

onde $\text{Re}(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência i , $\text{Re}(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância da medição de teste em uma frequência i , n é o número total de pontos frequenciais usados na comparação, $\text{Re}(\overline{Z_1})$ e $\text{Re}(\overline{Z_2})$ são as médias das medições para as duas condições analisadas; $S_{Z_{1,i}}$ e $S_{Z_{2,i}}$ são os desvios-padrão para cada ponto frequencial das medições, para as duas condições.

Caso a impedância de teste Z_2 seja proveniente de um estado saudável Z_1 , porém defasada por n pontos de dados, então seu coeficiente de correlação atingirá um valor máximo quando Z_2 for deslocada de n pontos. Quando a impedância da medição de teste é deslocada de n pontos, os dois padrões de assinatura deveriam coincidir, exceto pela porção resultante de um dano estrutural caso exista. O valor do número de pontos n que estão defasados, juntamente com a resolução em frequência da medição, fornecem o deslocamento horizontal Δf . Assim, esta técnica busca encontrar o parâmetro Δf na Eq. 3.3:

$$\text{Re}(Z_{\text{corr},i}) = \text{Re}(Z_{\text{medida},i \pm \Delta f}) \quad (3.3)$$

onde $\text{Re}(Z_{\text{corr},i})$ é a parte real da impedância corrigida em uma frequência i , $\text{Re}(Z_{\text{medida},i \pm \Delta f})$ é a parte real da impedância medida defasada pelo parâmetro Δf . O deslocamento será para a direita caso a temperatura da medição de teste seja maior do que a temperatura da medição do sinal original (*baseline*); caso contrário o deslocamento será para a esquerda.

Finalmente, a métrica de dano é calculada com a assinatura de impedância corrigida. Assim, valores ótimos de Δ_v e Δf que minimizam o efeito da temperatura podem ser obtidos. O propósito desta seção é demonstrar que o procedimento de compensação da temperatura propostos por Park *et al.*, (1999) e Koo *et al.*, (2009) podem ser extrapolados para uma ampla faixa de temperatura. O método de deslocamento em frequência é demonstrado usando dados coletados na câmara climática e explicado usando a técnica de otimização proposta por Koo *et al.*, (2009).

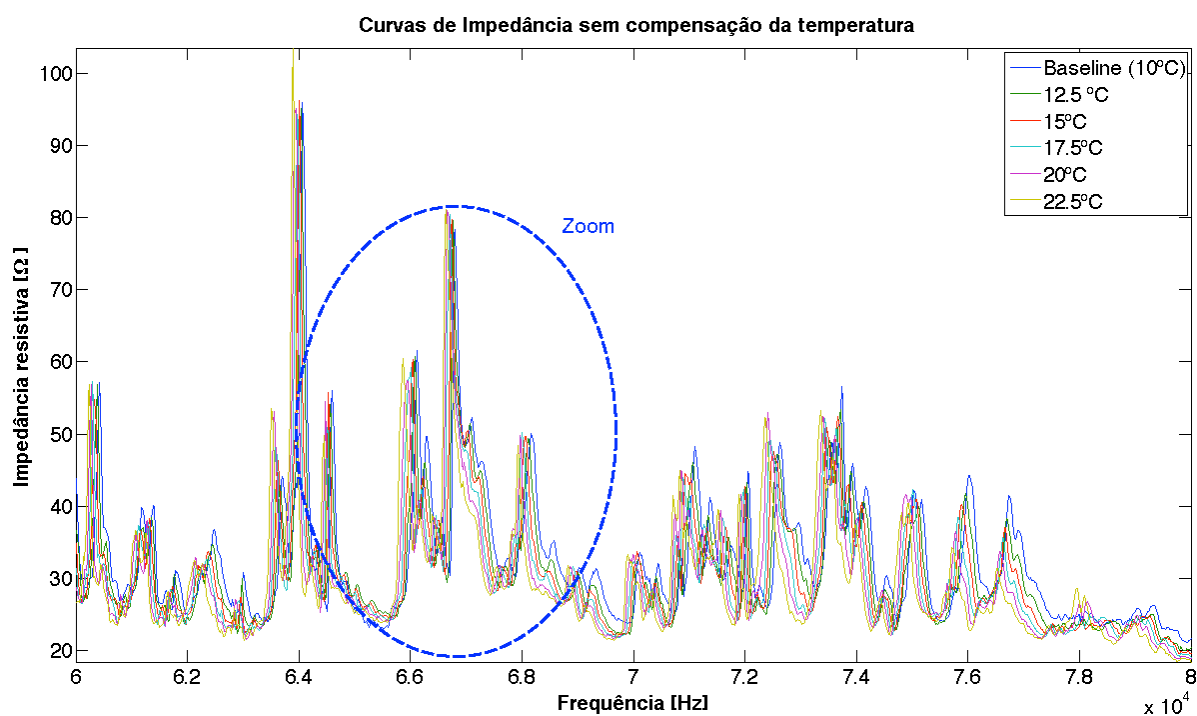
Esta técnica de compensação da temperatura pode ser assim resumida na forma de diretrizes:

- ✓ Adquirir a FRF da impedância do *baseline* e salvar a temperatura de medição;
- ✓ Adquirir medições de impedância e de temperatura da estrutura monitorada;
- ✓ Calcular o gradiente de temperatura;

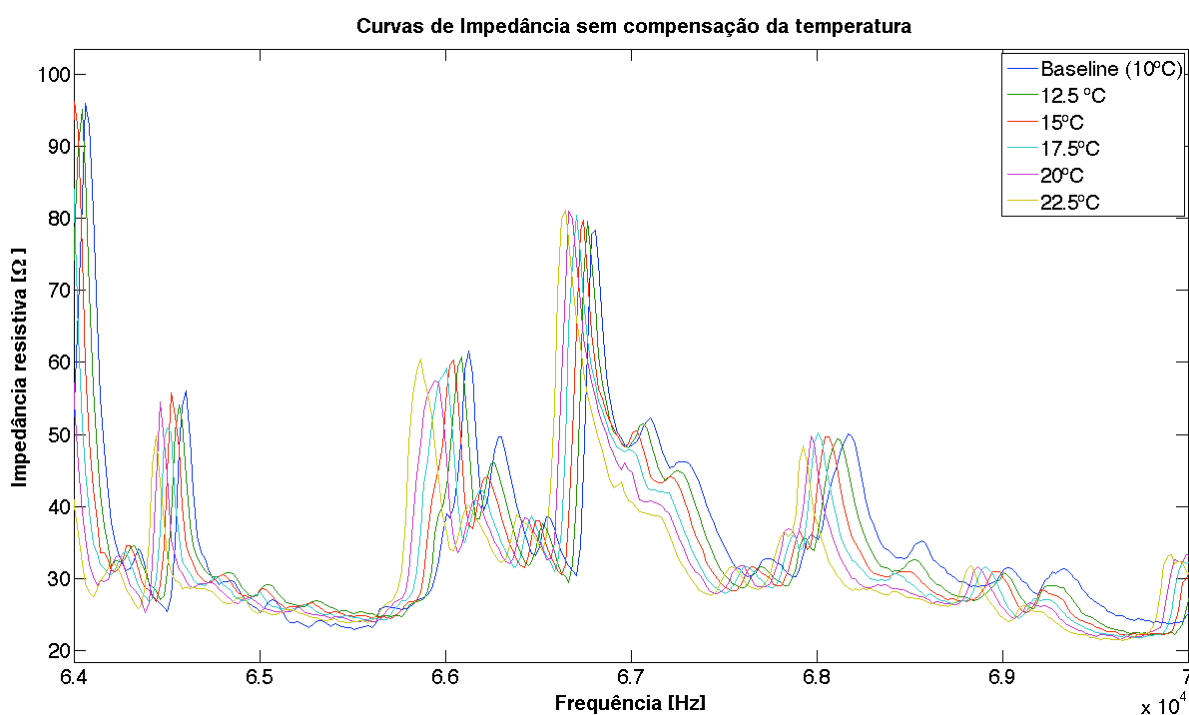
- ✓ Determinar o parâmetro de deslocamento ótimo ao longo da frequência;
- ✓ Aplicar a correção horizontal e vertical da impedância medida com relação ao *baseline*;
- ✓ Utilização do modelo estatístico e métricas de dano para determinar o diagnóstico de integridade da estrutura monitorada.

Se estes deslocamentos devido à temperatura puderem ser calculados a partir das medições, então, quando uma medição de impedância for adquirida após o surgimento de um dano estrutural, espera-se que ocorra uma diferença significativa da métrica de dano entre as condições sem dano e com dano nesta temperatura específica, mesmo após a aplicação da técnica de compensação.

As Figuras 3.10 3.11 mostram o resultado do caso da aplicação desta técnica de compensação da temperatura aplicada à viga de alumínio da Figura 3.5. Neste caso, optou-se por uma faixa de frequência de 60 a 80 kHz.

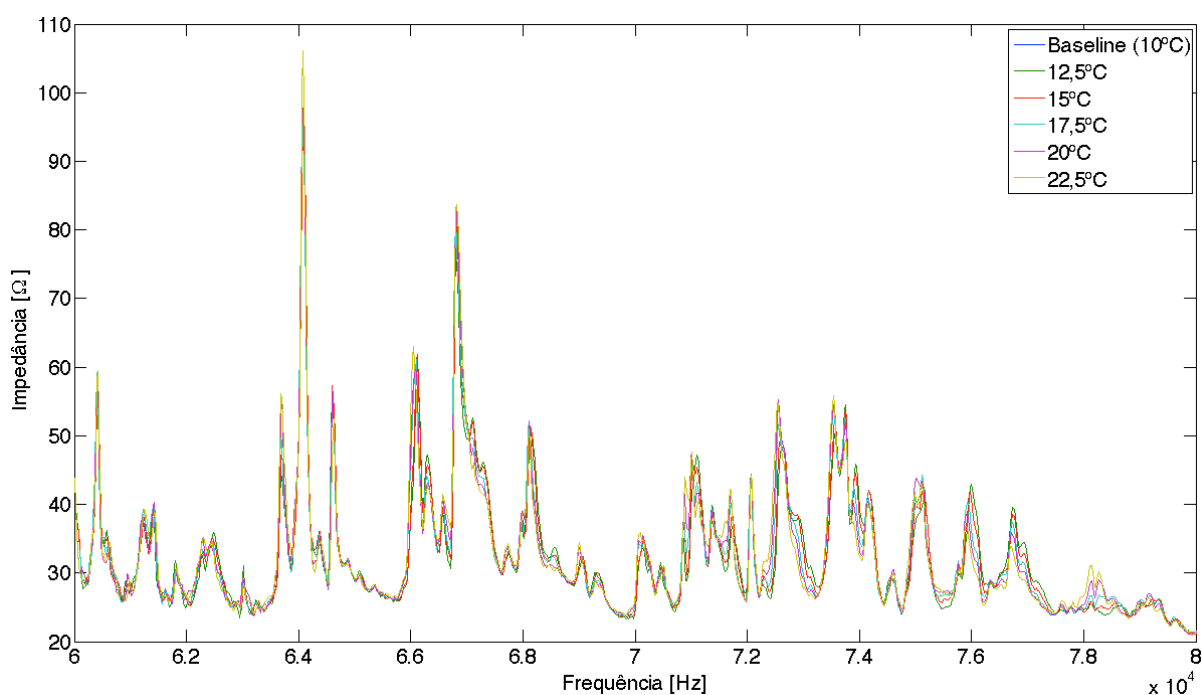


(a)

