

4.3. Monitoramento da Integridade Estrutural de painel de fuselagem aeronáutico considerando efeitos térmicos

Com o intuito de colocar à prova o sistema de detecção de danos com a técnica de compensação da temperatura incorporada, utilizou-se uma parte de fuselagem aeronáutica (painel) aonde foram instalados 7 sensores piezelétricos e um sensor de temperatura, indicado por STEMP, que indica ao sistema a temperatura de cada assinatura de impedância, medida numa posição central da estrutura.

O painel aeronáutico pode ser visto na Figura 4.18, cujas dimensões são de 810x810 milímetros. As 7 pastilhas de PZT são do tipo 5H. Para simular a ocorrência de dano e verificar a capacidade de detecção dos transdutores instalados, duas massas foram inicialmente adicionadas à estrutura, para serem removidas uma de cada vez, posteriormente. Assim, foi removida primeiramente a massa 1 de 0,2 g, localizada a 39,6 mm do PZT 3, em seguida a massa 2 de 9,7 g, localizada a 85 mm do PZT 1.

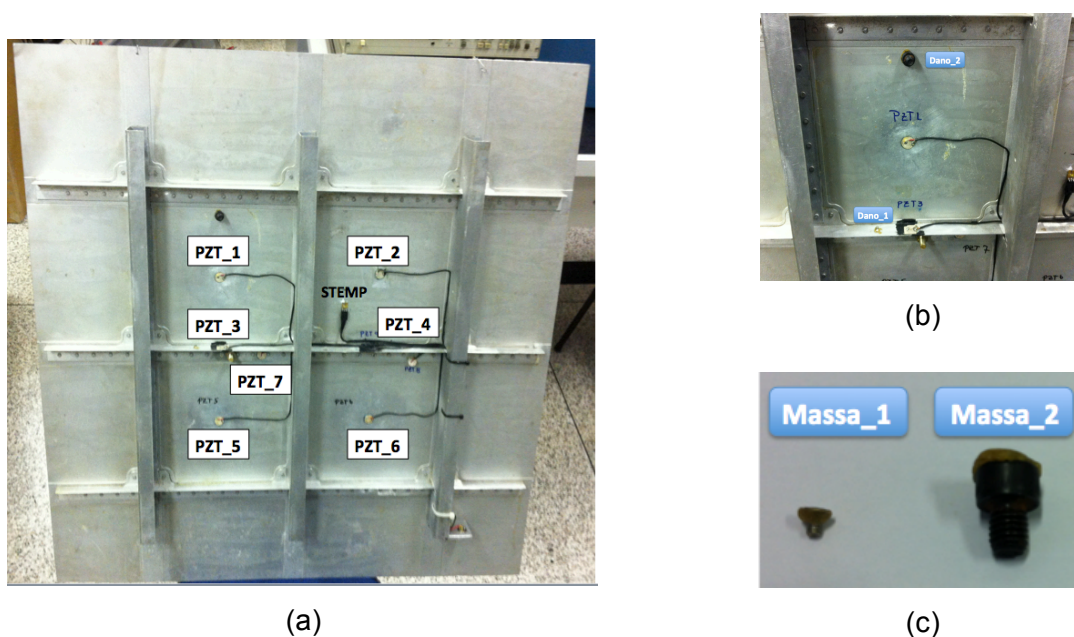


Figura 4.18 – Painel aeronáutico instrumentado com 7 pastilhas de PZT. (a) - Visão Geral; (b) – Posição dos Danos; (c) – Massas usadas para simulação de danos.

Durante a realização do experimento, observou-se que o PZT7 não obteve um bom acoplamento eletromecânico, resultando em assinaturas de impedância com pouca quantidade de picos e vales. Este fato geralmente pode ocorrer caso a colagem da pastilha de PZT tiver sido feita de maneira inapropriada ou um superaquecimento dos eletrodos do sensor tenha ocasionado uma despolarização do transdutor durante o processo de

soldagem dos cabos. Por este motivo, os resultados deste sensor não são aproveitados neste trabalho. É de grande importância garantir que o processo de instalação dos sensores (colagem e solda) não variem durante a aplicação do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, pois se houver alguma variação, os resultados obtidos perdem qualidade.

As faixas de monitoramento para cada transdutor de PZT foram selecionadas como: PZTs 1 a 6: 20 a 35 kHz. Todos os transdutores terão a mesma largura de banda em sua faixa de monitoramento, isto é, de 15 kHz. Todas as medições foram feitas com 300 pontos.

Neste experimento, Dano 1 corresponde à remoção da massa 1, Dano 2 corresponde à posterior remoção da massa 2. Todas as remoções foram feitas sequencialmente, sem reposições de massa à estrutura.

Por se tratar de uma estrutura de tamanho significativo, esta foi posicionada sobre 4 blocos de borracha presos em sua superfície inferior, dentro na câmara climática, de modo a não bloquear o fluxo de ar dentro da câmara conforme recomendado pelo fabricante. A estrutura posicionada no interior da câmara é mostrada na Figura 4.19.

