dilatação do corpo de prova.

Observando o desenho esquemático (Fig. 3) vamos entender como a dilatação de cada um dos elementos aquecidos vai interferir na determinação da dilatação do corpo de prova:

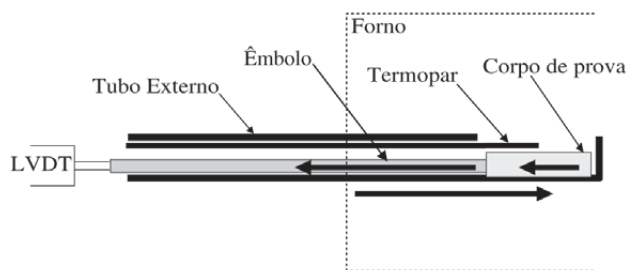


Figura 3.

A) Considerando apenas a dilatação do corpo de prova, imaginando um Sistema Porta Amostra (S.P.A) ideal, sem dilatação térmica, podemos verificar que qualquer dilatação experimentada pelo corpo de prova será fielmente transmitida pelo êmbolo até o sensor (“LVDT”) de variação dimensional, que vai registrar valores crescentes de dilatação.

B) Vamos visualizar os efeitos decorrentes da dilatação térmica do êmbolo:

Podemos verificar, pela observação do desenho esquemático, que qualquer dilatação experimentada pelo êmbolo irá se somar à dilatação do corpo de prova, levando o transdutor a registrar a dilatação do corpo de prova e também a do êmbolo.

C) Considerando que o corpo de prova está apoiado na extremidade do Tubo Porta Amostra, podemos imaginar que a dilatação do Tubo externo irá provocar um afastamento do corpo de prova em relação ao êmbolo que, ao acompanhar este movimento, irá se afastar do transdutor de variação dimensional, o qual passará a registrar um valor menor de dilatação. Em resumo, o transdutor estará lendo a dilatação do corpo de prova somada à dilatação do êmbolo e subtraída da dilatação do Tubo Porta Amostra, ou:

$$\Delta L \text{ lido} = \Delta L_{CP} + \Delta L_{\text{êmbolo}} - \Delta L_{\text{Tubo}}$$

Se o êmbolo afeta o valor lido, levando o transdutor a ler valores mais positivos e o tubo a ler valores mais negativos, podemos imaginar que estas dilatações se anulam, uma vez que o êmbolo e o tubo são construídos do mesmo material, tendo, portanto, a mesma dilatação.

Parcialmente isto acontece, porém, a compensação não é completa devido ao fato de o tubo ser maior que o êmbolo, de um comprimento exatamente igual ao comprimento do corpo de prova (L0). Esquemáticamente temos a Fig. 4.

Podemos observar duas zonas distintas:

A “zona de compensação”, onde existem o êmbolo e o tubo, teoricamente à mesma temperatura e, portanto, com a dilatação do êmbolo compensando a dilatação do tubo, sem interferência para a leitura do transdutor, que registra

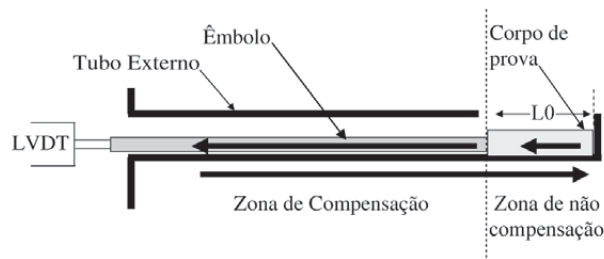


Figura 4.

apenas a dilatação do corpo de prova, se considerarmos apenas esta zona.

A segunda zona é a “zona de não compensação”, com comprimento igual ao comprimento do corpo de prova (L0). Não existindo o êmbolo para compensar o tubo, a dilatação deste irá interferir na leitura do transdutor. É como se estivéssemos fazendo ao mesmo tempo um ensaio dilatométrico do corpo de prova, e outro do tubo porta amostra, e o valor detectado pelo transdutor será a diferença entre a dilatação do corpo de prova e a do material de que é feito o sistema porta amostra (Dilatômetro diferencial). Como o comprimento do corpo de prova e do segmento do tubo sem compensação é o mesmo, e lembrando que o coeficiente de dilatação é igual a:

$$\frac{\Delta L}{L0 \times \Delta T} \quad (1)$$

Podemos afirmar que o coeficiente de dilatação determinado pelo Dilatômetro em questão corresponde ao coeficiente de dilatação do corpo de prova menos o coeficiente de dilatação do material de que é feito o sistema porta amostra ou:

$$\alpha_{\text{lido}} = \alpha_{\text{c.p.}} - \alpha_{\text{tubo}} \quad (2)$$

onde:

$$\alpha_{\text{lido}} = \frac{\Delta L_{\text{cp}} - \Delta L_{\text{tubo}}}{L0 \times \Delta T} \quad (3)$$

L0 e ΔT são comuns para o corpo de prova e para o sistema porta amostras na zona de não compensação.