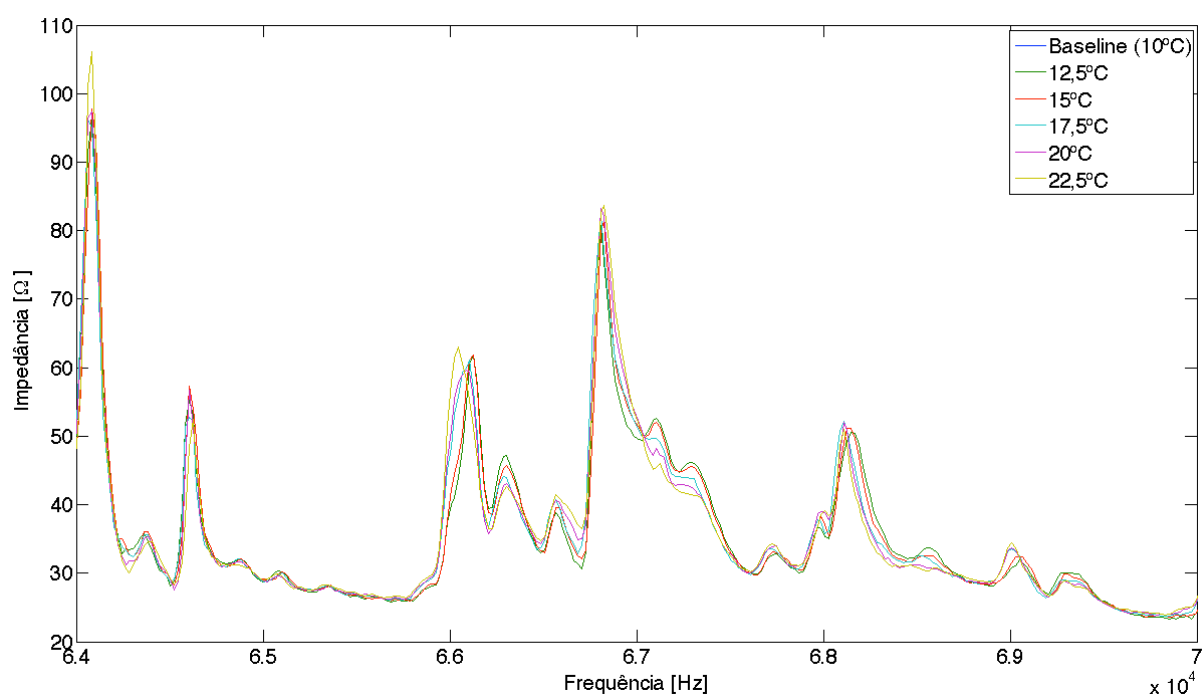


(b)

Figura 3.10 – Curvas de impedância sem compensação da Temperatura. (a) – Faixa de frequência de 60 a 80 kHz; (b) – Zoom na região de 64 a 70 kHz.



(a)



(b)

Figura 3.11 – Curvas de impedância após compensação da Temperatura. (a) – Faixa de frequência de 60 a 80 kHz; (b) – Zoom na região de 64 a 70 kHz.

A curva de impedância na temperatura de 10°C foi tomada como referência (*baseline*). Como pode ser observado, a técnica fornece uma boa aproximação das curvas

de impedância quando medidas em diferentes temperaturas, quando comparadas com a Figura 3.10. A Figura 3.12 ilustra as métricas CCD obtidas para este caso:

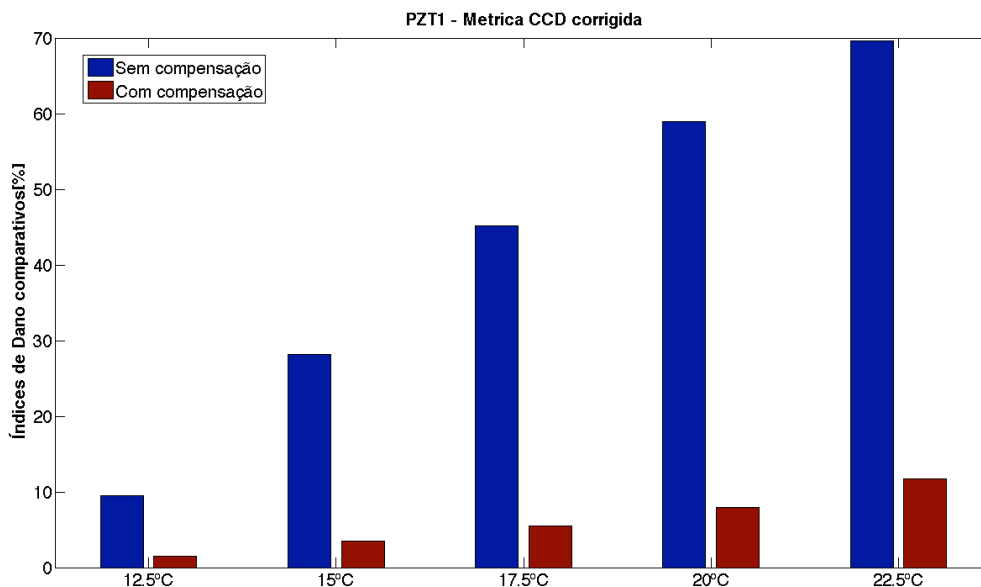


Figura 3.12 – Índices de dano CCD sem e com compensação para o caso em tela.

Como se pode observar, a técnica de compensação da temperatura reduz significativamente as métricas de dano, porém à medida que o gradiente de temperatura entre o *baseline* e a medição propriamente dita é maior, a compensação torna-se menos eficiente. A Tabela 3.2 mostra a redução percentual das métricas de dano conforme o gradiente de temperatura, para o ensaio da viga de alumínio.

Tabela 3.2 – Redução percentual das métricas de dano conforme o gradiente de temperatura para o ensaio da Viga de Al.

	CCD s/ compensação	CCD c/ compensação	Redução percentual
$\Delta T = 2.5^{\circ}C$	9,5	1,47	84,52%
$\Delta T = 5^{\circ}C$	28,1	3,53	87,43%
$\Delta T = 7.5^{\circ}C$	45,2	5,49	87,85%
$\Delta T = 10^{\circ}C$	59	7,98	86,47%
$\Delta T = 12.5^{\circ}C$	69,6	11,7	83,19%

Pode-se concluir a partir dos dados que a técnica reduziu significativamente as métricas de dano, para as condições consideradas no teste.

Para entender o processo de otimização realizado na busca do parâmetro ótimo de deslocamento em frequência, a Figura 3.13 ilustra o caso da medição na temperatura de

22,5°C, onde um deslocamento de 9 pontos para a direita fornece um coeficiente de correlação ótimo (máximo) de 88,28%.

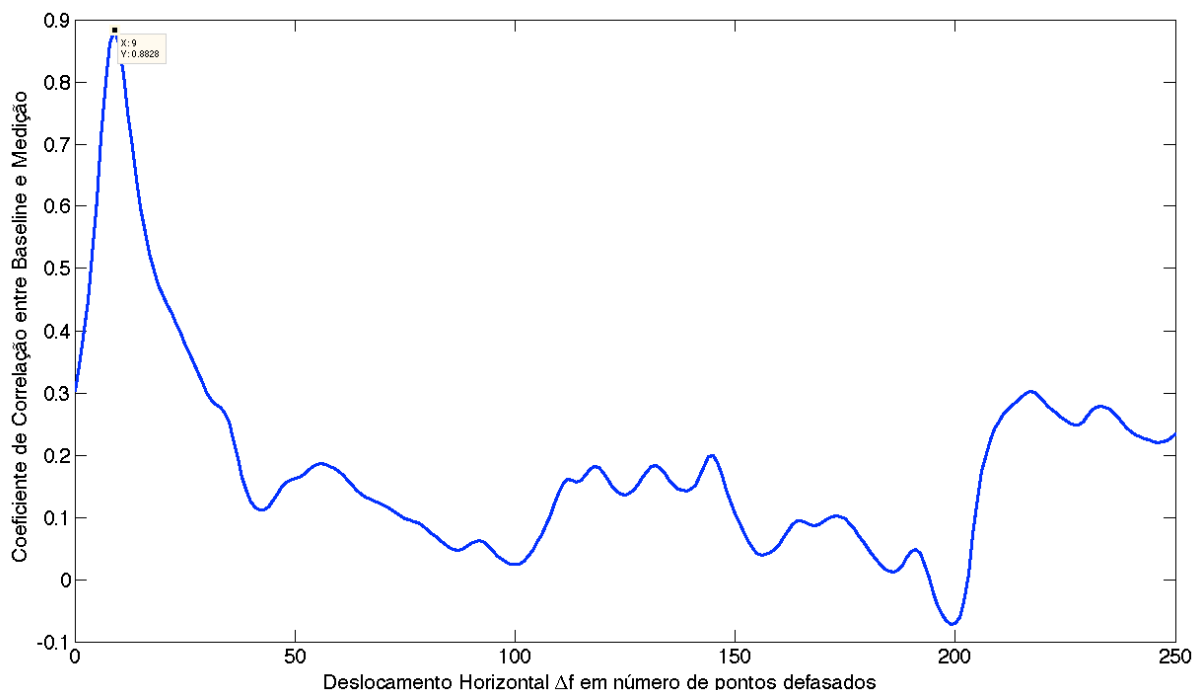


Figura 3.13 – Busca do parâmetro ótimo de deslocamento em frequência.

A seguir, com o objetivo de aplicar a técnica de compensação numa faixa mais ampla de temperatura, um segundo ensaio foi realizado, utilizando agora uma placa retangular de alumínio de dimensões 305 x 304 x 3 mm, com um transdutor de PZT em sua região central. A placa foi posicionada dentro da câmara climática conforme ilustrado na Figura 3.14. Como se pode observar, as medidas foram feitas com a estrutura numa condição livre-livre, embora a estrutura estivesse sujeita ao fluxo de ar da câmara provocando movimentações na estrutura, várias medidas consecutivas indicaram boa repetitividade das curvas de impedância obtidas. Mesmo assim, para cada ponto de medição, fez-se a média de 5 medições consecutivas. A faixa de temperatura analisada foi de -30°C (baseline) a +55°C, em incrementos de 5°C. A faixa de frequência escolhida foi de 60 a 70kHz, com 600 pontos de medição.



Figura 3.14 – Placa retangular de Alumínio posicionada na Câmara Climática.