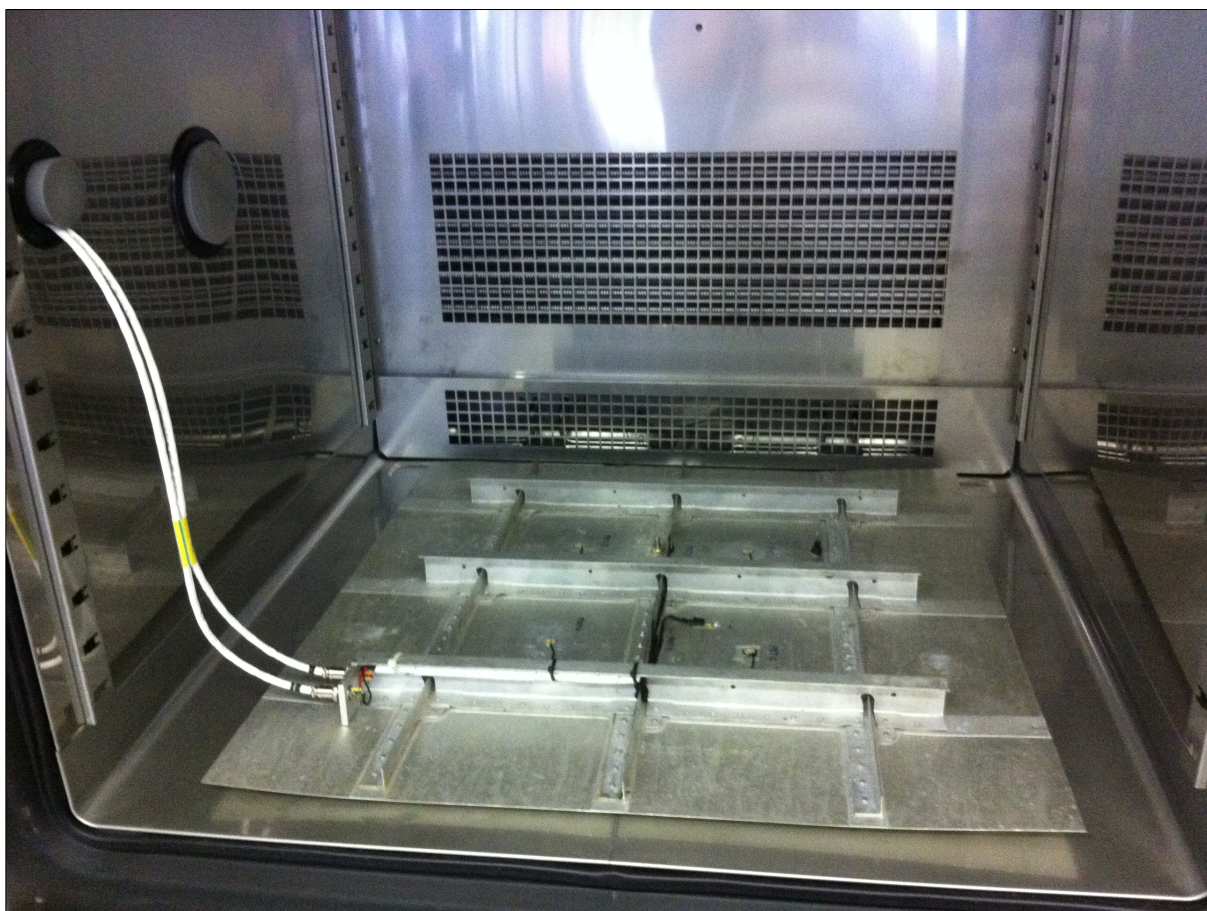


Figura 4.19 – Ilustração do painel aeronáutico inserido na Câmara Climática.

As condições de cada medição do experimento são sumarizadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados sobre condições de cada ensaio realizado com o painel de alumínio aeronáutico.

Medida #	Temperatura da Estrutura	Estado Estrutural
1	0°C	<i>Baseline</i>
2	10°C	<i>Baseline</i>
3	20°C	<i>Baseline</i>
4	30°C	<i>Baseline</i>
5	40°C	<i>Baseline</i>
6	50°C	<i>Baseline</i>
7	31°C	Sem dano
8	43°C	Sem dano
9	31°C	Dano 1
10	43°C	Dano 2

Para quantificar a diferença entre os sinais foram utilizadas as métricas RMSD e CCD. Foram analisados dois casos de diagnóstico, da seguinte forma:

- ✓ Diagnóstico 1: Utilizando somente 1 *baseline* medido a 0°C.
- ✓ Diagnóstico 2: Utilizando o *baseline* medido mais próximo da temperatura de medição.

Assim, para o Diagnóstico 1, somente a medição #1 é considerada como *baseline*. Já para o Diagnóstico 2, as medições #1-6 são definidas todas como *baseline* para o sistema de detecção de danos. Isto foi feito para avaliar a necessidade de se armazenar o *baseline* da estrutura em diversas temperaturas para um correto diagnóstico, mesmo após a implementação da técnica de compensação da temperatura. As medições #7-8 foram tomadas simplesmente para se ter uma referência da condição sem dano para a estrutura, nas mesmas temperaturas em que os danos (medições #9-10) foram medidos.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir. Para facilitar a interpretação dos dados por concisão, neste capítulo são colocadas apenas as curvas de impedância e métricas correspondentes associadas aos PZTs 1 e 3, que estavam mais próximos, respectivamente, dos danos 2 e 1. O PZT7, localizado próximo ao dano 3, foi descartado conforme explicado anteriormente. No Anexo II são apresentados todos os dados das métricas de dano para as pastilhas de PZT acopladas à estrutura (Tabela A.3).

A Figura 4.20 e a Figura 4.21 apresentam os sinais de impedância do PZT 1, antes e depois da compensação da temperatura, respectivamente.