Equacionada a interferência visualizamos a solução que consiste em somar ao valor lido pelo transdutor o valor da dilatação do material de que é feito o sistema porta amostra, ou seja:

$$\alpha_{\text{corrigido}} = \alpha_{\text{lido}} + \alpha_{\text{s.p.a.}} \quad (4)$$

Teoricamente o problema está resolvido, mas o resultado prático difere um pouco do esperado e isto se deve especialmente à compensação de dilatação na zona de compensação.

Observando mais atentamente esta zona, verificamos que a compensação só vai ser completa se as temperaturas do tubo e do êmbolo forem exatamente iguais. Verificamos também que qualquer diferença de temperatura vai causar uma grande variação em termos de dilatação devido ao grande comprimento da zona de compensação.

Ora, o tubo externo está em contato com a atmosfera do forno em um determinado comprimento e em contato com a atmosfera do ambiente quando externo ao forno. Por outro lado, o êmbolo está interno ao tubo em todo o seu comprimento, o que torna fácil admitir a existência de uma diferença de temperatura entre estes elementos, em

pelo menos uma porção de seu comprimento, considerando que estes elementos estão submetidos a condições diferentes: o tubo em contato com o ambiente e o êmbolo isolado do ambiente pelo próprio tubo.

Definimos, então, uma segunda fonte de erros devido à dilatação do S.P.A na determinação da dilatação térmica. Enquanto a primeira fonte de erros, já citada, ocorre na “zona de não compensação” e é perfeitamente definida, esta segunda ocorre na “zona de compensação” devido à diferença de temperatura nos elementos do S.P.A. e não pode ser facilmente equacionada.

Este fato explica a necessidade da determinação prática da **compensação da dilatação do S.P.A.**, uma vez que a dilatação teórica do material de que é feito o S.P.A. apenas compensa as interferências que ocorrem na “zona de não compensação”; explica também porque, quando são utilizados S.P.A. de Alumina, com dilatação térmica bastante elevada, as condições do ambiente onde o ensaio é realizado devem ser mantidas constantes, já que as diferenças de temperatura entre o tubo externo e o êmbolo podem variar significativamente em função das condições do ambiente e, conseqüentemente, alterar a determinação da dilatação.

A utilização de sistema porta amostra de Quartzo Vítreo, com dilatação térmica muito baixa, naturalmente minimiza as interferências mencionadas, uma vez que se aproxima do sistema porta amostra ideal, sem dilatação térmica. O coeficiente de dilatação térmica linear reversível do vidro de quartzo entre 25 e 1000 °C é cerca de $5,5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$.

Sistemas porta amostra em Quartzo Vítreo, próximos ao ideal, devem ser utilizados sempre que possível. Seu uso, entretanto, está limitado a cerca de 1200 °C, o que nos obriga a selecionar outros materiais para temperaturas superiores. Normalmente o S.P.A., para estas condições, é construído em Alumina.

Considerando que o coeficiente de dilatação térmica da Alumina é cerca de 15 vezes maior que o do Quartzo, podemos concluir que os erros introduzidos pela dilatação do S.P.A. serão significativamente maiores com a utilização do S.P.A. de Alumina. Vamos procurar, através de um exemplo, definir melhor as diferenças decorrentes da utilização de um S.P.A. em **Quartzo** e em **Alumina**.

Suponha um corpo de prova com dilatação térmica linear reversível entre 25 e 525°C igual a $80 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$.

Lembrando que o transdutor L.V.D.T. lê a diferença entre a dilatação do corpo de prova em ensaios e a dilatação do S.P.A., temos:

Exemplo:

$$\alpha_{25}^{525} = 80 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C} \quad (5)$$

S.P.A.	α S.P.A.	Valor lido L.V.D.T.
Quartzo	5,5	74,5
Alumina	75,0	5,0

Como vemos, o resultado obtido com o S.P.A. de Quartzo é composto pelo valor lido pelo transdutor (74,5) somado à correção matemática devido à dilatação do S.P.A. (5,5), ou seja, cerca de 93% do resultado é devido à leitura do transdutor e apenas 7% é devido à correção matemática.