A Figura 3.15 mostra as assinaturas de impedância obtidas em cada temperatura:

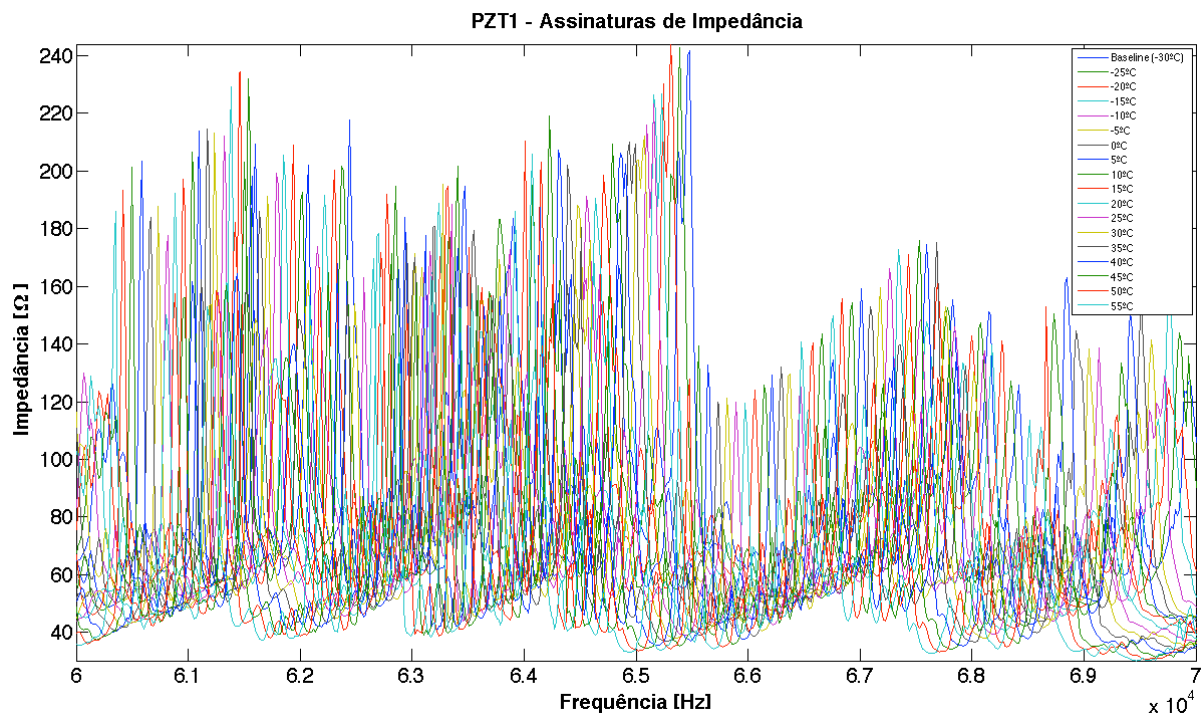


Figura 3.15 – Assinaturas de impedância da placa retangular sem compensação de temperatura.

A Figura 3.16 mostra as assinaturas de impedância com a técnica de compensação de temperatura aplicada:

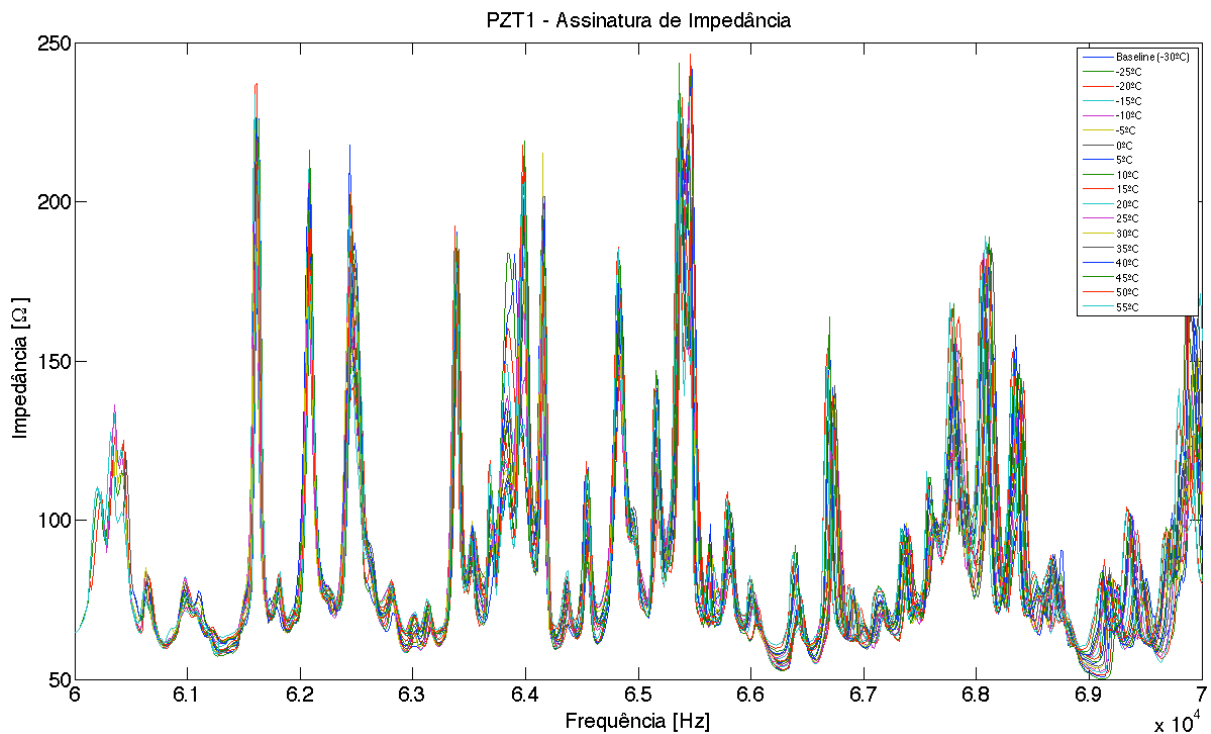


Figura 3.16 – Assinaturas de impedância da placa retangular com compensação de temperatura.

De modo similar ao que foi constatado na viga de alumínio, a técnica forneceu uma boa aproximação das curvas de impedância de outras temperaturas com a curva original *baseline*. A Figura 3.17 ilustra a métrica CCD obtida para este caso:

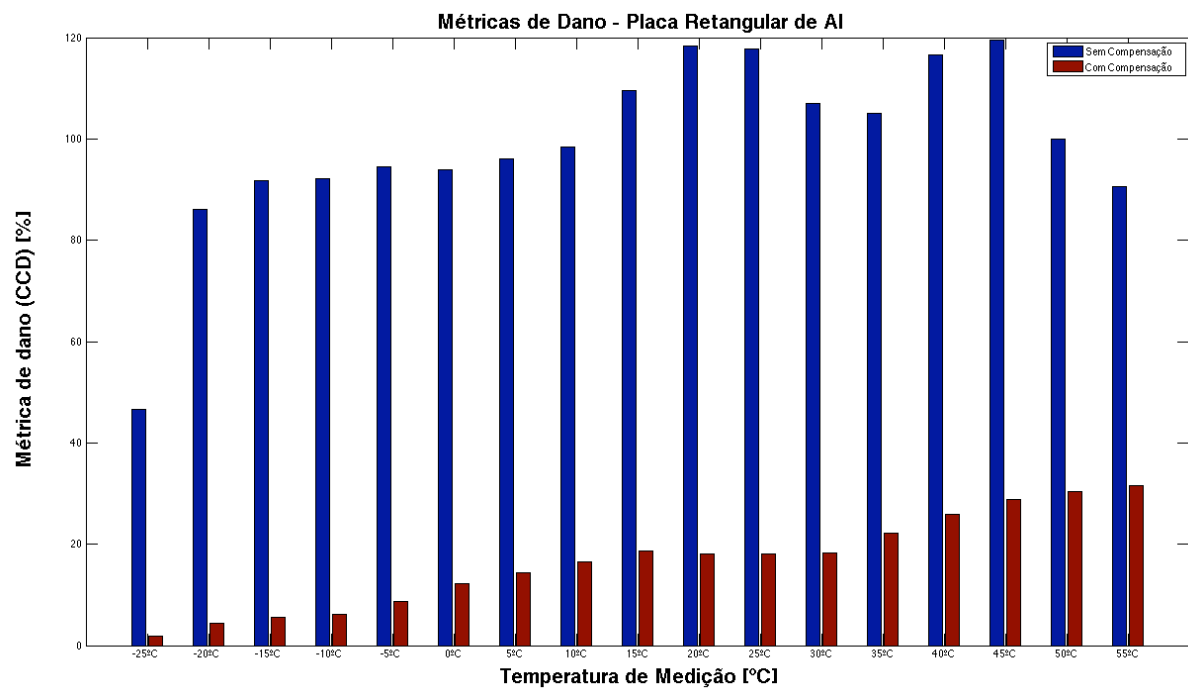


Figura 3.17 – Comparação de métricas de dano entre casos sem compensação e com compensação, em função da temperatura de medição – Placa Retangular de Alumínio.

A Tabela 3.3 mostra a redução percentual das métricas de dano conforme o gradiente de temperatura, para o ensaio da placa retangular.

Tabela 3.3 – Valores de reduções percentuais das métricas de dano conforme o gradiente de temperatura para o ensaio da Placa de Al.

	CCD s/ compensação	CCD c/ compensação	Redução percentual
$\Delta T = 5^{\circ}C$	46,7	1,94	95,85%
$\Delta T = 10^{\circ}C$	86,1	4,33	94,97%
$\Delta T = 15^{\circ}C$	91,8	5,53	93,98%
$\Delta T = 20^{\circ}C$	92,2	6,07	93,42%
$\Delta T = 25^{\circ}C$	94,4	8,76	90,72%
$\Delta T = 30^{\circ}C$	93,9	12,2	87,01%
$\Delta T = 35^{\circ}C$	96	14,4	85,00%
$\Delta T = 40^{\circ}C$	98,4	16,5	83,23%
$\Delta T = 45^{\circ}C$	110	18,6	83,09%
$\Delta T = 50^{\circ}C$	118	18,1	84,66%
$\Delta T = 55^{\circ}C$	118	18,1	84,66%
$\Delta T = 60^{\circ}C$	107	18,3	82,90%
$\Delta T = 65^{\circ}C$	105	22,1	78,95%
$\Delta T = 70^{\circ}C$	116	25,8	77,76%
$\Delta T = 75^{\circ}C$	119	28,8	75,80%
$\Delta T = 80^{\circ}C$	99,9	30,3	69,67%
$\Delta T = 85^{\circ}C$	90,6	31,6	65,12%

Observando as métricas da Figura 3.17 e Tabela 3.3, a técnica da compensação da temperatura também mostra-se aplicável em uma ampla faixa de temperatura, porém sua eficácia é reduzida significativamente à medida que o gradiente de temperatura torna-se maior.