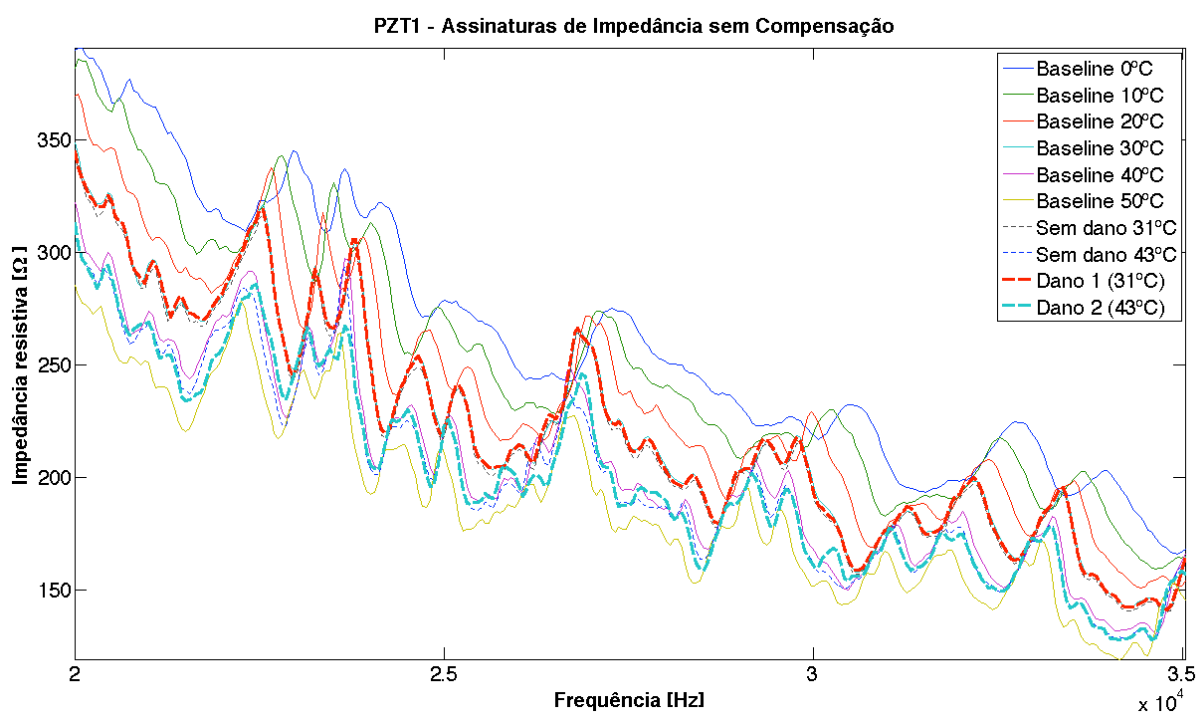


Figura 4.20 – Assinaturas de Impedância do PZT1 sem compensação térmica: Diagnóstico 1
Painel aeronáutico.

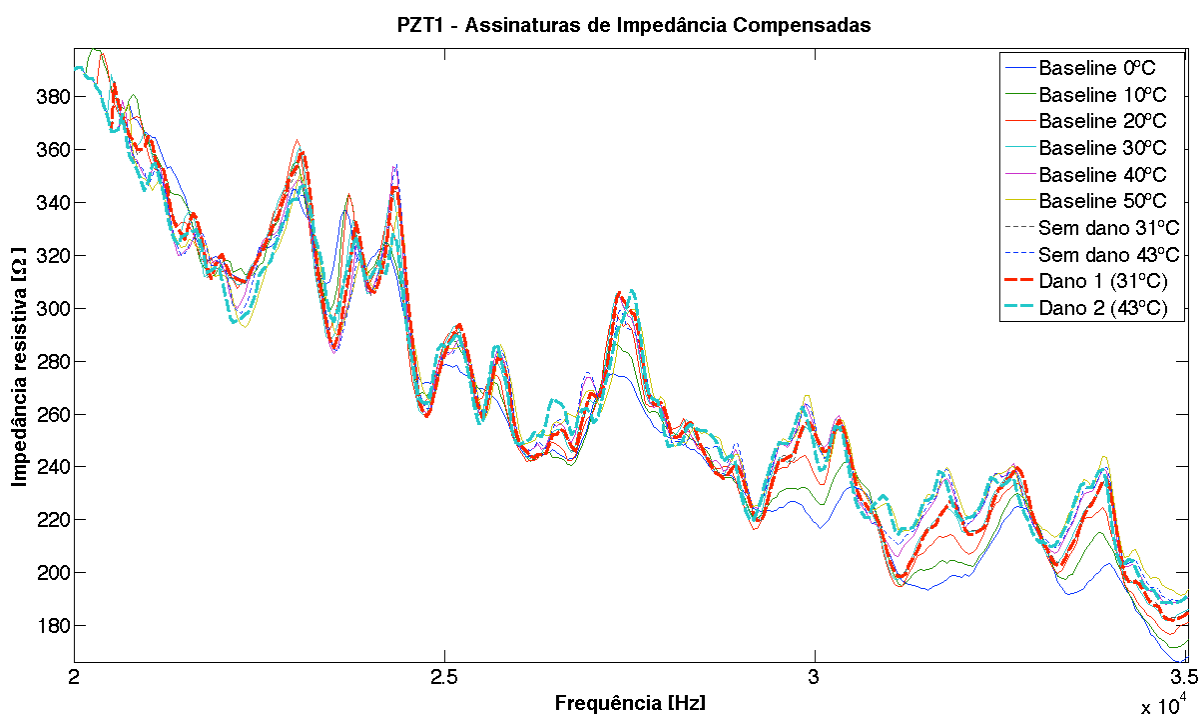


Figura 4.21 – Assinaturas de Impedância do PZT1 com compensação térmica para
Diagnóstico 1 – Painel aeronáutico.