Quando utilizamos um S.P.A. de Alumina os papéis se invertem e cerca de 93% do resultado obtido é devido à correção matemática relativa à dilatação do S.P.A. e apenas 7% devido à leitura do transdutor.

Graficamente nosso exemplo teria o aspecto mostrado nas Figs. 5 e 6.

Evidenciadas as grandes diferenças existentes entre Dilatômetros equipados com S.P.A. de Quartzo e Alumina, vamos abordar as implicações destas características na **calibração de Dilatômetros**.

Vamos analisar inicialmente como as condições de calibração do transdutor podem afetar o resultado final apresentado pelo Dilatômetro.

Imaginemos um transdutor com um erro de calibração de 10%, ou seja, o transdutor está indicando 10% a mais do que o valor real.

Qual o efeito deste erro na leitura do Dilatômetro para o S.P.A. de Quartzo?

Utilizando nosso exemplo ($\alpha = 80 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$), sabemos que o transdutor foi responsável pela leitura de 74,5 unidades; aplicando o erro de 10% teríamos uma leitura de 81,9 que somada à correção matemática (5,5) resultaria em 87,45.



Figura 5.

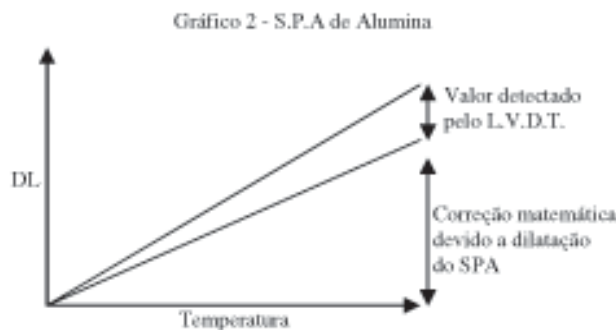


Figura 6.

Ou seja, um erro de +10 % na calibração do L.V.D.T. alteraria a leitura final de 80,0 para 87,45 com S.P.A. de Quartzo.

Já com S.P.A. de Alumina, onde o valor lido pelo L.V.D.T. corresponde a 5,0 unidades, o erro do transdutor levaria a leitura a 5,5 unidades, que, somadas aos 75,0, devido à correção matemática, resultaria em 80,5, ou seja, o resultado quase não é alterado, apesar de um erro de calibração de 10%, o que se considera um erro muito grande.

O mesmo raciocínio pode nos levar a concluir que a calibração de um Dilatômetro apenas pela atuação no ganho do transdutor (L.V.D.T.) é insuficiente, especialmente para S.P.A. de Alumina.

De fato, a tentativa de calibração de um Dilatômetro, apenas atuando no ganho do transdutor, pode inclusive levar a um resultado inverso ao desejado. Vejamos o exemplo:

Suponhamos que foi utilizado um padrão dilatométrico com dilatação térmica linear reversível entre 25 e 525 °C igual a $40,0 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ e que o resultado do ensaio obtido com este padrão foi $35 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$. Parece lógico que devemos aumentar o ganho do transdutor para que o mesmo, no lugar de 35,0, passe a indicar 40,0, ou seja, vamos corrigir o transdutor em 14%, uma vez que $35,0 + 14\%$ daria os 40,0 desejados.

Considerando um S.P.A. em Alumina, vamos analisar melhor nosso exemplo e os efeitos de nossa ação corretiva.

- Valor teórico $40,0 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$
- Valor prático $35,0 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$

Analisando o resultado prático (S.P.A. Alumina).

Valor indicado	Valor da correção matemática	Valor detectado (L.V.D.T.)
35,0	75,0	$35 - 75 = -40$

Resultado de nossa ação sobre o L.V.D.T (+14%) ou $(-40) + 14\% = -45,6$

Valor indicado após a correção:

Valor detectado (L.V.D.T corrigido)	Valor da correção matemática	Valor indicado (L.V.D.T.)
-45,6	75,0	29,4

Ora, nós tínhamos um resultado igual a 35,0 (valor baixo em relação ao valor teórico do padrão "40,0"); corrigimos o transdutor aumentando seu ganho, e o resultado decorrente afastou ainda mais o resultado prático do teórico: ficamos com 29,4. Isto sempre vai acontecer quando a dilatação térmica de referência for menor que a dilatação do material de que é feito o S.P.A.

Para o S.P.A. em Quartzo o resultado seria bem diferente.

Analisando o resultado prático (S.P.A. Quartzo).

Valor indicado	Valor da correção matemática	Valor detectado (L.V.D.T)
35,0	5,5	35 - 5,5 = 29,5

Resultado de nossa ação sobre o L.V.D.T (+14%) ou 29,5 + 14% = **33,6**.