Assim, conclui-se que a grande vantagem da técnica de compensação da temperatura utilizando o deslocamento em frequência por análise de correlação é que, primeiramente, a técnica requer apenas um *baseline*, sem a necessidade de uma

quantidade extensa de dados para treinamento do sistema de diagnóstico. Em segundo lugar, pode-se dizer que a técnica tem aplicação em uma ampla faixa de temperatura; no entanto, isto só pode ser aplicável levando em consideração o nível de dano que se pretende detectar no sistema de monitoramento. Somente assim pode-se estabelecer qual seria a faixa de temperatura de operação em que o sistema é capaz de distinguir efeitos da temperatura de danos estruturais reais, de modo que um valor limiar (*threshold*) possa ser definido, garantindo que o sistema seja capaz de realizar um diagnóstico da integridade estrutural confiável.

Neste ponto, é importante salientar que, em estruturas complexas, existem outros fatores a serem considerados, tais como tensões térmicas induzidas, efeitos de condições de contorno e campo de distribuição de temperatura, que são fatores de influência significativa no monitoramento. Assim, a compensação da temperatura em estruturas complexas pode ser mais complicada do que nos casos mostrados acima.

Deste modo, torna-se importante a avaliação da aplicação da técnica em estruturas complexas, além das vigas e placas estudadas neste capítulo, bem como a avaliação de outros parâmetros importantes, a saber: a introdução de um dano estrutural e a capacidade do sistema de SHM em distinguir a presença deste dano da influência de condições externas, como a temperatura. Além disto, nota-se que esta técnica também depende da largura de banda utilizada na medição, isto é, à medida que a faixa de frequência de monitoramento se estende, a compensação da temperatura torna-se menos eficaz.

Neste sentido, o capítulo 4 a seguir apresenta investigações destes parâmetros no método de SHM baseado na impedância eletromecânica, bem como propõe soluções alternativas para se obter uma melhoria na robustez da técnica quanto à influência dos fatores externos, através de estudos de caso.

CAPÍTULO IV

DISTINÇÃO ENTRE DANOS ESTRUTURAIS E EFEITO DA TEMPERATURA PARA O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

4.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é de investigar e obter um melhor entendimento de questões práticas que aparecem no monitoramento da integridade de uma estrutura quando esta é sujeita a variações em suas condições externas, tais como a temperatura e as condições de contorno. Através da técnica de compensação de temperatura descrita anteriormente, e que foi incorporada ao sistema de detecção de danos, estudos de caso são mostrados com diferentes estruturas para fins de validação. Neste sentido, foram estudadas uma viga de alumínio e um componente de fuselagem rebitada de aeronave.

Através dos estudos de caso apresentados neste capítulo, deseja-se avaliar a eficiência da técnica de compensação de temperatura em estruturas complexas quanto aos seguintes parâmetros: variações de temperatura, largura da faixa de monitoramento, condições de contorno e valores de índices de dano obtidos para o diagnóstico da integridade estrutural.

4.2. Avaliação da largura de banda na faixa de monitoramento em uma viga de alumínio

Como foi comentado no capítulo anterior, observou-se que a largura da faixa de monitoramento é um fator de influência na eficácia da técnica de compensação do efeito da

temperatura por análise de correlação. Com o intuito de investigar este efeito, um experimento foi planejado, avaliando-se três faixas de monitoramento distintas, bem como larguras de banda diferentes. Uma viga de alumínio com um parafuso localizado em uma de suas extremidades foi utilizada no ensaio, conforme se vê na Figura 4.1. O parafuso está localizado a 8,2 cm do centro da pastilha de PZT.



Figura 4.1 - Montagem experimental de viga de alumínio parafusada.

Para selecionar as faixas de monitoramento deste estudo, foram realizadas inicialmente medições numa ampla faixa de monitoramento (FM0), de 20 kHz a 200 kHz. A viga foi então ensaiada com controle de temperatura nas faixas de 0°C a 50°C, com incrementos de 10°C, de modo a identificar três faixas de frequência de monitoramento. A curva de referência, *baseline*, selecionada foi na temperatura de 0°C. Optou-se pelas seguintes larguras de banda para cada faixa de monitoramento: BW1=15 kHz, BW2 = 35 KHz e BW3 = 70 kHz. A Figura 4.2 a seguir ilustra as três faixas de monitoramento para a largura de banda BW1=15 kHz, com os casos sem dano em cada temperatura.

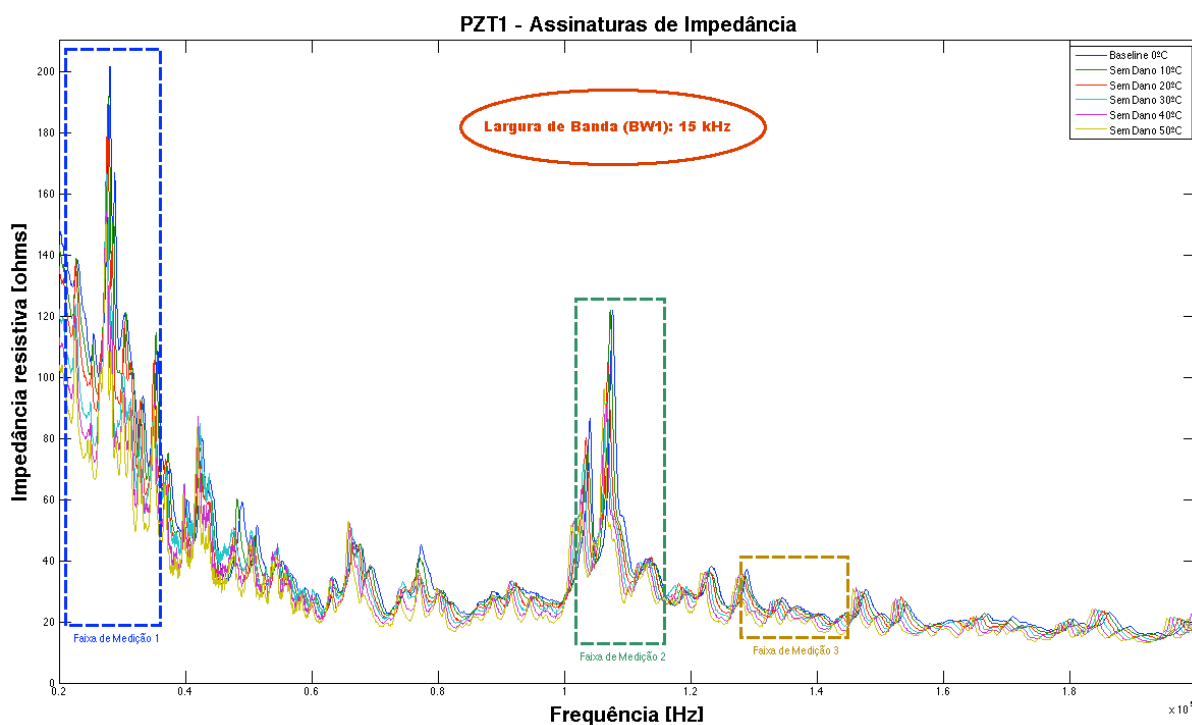


Figura 4.2 - Faixas de medição com Largura de Banda BW1.

Desta forma, as medições foram realizadas com as três faixas de monitoramento (FM) selecionadas, subdividindo-as em três larguras de banda (BW), conforme descrito pela Tabela 4.1. Todas as medições foram feitas com 5000 pontos.

Tabela 4.1 – Avaliação da largura de banda na faixa de monitoramento da integridade estrutural – viga de Al parafusada.

	Largura de Banda (BW1)	Largura de Banda (BW2)	Largura de Banda (BW3)
FM 0	20 kHz – 200 kHz	-	-
FM 1	21 kHz – 36 kHz	21 kHz – 56 kHz	21 kHz – 91 kHz
FM 2	101 kHz – 116 kHz	101 kHz – 136 kHz	101 kHz – 171 kHz
FM 3	130 kHz – 145 kHz	130 kHz – 165 kHz	130 kHz – 200 kHz

A análise dos deslocamentos das curvas de impedância causados pela temperatura, vistos na Figura 4.2, pode ser expandida através de larguras de banda mais estreitas. As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram a parte real das impedâncias contendo os picos de ressonância, respectivamente, de 28,03 kHz, 104,1 kHz e 180,9 kHz.

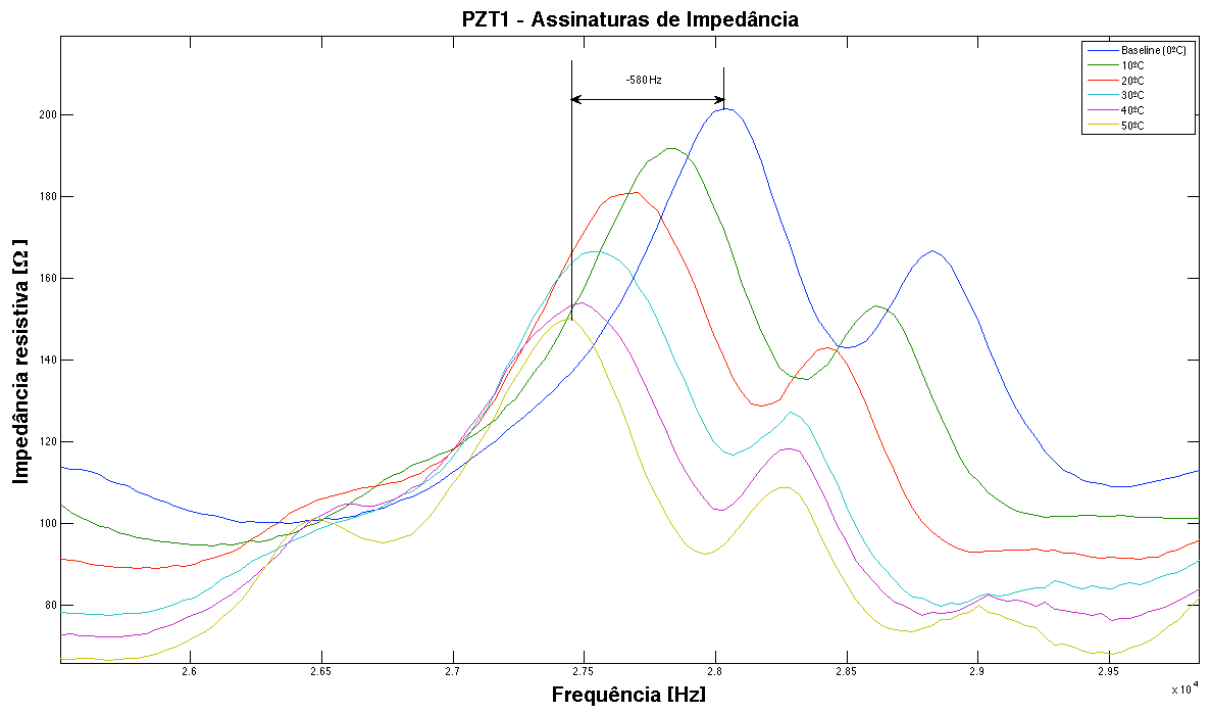


Figura 4.3 - Deslocamentos frequenciais em torno do pico de ressonância de 28,03 kHz.