As métricas de dano CCD e RMSD para o PZT1 correspondendo ao Diagnóstico 1 são ilustradas nas Figura 4.22 e Figura 4.23, respectivamente.

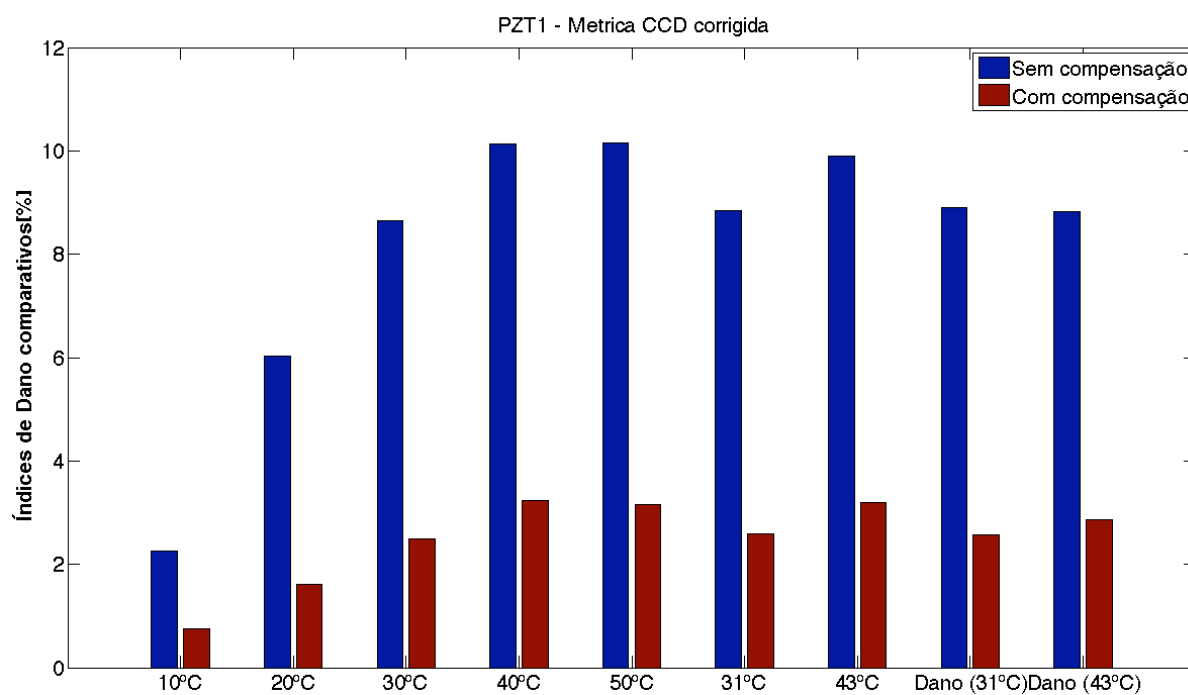


Figura 4.22 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 1 – PZT1.