Valor indicado após a correção:

Valor detectado (L.V.D.T corrigido)	Valor da correção matemática	Valor indicado (L.V.D.T.)
33,6	5,5	39,10

Ou seja, nossa ação corretiva foi eficiente em quase 100% de nosso objetivo.

Fica claro que a calibração de Dilatômetros, especialmente os equipados com S.P.A de Alumina, é um assunto mais complexo do que pode parecer à primeira vista.

O método mais comum, indicado por fabricantes de Dilatômetros para equipamentos com S.P.A. de Alumina, consiste em realizar um ensaio utilizando um padrão com curva dilatométrica conhecida, e as diferenças encontradas entre os resultados prático e teórico devem ser somadas à curva de compensação existente.

Naturalmente, este método pressupõe que o transdutor está perfeitamente aferido, o que nem sempre é verdade.

Nossa maneira de encarar a calibração de um Dilatômetro leva em conta que existem duas incógnitas que precisam ser trabalhadas. A primeira se refere ao ganho do transdutor e a segunda à compensação da dilatação do S.P.A.

A correção do ganho do transdutor pode ser imaginada como uma constante de **multiplicação** e a compensação do S.P.A. como uma curva que será **somada** à leitura do transdutor.

Matematicamente temos:

Valor apresentado = (L.V.D.T.) **K** + correção do S.P.A

Onde **K** é a constante que corrige o ganho do transdutor.

Com base no raciocínio exposto foi desenvolvido o método **BP ENGENHARIA** para calibração de Dilatômetros, que consiste em isolar cada um dos fatores que afetam a calibração e proceder às correções necessárias em cada um destes fatores sem a interferência dos demais.

4. Método BP Engenharia para Calibração de Dilatômetros

Realizamos um ensaio utilizando um padrão de Platina ou outro padrão com dilatação superior à dilatação do S.P.A. de Alumina.

O padrão de Platina é ideal, pois pode ser conseguido com pureza muito elevada, e também porque possui uma dilatação muito linear e muito bem estudada, sendo facilmente equacionada.

Realizamos um segundo ensaio utilizando um padrão de Quartzo, ou outro padrão com dilatação o mais baixa possível. O padrão de Quartzo oferece as mesmas vantagens mencionadas para o padrão de Platina.

Não vamos nos preocupar com os resultados isolados obtidos, pois sabemos que estes podem conter dois erros: o primeiro devido ao ganho do transdutor e o segundo devido à compensação da dilatação do S.P.A.

Vamos nos preocupar com a **diferença de dilatação entre estes dois padrões**, uma vez que este procedimento elimina uma das incógnitas (a compensação da dilatação do S.P.A.).

Vejam, por exemplo, um ponto da curva dilatométrica de dois ensaios realizados com os padrões mencionados:

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Platina} = 96 \times 10^{-7} = \text{Valor determinado pelo L.V.D.T.} + \text{correção matemática} \quad (6)$$

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Quartzo} = 5,5 \times 10^{-7} = \text{Valor determinado pelo L.V.D.T.} + \text{correção matemática} \quad (7)$$

4.1. Trabalhando com a diferença de dilatação entre os padrões:

$$(\alpha_{25}^{525} \text{ Platina} = 96 \times 10^{-7}) - (\alpha_{25}^{525} \text{ Quartzo} = 5,5 \times 10^{-7}) = \mathbf{90,5} \quad (8)$$

Qualquer que seja o valor da correção matemática o resultado da diferença será sempre o mesmo, uma vez que a correção, sendo comum aos dois resultados, se anula, e o que temos é exatamente a diferença entre os valores detectados pelo transdutor em cada ensaio.

Detalhando melhor este raciocínio:

Padrão	α_{25}^{525} Padrão	Valor detectado pelo L.V.D.T	Valor da correção matemática
Platina	96,0	21,0	75,0
Quartzo	5,5	- 69,5	75,0

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Platina} = 96,0 \times 10^{-7} = 21,0 + 75,0 \quad (9)$$

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Quartzo} = 5,5 \times 10^{-7} = (- 69,5) + 75,0 \quad (10)$$

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Platina} - \alpha_{25}^{525} \text{ Quartzo} = (21,0 + 75,0) - ((- 69,5) + 75,0) = \mathbf{90,5} \quad (11)$$

Tanto faz a diferença entre os valores apresentados **96,0 - 5,5 = 90,5** como a diferença entre os valores efetivamente detectados pelo transdutor: **21,0 - (- 69,5) = 90,5**. Os resultados são idênticos.