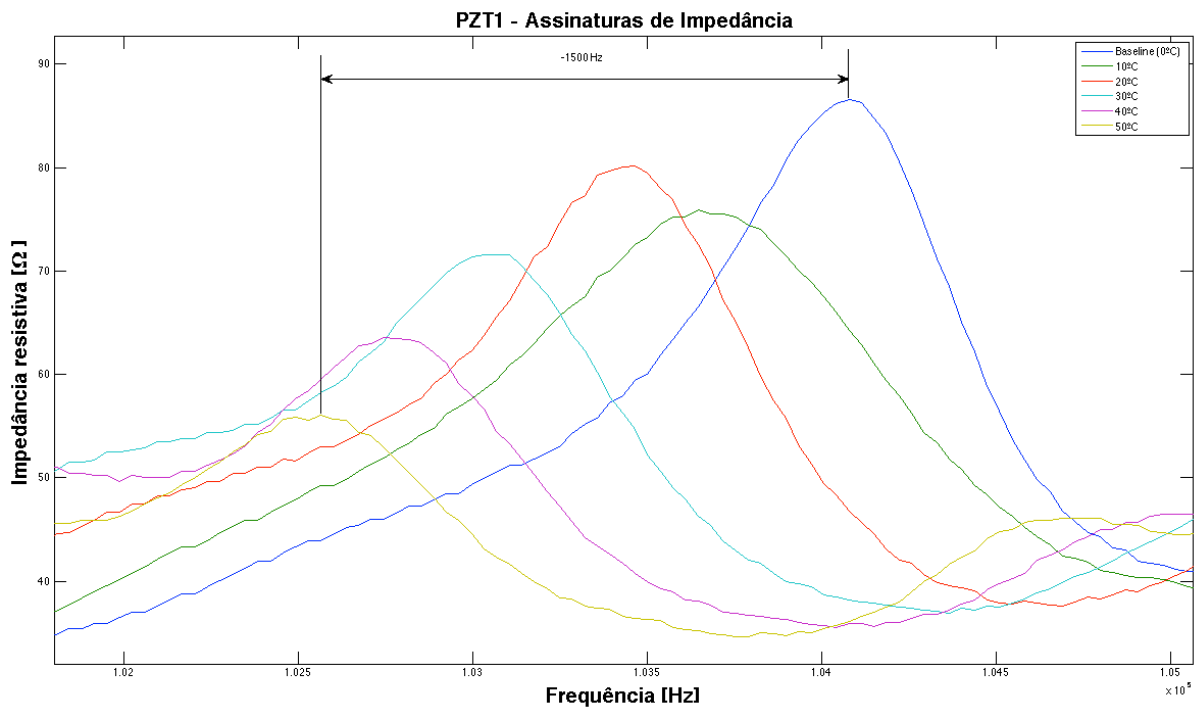


Figura 4.4 - Deslocamentos frequenciais em torno do pico de ressonância de 104,1 kHz.

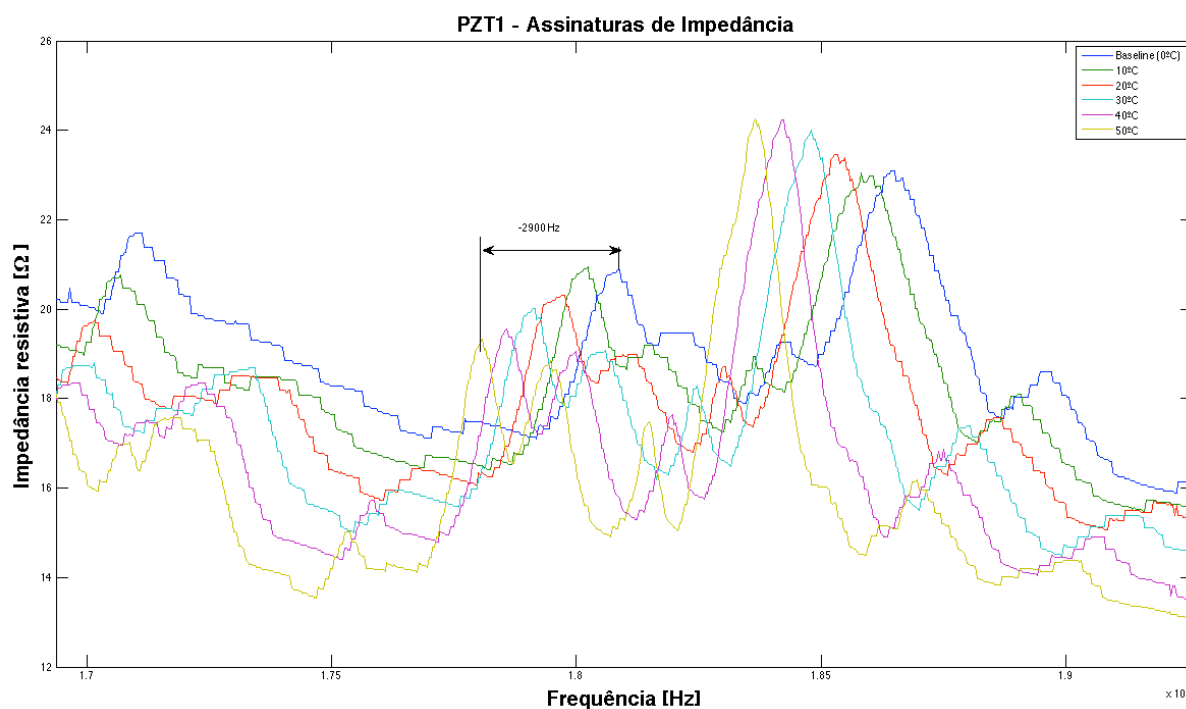


Figura 4.5 - Deslocamentos frequenciais em torno do pico de ressonância de 180,9 kHz.

Como se pode observar através das Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, à medida que a frequência se torna mais alta, de uma forma geral, maior é o deslocamento em frequência causado pela mesma variação de temperatura. A Tabela 4.2 sumariza os deslocamentos frequenciais em função da variação da temperatura, para cada pico de ressonância.

Tabela 4.2 – Deslocamentos frequenciais em torno de três picos de ressonância em função do gradiente de temperatura.

Deslocamentos frequenciais [Hz]					
	Variação da Temperatura				
Pico em 0°C [kHz]	$\Delta T = 10^{\circ}C$	$\Delta T = 20^{\circ}C$	$\Delta T = 30^{\circ}C$	$\Delta T = 40^{\circ}C$	$\Delta T = 50^{\circ}C$
28.03	-220	-380	-520	-570	-580
104.1	-400	-700	-1100	-1300	-1500
180.9	-700	-1400	-1800	-2400	-2900

Estes resultados mostram que há uma tendência de que, à medida que a frequência se torna mais alta, maior será o deslocamento horizontal dos picos de ressonância. Portanto, os deslocamentos em frequência dependem não apenas da temperatura, mas

também da frequência de análise. A seguir, uma análise da técnica de compensação da temperatura considerando a faixa de monitoramento é apresentada.

4.2.1. Compensação de efeitos da Temperatura

Embora a técnica de compensação de temperatura baseada no deslocamento efetivo ao longo da frequência por análise de correlação tenha sido largamente usada em vários estudos de caso, observa-se que a técnica apresenta resultados satisfatórios apenas se larguras de banda estreitas são usadas para se calcular o coeficiente de correlação para determinar o parâmetro ótimo de deslocamento em frequência (Eq. (3.2)). Esta limitação se deve ao fato de que o deslocamento em frequência não é constante ao longo de toda faixa considerada; ao invés disso este é aumentado com a frequência. A Figura 4.6 mostra as impedâncias sem e com compensação da temperatura sobre uma faixa de monitoramento estreita de 101-116 kHz, enquanto a Figura 4.7 mostra a compensação da temperatura feita com uma faixa de monitoramento larga de 20-200 kHz.

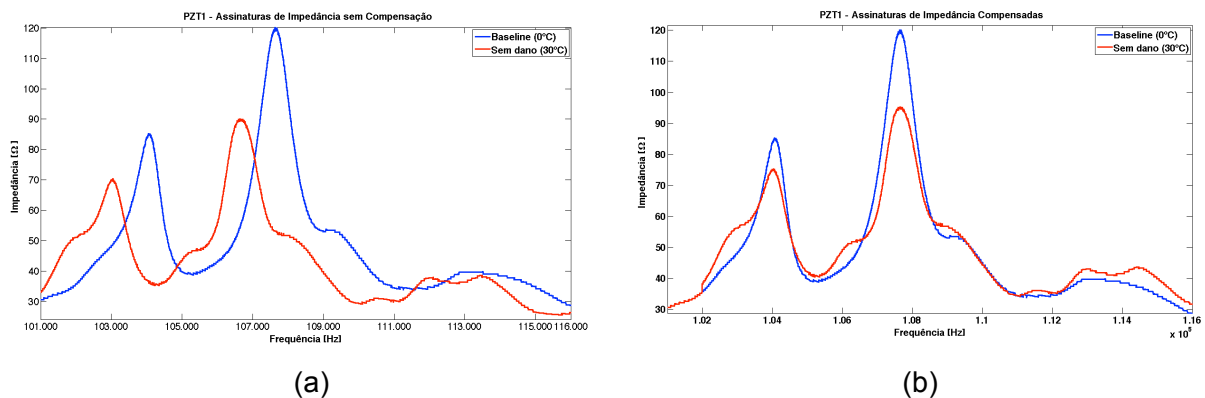


Figura 4.6 – Assinaturas de Impedância: (a) sem Compensação e (b) com compensação obtidas a 30°C, *baseline* a 0°C, usando uma faixa estreita de frequência.

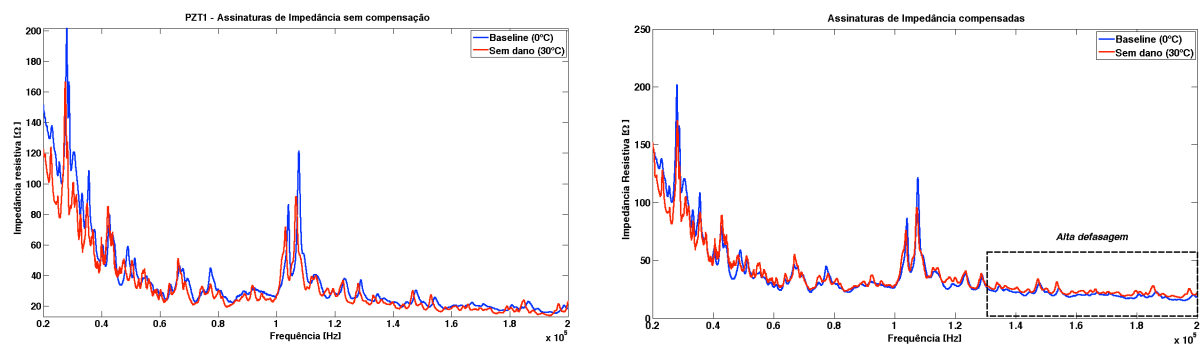


Figura 4.7 – Assinaturas de Impedância: (a) sem Compensação e (b) com compensação obtidas a 30°C, *baseline* a 0°C, usando uma faixa larga de frequência.