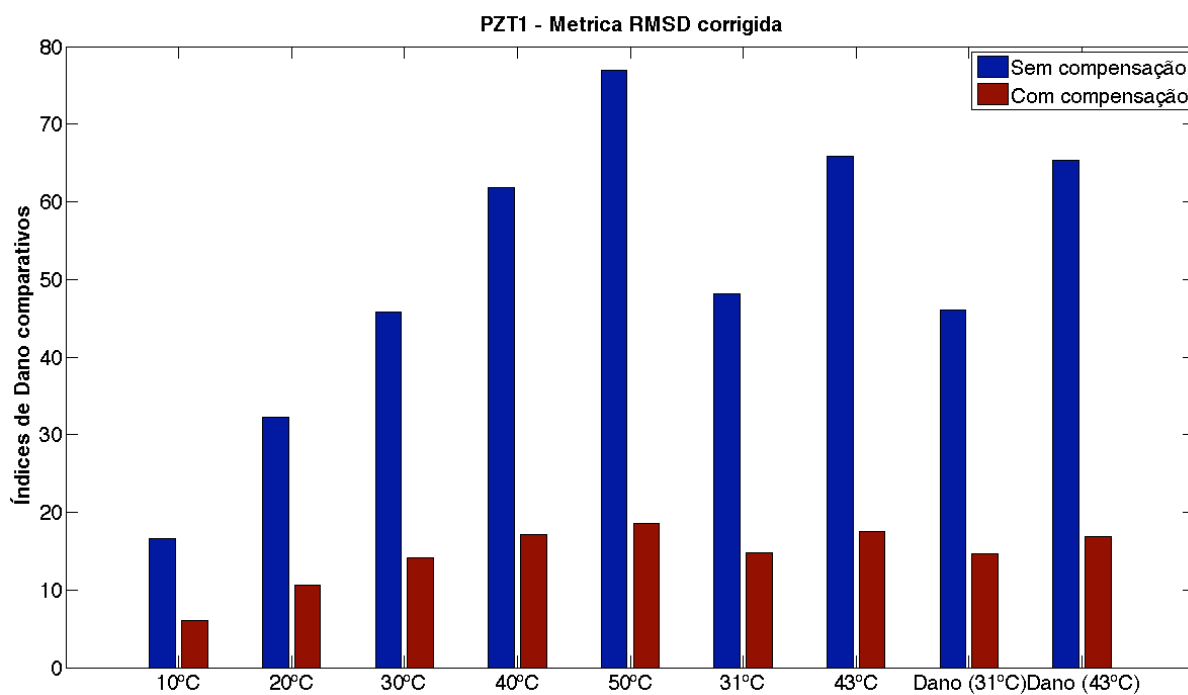


Figura 4.23 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 1 – PZT1.

Na Figura 4.22 e na Figura 4.23, os 5 primeiros valores dos histogramas correspondem à métrica de dano dos estados sem dano, para cada temperatura, conforme se verifica no eixo das abscissas (medidas #2 a #6). As métricas das medidas #7 e #8, que correspondem ao sexto e sétimo valores dos histogramas, foram obtidas na condição “*sem dano*” na mesma temperatura em que cada dano foi introduzido na estrutura, com o propósito de se ter um valor de referencia. Finalmente, as métricas das medidas #9 e #10 correspondem aos casos de Dano1 e Dano2, que foram introduzidos próximos aos sensores denominados como PZT3 e PZT1, respectivamente.

Os resultados do Diagnóstico 1 acima mostram que, apesar de haver uma redução significativa das métricas de dano após a implementação da técnica, com o uso de um único *baseline*, que foi obtido a uma temperatura distante dos casos com dano neste ensaio, as métricas de dano sofreram pouca sensibilidade à presença de dano, especialmente ao dano 2, que foi colocado próximo ao PZT1. A métrica CCD foi reduzida de 3,2% (medida#8) para 2,87% (medida#10) entre os casos sem dano e com dano (à temperatura de 43°C). Enquanto isso, a métrica RMSD também foi reduzida de 17,6 para 16,9. Para ambas as métricas, esperava-se que os valores dos índices de dano aumentassem nesse caso, porém estes foram reduzidos.

Em seguida são apresentados os resultados para o Diagnóstico 2, em que o sistema de detecção de dano utiliza somente o *baseline* mais próximo da temperatura de aquisição. A Figura 4.24 e a Figura 4.25 apresentam os sinais de impedância do PZT1, antes e depois da compensação de temperatura, respectivamente.

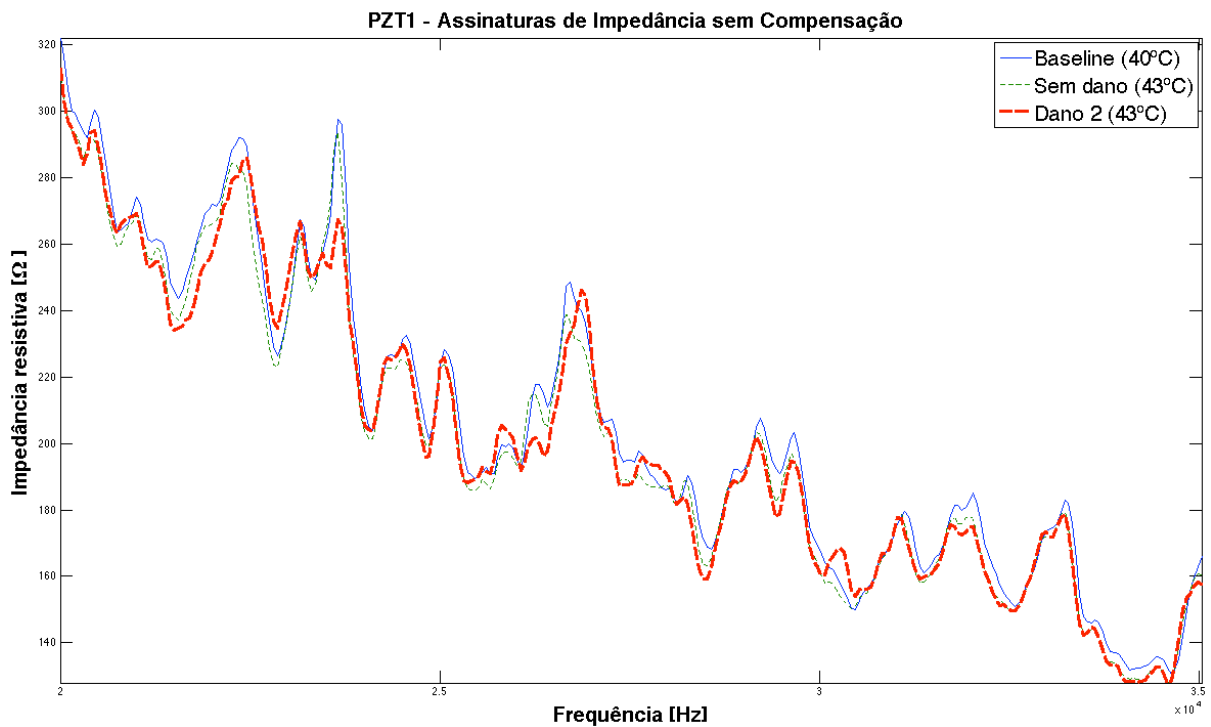


Figura 4.24 – Assinaturas de Impedância do PZT1 sem compensação térmica para Diagnóstico 2 – Painel aeronáutico.