Quando trabalhamos com a diferença de dilatação entre dois padrões estamos apenas considerando os valores de dilatação relativos, sem preocupação com a correção matemática que vai ser estudada em seqüência.

Vamos imaginar um Dilatômetro com o transdutor descalibrado que apresentasse o seguinte resultado:

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Platina} = 98,1 \times 10^{-7} = (23,1 + 75,0) \quad (12)$$

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Quartzo} = -1,45 \times 10^{-7} = (-76,45 + 75,0) \quad (13)$$

Sabemos que a leitura do L.V.D.T. está afetada por um erro comum aos dois ensaios, o qual corresponde ao erro de calibração do transdutor (L.V.D.T.).

A diferença entre eles seria: **98,10 - (-1,45) = 99,55**

Sabemos que o valor correto, considerando os valores teóricos dos padrões, seria **90,5** (conforme nosso exemplo).

Logo, a correção do transdutor L.V.D.T. seria um fator que, multiplicado ao valor encontrado, daria o valor desejado: **99,55 K = 90,5** onde **K = 0,909**.

Vamos analisar o efeito desta correção atuando no valor obtido na prática pelo L.V.D.T.

$$a) \text{ Platina L.V.D.T. } \times K = 23,10 \times 0,909 = 21,0$$

$$b) \text{ Quartzo L.V.D.T. } \times K = -76,45 \times 0,909 = 69,5$$

$$\alpha_{25}^{525} \text{ Platina} - \alpha_{25}^{525} \text{ Quartzo} = 21,0 - (-69,5) = \mathbf{90,5} \quad (14)$$

O exemplo comprova a validade do método, uma vez que os valores corretos são recompostos.

Concluímos que a calibração do L.V.D.T. com base em padrões só pode ser realizada corretamente quando utilizamos, não um padrão, mas a diferença entre dois padrões, para assim estarmos isolando apenas os valores detectados pelo L.V.D.T.

Na prática o *Soft* que realiza esta calibração analisa todos os pontos das curvas e encontra um fator médio que irá corrigir o ganho do L.V.D.T.

Completando o procedimento de calibração, o *Soft* simula a correção dos ensaios, aplicando o fator de correção encontrado. Em seguida, são determinadas as diferenças entre os valores teóricos e práticos (corrigidos) encontrados tanto para a Platina como para o Quartzo. Como essas diferenças representam o desvio entre a curva de compensação do S.P.A. utilizada nos ensaios com os padrões e a curva de compensação ideal, elas devem apresentar valores muitos próximos, tantos para a Platina como para o

Quartzo. Caso os valores encontrados sejam muito diferentes, fica evidente que ocorreu uma falha no processo de calibração, e os ensaios devem ser cuidadosamente repetidos. Caso os valores encontrados se aproximem, a correção média encontrada para os padrões de Platina e Quartzo somada à curva atual representa a nova curva de compensação da dilatação do S.P.A.

Em resumo, o presente método inicialmente elimina a compensação do S.P.A. e corrige o fator que ajusta o ganho do L.V.D.T. Em um segundo passo, após a correção, o *Soft* analisa os desvios relativos à compensação da dilatação do S.P.A. e calcula uma nova curva de compensação.

5. Conclusão

Dilatômetros diferenciais, sempre que operando até 1200 °C, serão mais sensíveis e precisos se equipados com S.P.A. de Quartzo.

Qualquer Dilatômetro, originalmente equipado com S.P.A. de Alumina, pode também operar com S.P.A. de Quartzo; normalmente, a substituição é muito simples, e um mesmo Dilatômetro pode reunir a sensibilidade e precisão característica do S.P.A. de Quartzo e a versatilidade de atender a ensaios especiais a temperaturas mais elevadas.

Os Dilatômetros equipados com S.P.A. de Quartzo podem ser calibrados com a utilização de apenas um padrão, já que as interferências devido à dilatação do S.P.A. são muito pequenas. A utilização de um padrão de Platina ou Alumina é suficiente para a calibração destes equipamentos.

Para Dilatômetros com S.P.A. de Alumina, é fundamental a utilização de dois padrões, conforme procedimento descrito.

Outros itens que afetam a calibração de um Dilatômetro, independente da natureza do S.P.A., são:

- Compensação da temperatura ambiente;
- Linearização da temperatura em função de padrões com acidentes térmicos conhecidos;
- Calibração do termopar;
- Calibração do transdutor de variação dimensional (L.V.D.T.);
- Compensação das interferências devido à dilatação do S.P.A.