A Figura 4.6 (b) mostra um bom alinhamento das curvas de impedância devidamente compensadas e o *baseline* correspondente, na faixa de monitoramento estreita de 101-116 kHz. Observa-se que os deslocamentos horizontais nesta faixa estreita são aproximadamente uniformes. Porém, o alinhamento entre as duas assinaturas sob uma faixa larga de frequência pode implicar em um pior alinhamento, mesmo após a compensação em faixas de frequências mais altas, como pode ser observado na Figura 4.7 (b). Baptista *et al.*, (2014) afirmam que a faixa de frequência deve ser suficientemente estreita para que o método de compensação de temperatura seja eficiente de modo a se distinguir efeitos da temperatura de danos estruturais e, assim, evitar falsos diagnósticos. A Figura 4.8 ilustra os coeficientes de correlação ótimos obtidos em função da temperatura e da faixa de frequência de monitoramento.

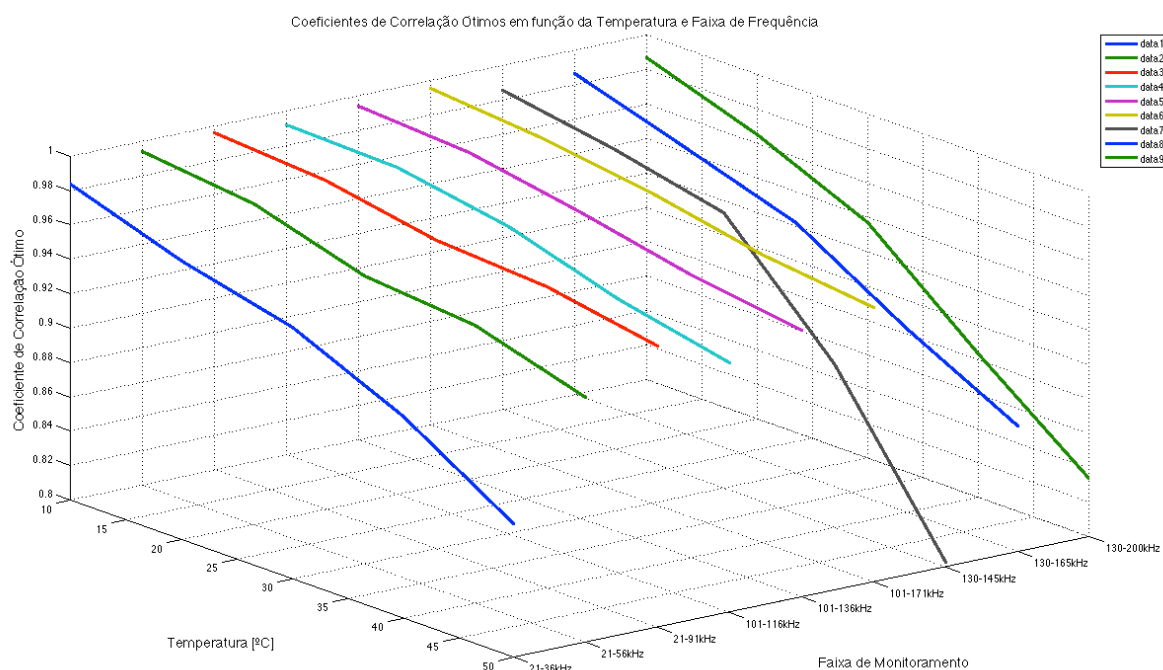


Figura 4.8 – Coeficientes de correlação ótimos em função da temperatura e da faixa de monitoramento.

Observa-se que ambos os parâmetros (temperatura e faixa de monitoramento) têm influência no coeficiente de correlação obtido, que irá determinar o deslocamento horizontal de correção a ser aplicado. Porém, quando as frequências são maiores, os coeficientes de correlação ótimos obtidos são menores, uma vez que os deslocamentos frequenciais são mais elevados nas altas frequências.

Por outro lado, vale ressaltar que, caso a faixa de frequência escolhida inclua vários picos de ressonância, a sensibilidade do sistema para se detectar um dano estrutural é

maior. Portanto, a largura de banda é um parâmetro crítico para as técnicas de compensação baseadas no deslocamento em frequência. Deste modo, pode-se concluir que a faixa de monitoramento a ser escolhida deve ser ao mesmo tempo estreita, para obter uma boa compensação dos efeitos térmicos, e conter uma boa quantidade de picos, indicando um bom acoplamento eletromecânico na faixa escolhida. Assim, a escolha da faixa de monitoramento é um parâmetro fundamental para o bom funcionamento do sistema de SHM.

Posteriormente, um dano foi introduzido na estrutura, consistindo de um furo perfurado a 20 cm de distância do centro da pastilha de PZT, com diâmetro de 2 mm, e profundidade de 2 mm, conforme ilustrado na Figura 4.9. A medição da condição da estrutura com dano foi feita na temperatura de 30°C, sendo que o *baseline* foi adquirido a 0°C.



Figura 4.9 – Viga com dano inserido à distância de 20 cm da pastilha de PZT.

Os resultados do diagnóstico com a compensação da temperatura são apresentados a seguir. Como uma larga faixa de frequência afeta a técnica de compensação da temperatura, foi utilizada apenas a banda de 15kHz (21 kHz – 36 kHz) para este diagnóstico.

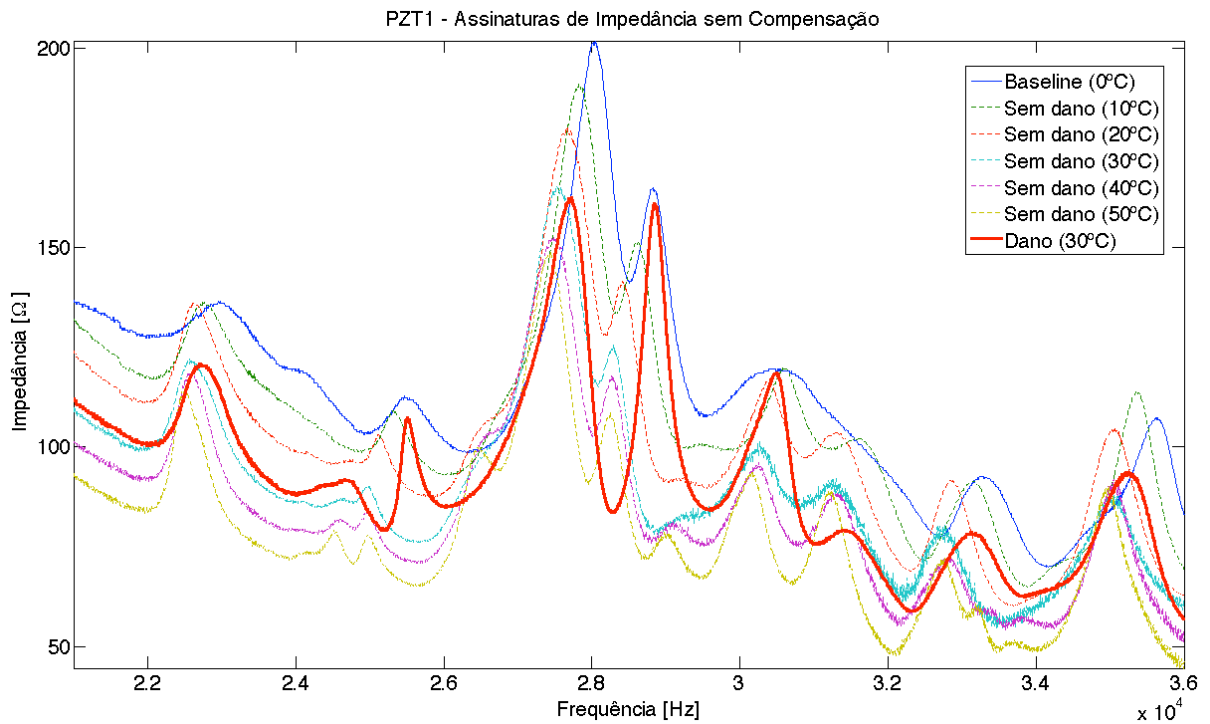


Figura 4.10 – Assinaturas de Impedância sem Compensação – Viga de alumínio.

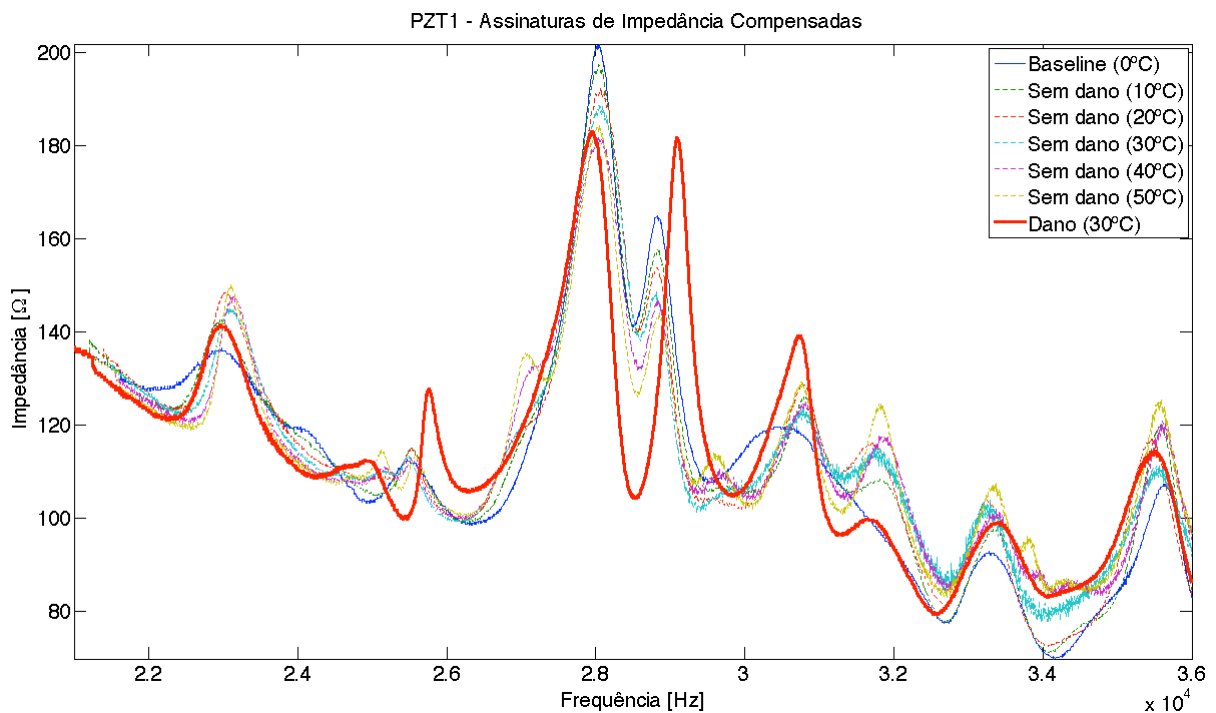


Figura 4.11 – Assinaturas de Impedância com Compensação – Viga de alumínio.