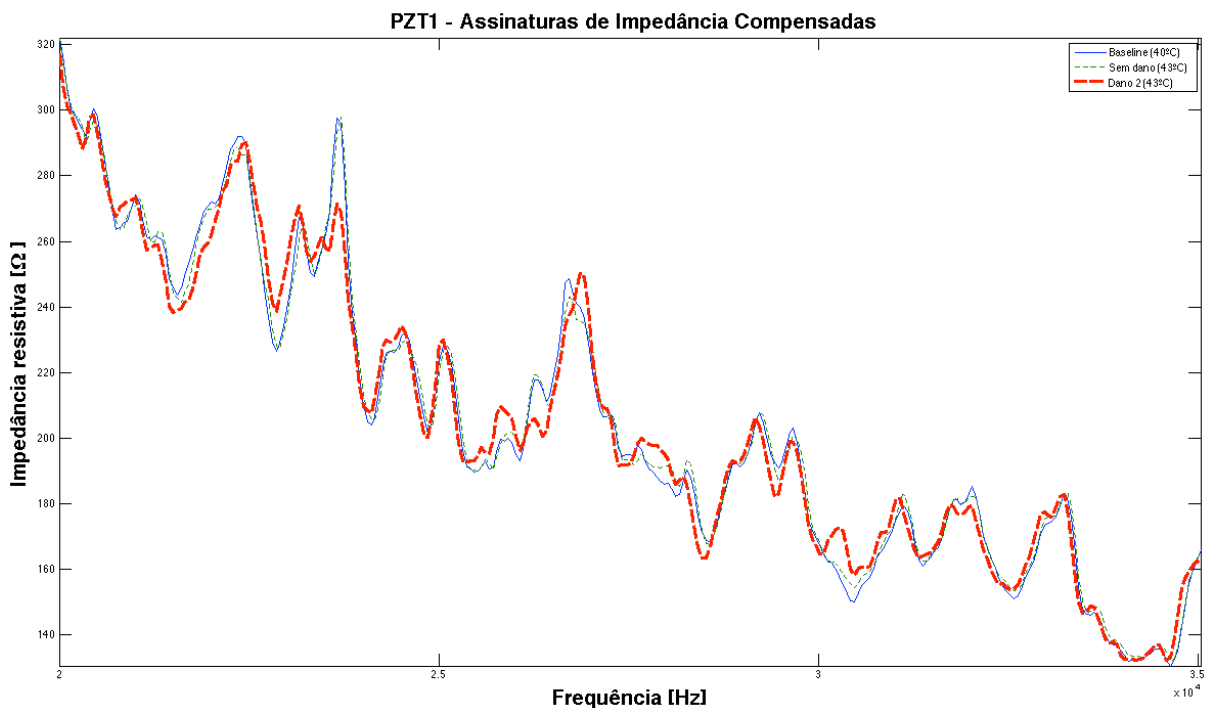


Figura 4.25 – Assinaturas de Impedância do PZT1 com compensação térmica para Diagnóstico 2 – Painel aeronáutico.

As métricas de dano CCD e RMSD para o PZT1 através do Diagnóstico 2 são ilustradas na Figura 4.26 e Figura 4.27, respectivamente.

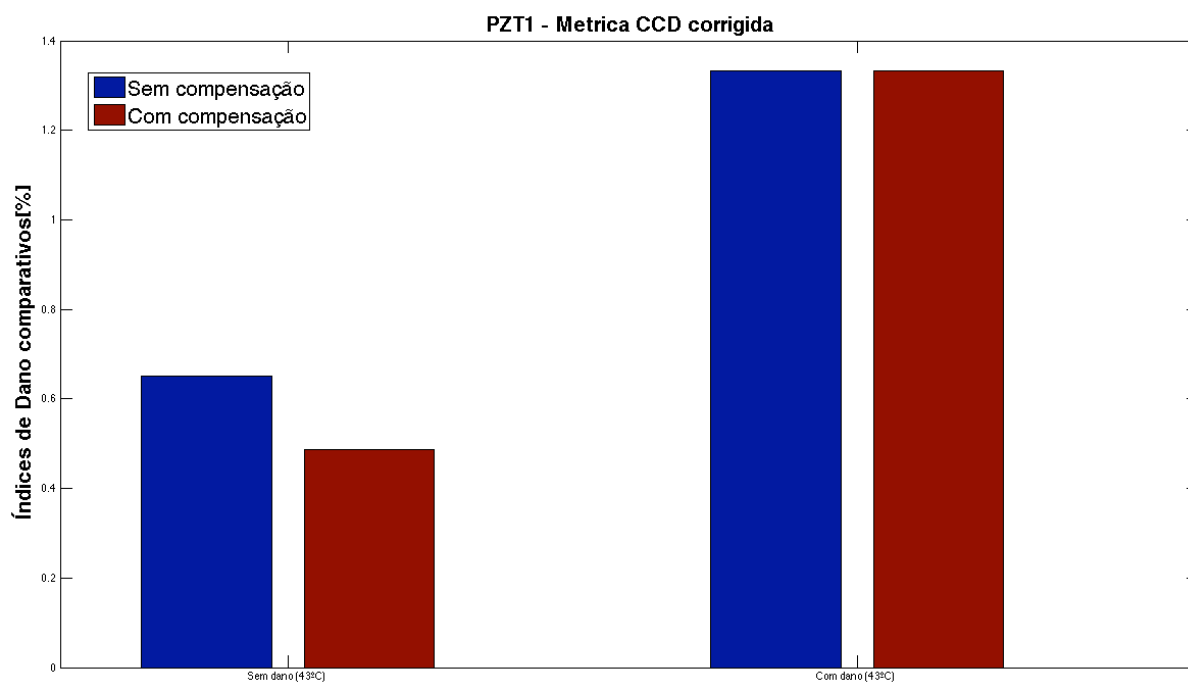


Figura 4.26 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 2 – PZT1.

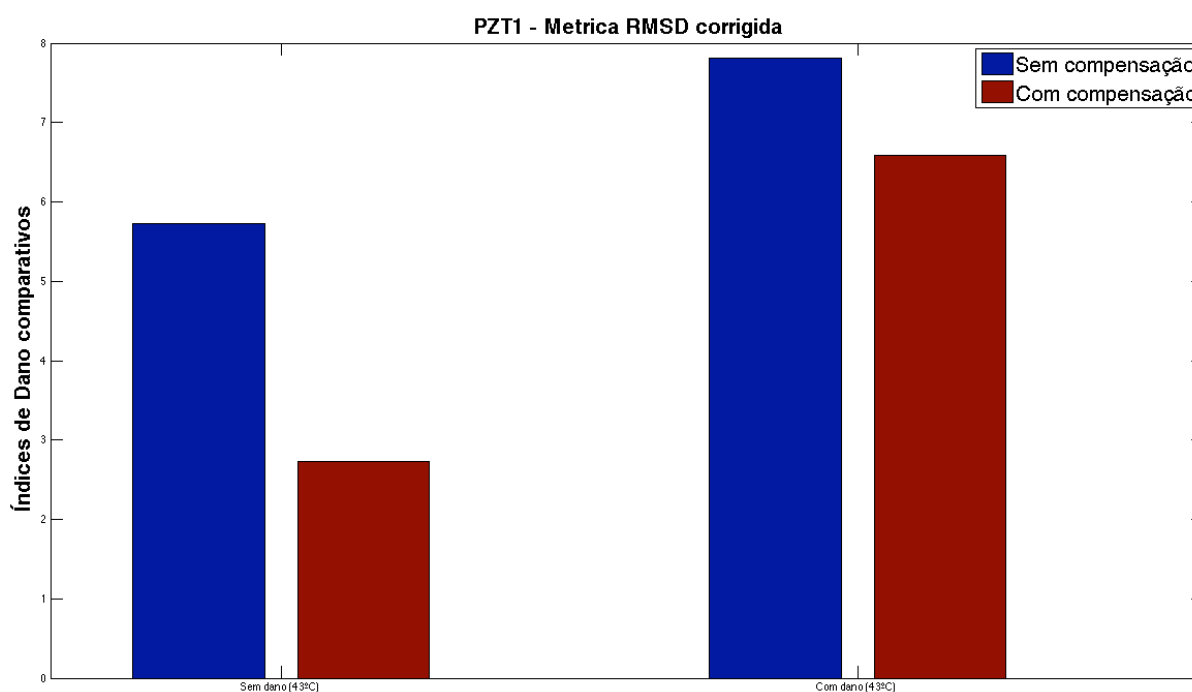


Figura 4.27 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 2 – PZT1.

Os resultados do Diagnóstico 2 são satisfatórios quando comparados ao Diagnóstico 1 pois observa-se que entre os casos sem dano e com dano (referindo-se ao dano 2), as métricas correspondentes foram sensíveis, aumentando seu valor. A métrica CCD aumentou

de 0,487% para 1,33% entre os casos sem dano e com dano, enquanto a métrica RMSD aumentou de 2,73 para 6,59.

A Tabela 4.5 resume o resultado dos dois diagnósticos para o PZT1 em relação ao Dano 2.

Tabela 4.5 – Resultados para os diagnósticos do PZT1.

	CCD Sem dano	CCD Com dano	RMSD Sem dano	RMSD Com dano
Diagnóstico 1	3,2%	2,87%	17,6	16,9
Diagnóstico 2	0,487%	1,33%	2,73	6,59

Desta forma, nota-se que o Diagnóstico 2 apresentou métricas de dano mais coerentes com a configuração estrutural testada, de modo que o sistema apresenta maior robustez quanto à influência da temperatura para as condições do teste realizado.

De modo similar, os resultados para o PZT3, localizado na região onde o Dano 1 foi inserido, são apresentados a seguir. A Figura 4.28 e a Figura 4.29 apresentam os sinais de impedância do PZT3, antes e depois da compensação de temperatura, respectivamente.