As métricas de dano RMSD e CCD são ilustradas a seguir:

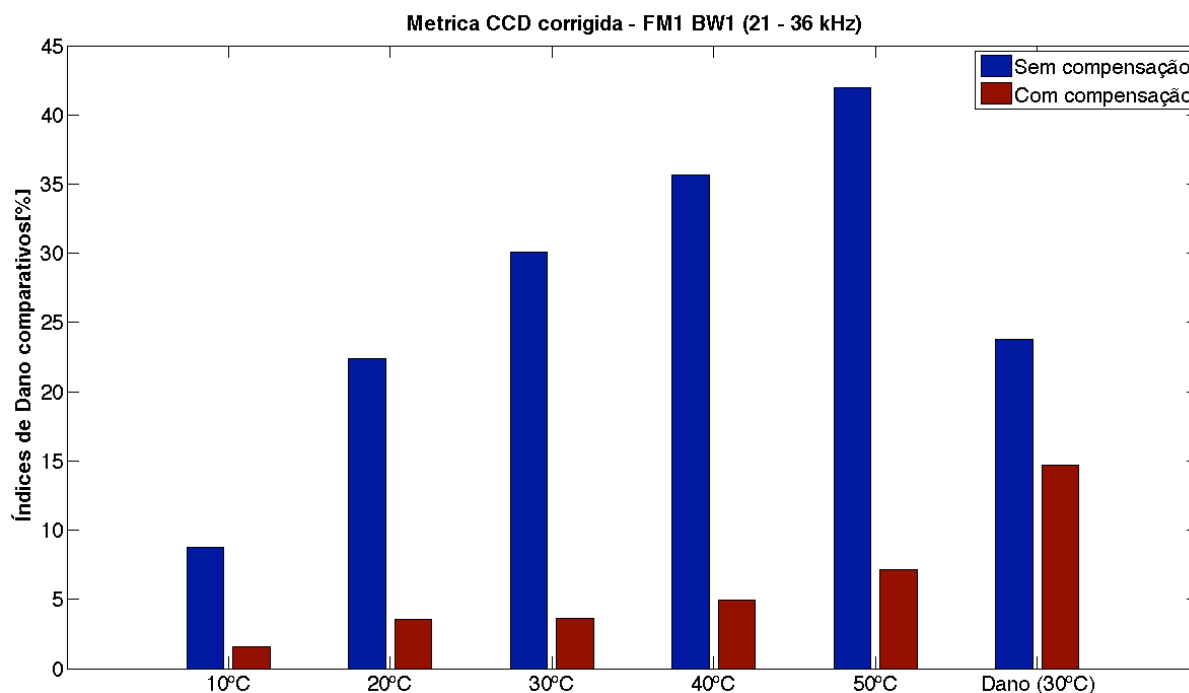


Figura 4.12 – Métricas de dano CCD sem e com compensação – Viga de Alumínio.

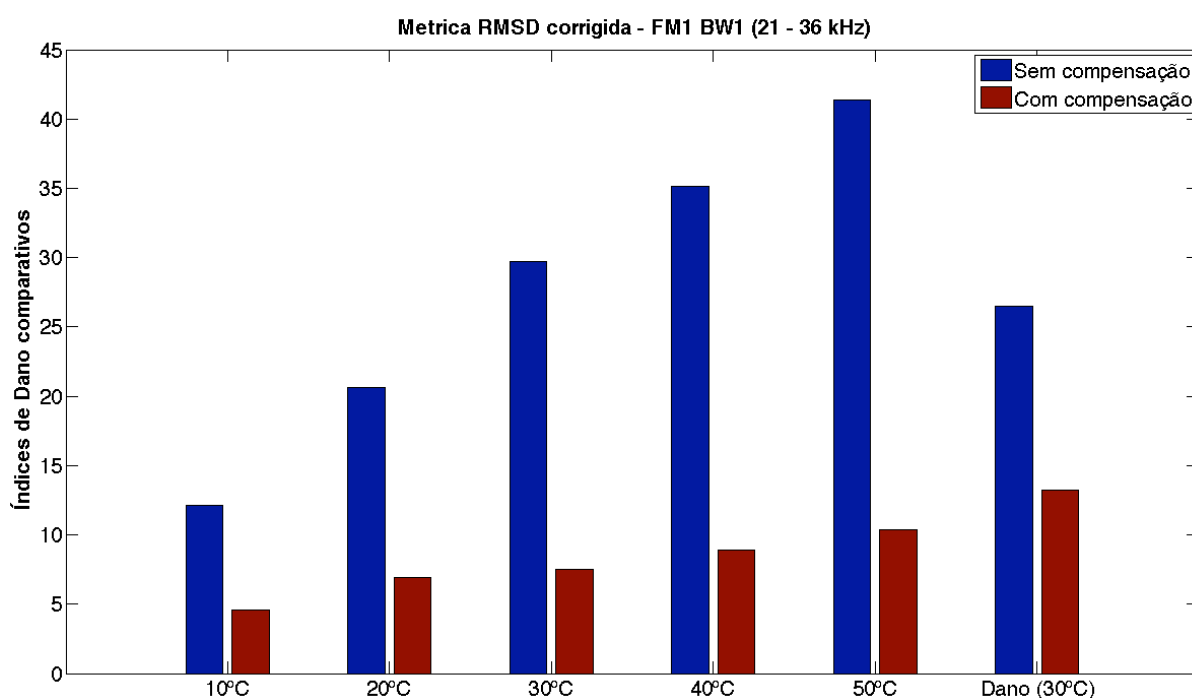


Figura 4.13 – Métricas de dano RMSD sem e com compensação – Viga de Alumínio.

A Figura 4.10 e a Figura 4.11 apresentam uma comparação visual, ou qualitativa, das assinaturas de impedância. Pode-se observar que a técnica da compensação tem sucesso em aproximar as curvas correspondentes à condição sem dano com do *baseline* medido em 0°C, enquanto que o estado estrutural com dano, mesmo após a compensação,

se distingue das outras assinaturas de impedância. Deste modo, as métricas de dano CCD e RMSD (Figura 4.12 e Figura 4.13, respectivamente) apresentam uma comparação quantitativa de cada curva em relação ao *baseline* medido a 0°C. Neste caso, observou-se uma maior distinção através da métrica CCD, justificando o uso de mais de uma métrica para se fazer um diagnóstico. Para maior concisão, as métricas de dano para as outras faixas de monitoramento, em relação ao *baseline* medido a 0°C são apresentadas no Anexo I desta dissertação (Tabela A.1).

Pode-se, no entanto, fazer uma alteração deste procedimento de compensação conforme explicado a seguir. Caso seja possível adquirir curvas de *baseline* em diferentes temperaturas da estrutura para a condição intacta, a técnica de compensação da temperatura pode tornar-se evidentemente mais eficiente. Os resultados a seguir, para a viga de alumínio, mostram a comparação do caso sem dano medido a 20°C considerado agora como *baseline*, com o caso com dano medido na temperatura de 30°C.

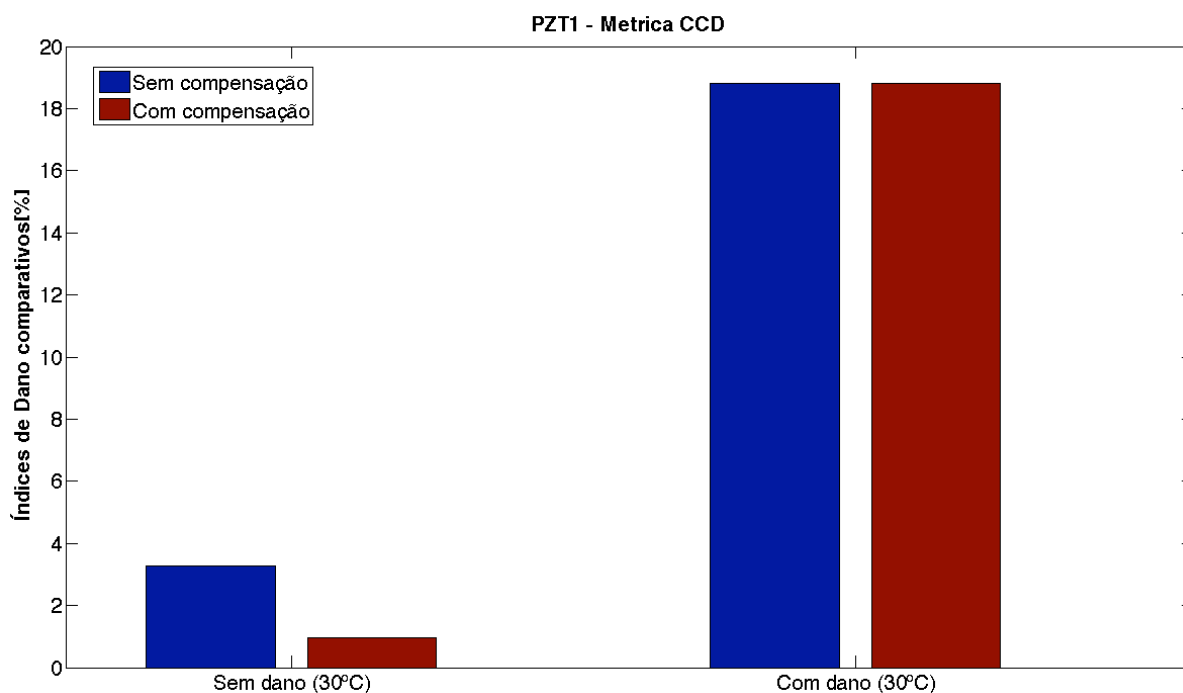


Figura 4.14 – Métricas de dano CCD utilizando um *baseline* de 20°C.

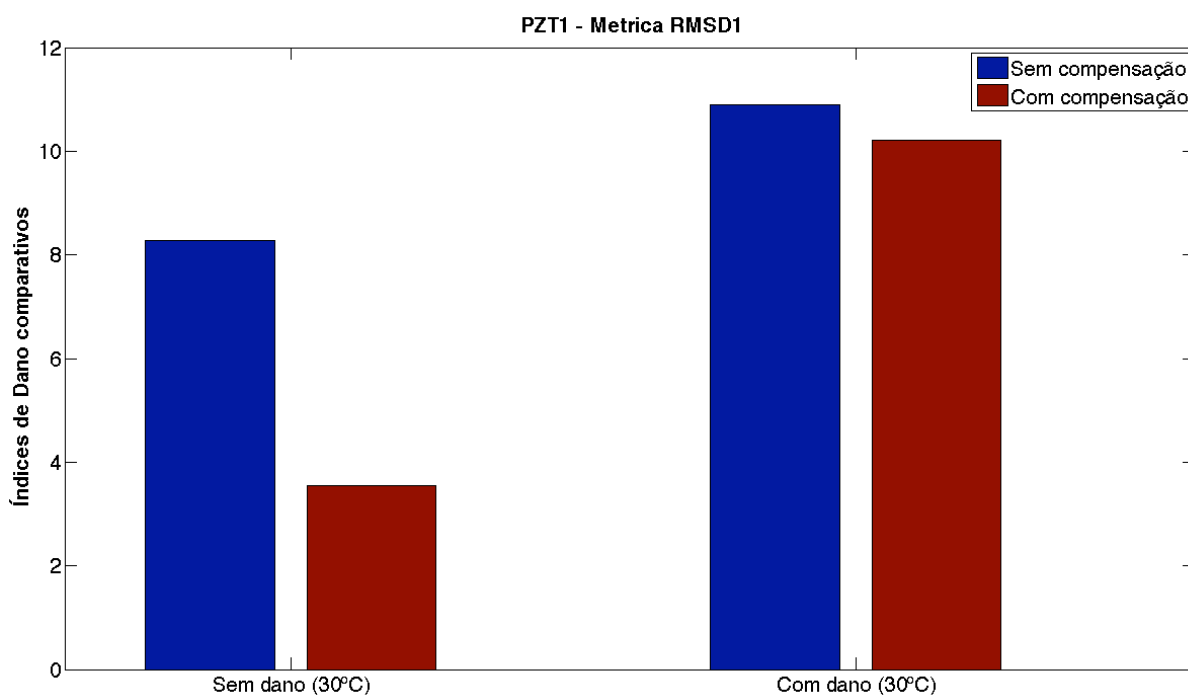


Figura 4.15 – Métricas de dano RMSD utilizando um *baseline* de 20°C.

A Tabela 4.3 sumariza o comparativo das métricas obtidas utilizando-se os *baselines* de 0°C e 20°C:

Tabela 4.3 – Tabela comparativa de valores de métricas de dano após compensação da temperatura utilizando diferentes *baselines*.

Métricas após compensação		
<i>Baseline</i>	Sem dano (30°C)	Com dano (30°C)
CCD (0°C)	3,6 %	14,7%
CCD (20°C)	0,96%	18,8%
RMSD (0°C)	7,51	13,2
RMSD (20°C)	3,93	14,2

Através da Tabela 4.3, pode-se observar que, utilizando um *baseline* a uma temperatura próxima da temperatura de medição, as métricas de dano são mais pronunciadas. Isto significa que, para a métrica CCD, comparando-se as métricas para o caso sem dano, seu valor é reduzido de 3,6% para 0,96% quando o *baseline* utilizado é medido a uma temperatura com 10°C de diferença da que foi usada na medição (idealmente este valor deveria ser próximo de 0%, pois não houve ocorrência de dano). Já para a métrica CCD, comparando-se com uma medição com dano, o valor da métrica foi

aumentado de 14,7% para 18,8% usando-se um *baseline* adquirido a uma temperatura mais próxima da temperatura de medição (considerando que o sistema deve emitir um alarme na ocorrência de um dano e, quanto maior este valor, mais sensibilidade o sistema apresenta no diagnóstico). De posse destes valores, pode-se estabelecer através de técnicas estatísticas um valor limiar que servirá para distinguir um estado saudável de um estado considerado com dano, para cada métrica. As métricas de dano para as outras faixas de monitoramento, em relação ao *baseline* medido a 20°C são apresentadas no Anexo I desta dissertação (Tabela A.2).

Para reforçar esta necessidade, apresenta-se a seguir o caso de um segundo dano simulado na viga, onde o parafuso que se encontra distante de 8,2 cm da pastilha de PZT foi afrouxado de 1/8 de volta, implicando em perda de rigidez naquela região. Cabe ressaltar que este tipo de dano pode ser considerado incipiente. Tendo somente um *baseline* adquirido a 0°C, sendo que o dano foi adquirido a 30°C, pode-se notar que o sistema apresentou baixa sensibilidade ao dano inserido, conforme mostram as métricas CCD da Figura 4.16, a seguir.

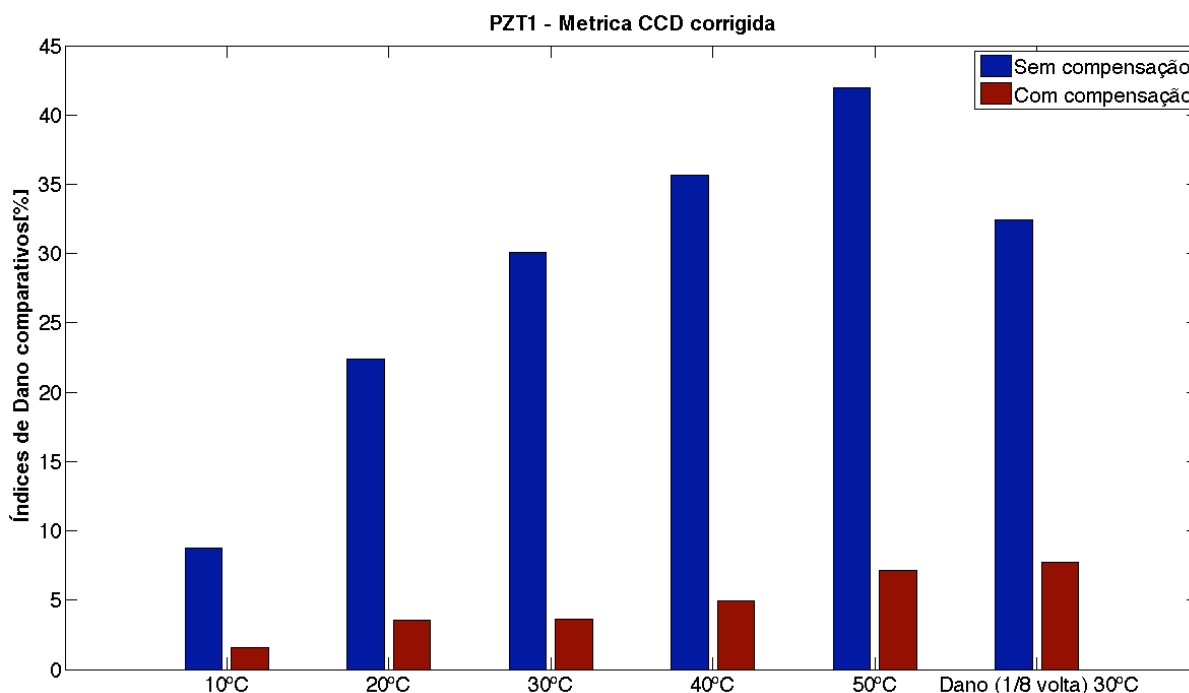


Figura 4.16 – Métricas de dano CCD utilizando *baseline* medido a 0°C.

Dano: parafuso afrouxado (1/8 de volta).

Utilizando, porém, um *baseline* adquirido na temperatura de 20°C, nota-se uma maior discrepância entre os valores dos casos sem dano e com dano, conforme mostra a Figura 4.17:

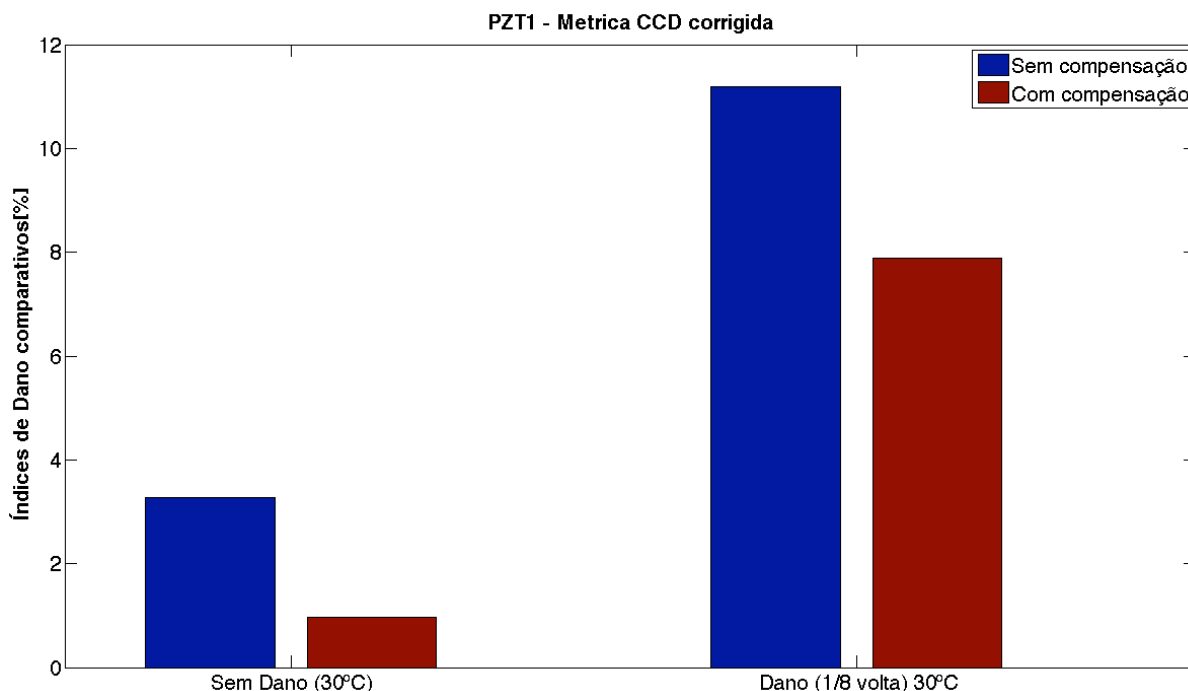


Figura 4.17 – Métricas de dano CCD utilizando *baseline* medido a 20°C.

Dano: parafuso afrouxado (1/8 de volta).

Neste caso, ao utilizar-se somente um *baseline* que foi medido na temperatura de 0°C (Figura 4.16), a métrica de dano CCD para os casos sem dano e com dano variou, respectivamente, de 3,6% para 7,75% (variação de 4,15%). Por outro lado, utilizando um *baseline* adquirido a uma temperatura mais próxima da temperatura de medição, a 20°C por exemplo, a métrica CCD para os casos sem dano e com dano variou, respectivamente, de 0,96% para 7,89% (variação de 6,93%). Isto mostra que a escolha de um *baseline* adquirido numa temperatura mais próxima da temperatura de medição melhora a sensibilidade do sistema para realizar um diagnóstico. Pode-se tirar a mesma conclusão observando o caso da placa retangular do capítulo 3, onde a redução percentual das métricas de dano tornava-se cada vez menor com o uso de um único *baseline*, conforme ilustrado na Tabela 3.3.

Portanto, é extremamente recomendada a aquisição de vários *baselines* em diferentes temperaturas da estrutura monitorada, de modo que o sistema de detecção de danos possa ser capaz de levar a um melhor diagnóstico, ou seja, a um diagnóstico mais confiável quanto à integridade estrutural considerada, mesmo após a aplicação da técnica de compensação da temperatura. Conforme visto acima, esta é influenciada, também, pelo gradiente de temperatura entre a medição e o *baseline* de referência.