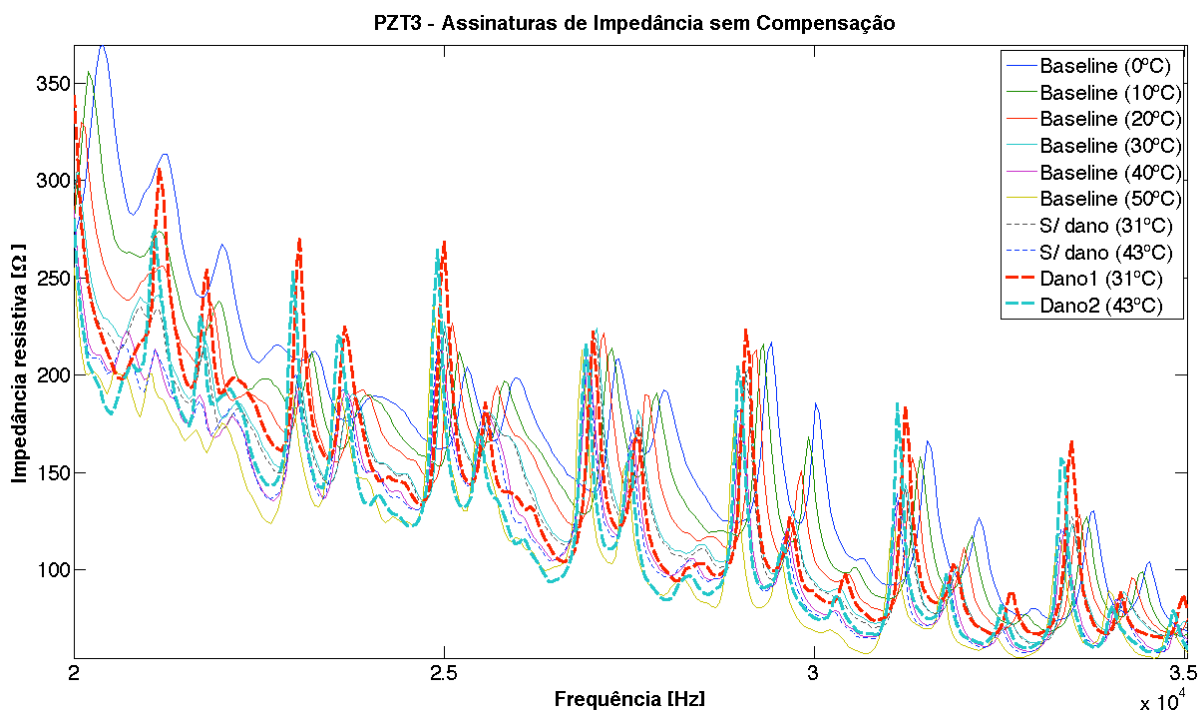


Figura 4.28 – Assinaturas de Impedância do PZT3 sem compensação térmica para Diagnóstico 1 – Pannel aeronáutico.

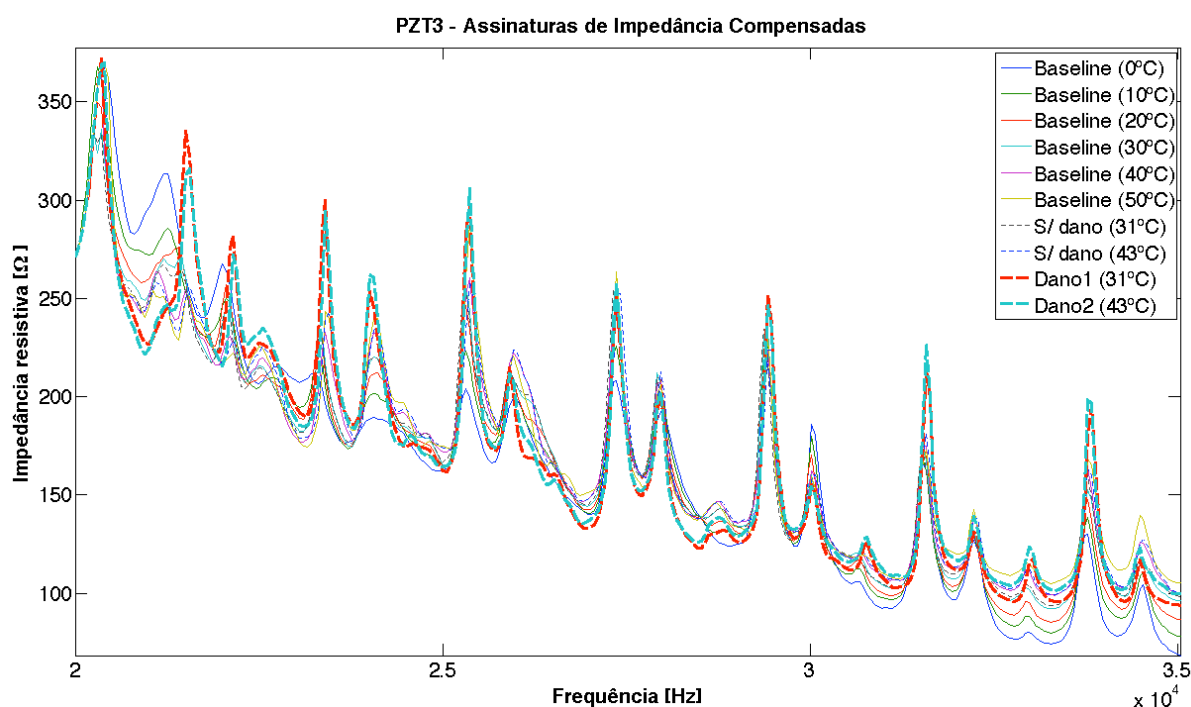


Figura 4.29 – Assinaturas de Impedância do PZT3 com compensação térmica para Diagnóstico 1 – Painel aeronáutico.

As métricas de dano CCD e RMSD para o PZT3 através do Diagnóstico 1 são ilustradas na Figura 4.30 e na Figura 4.31, respectivamente.

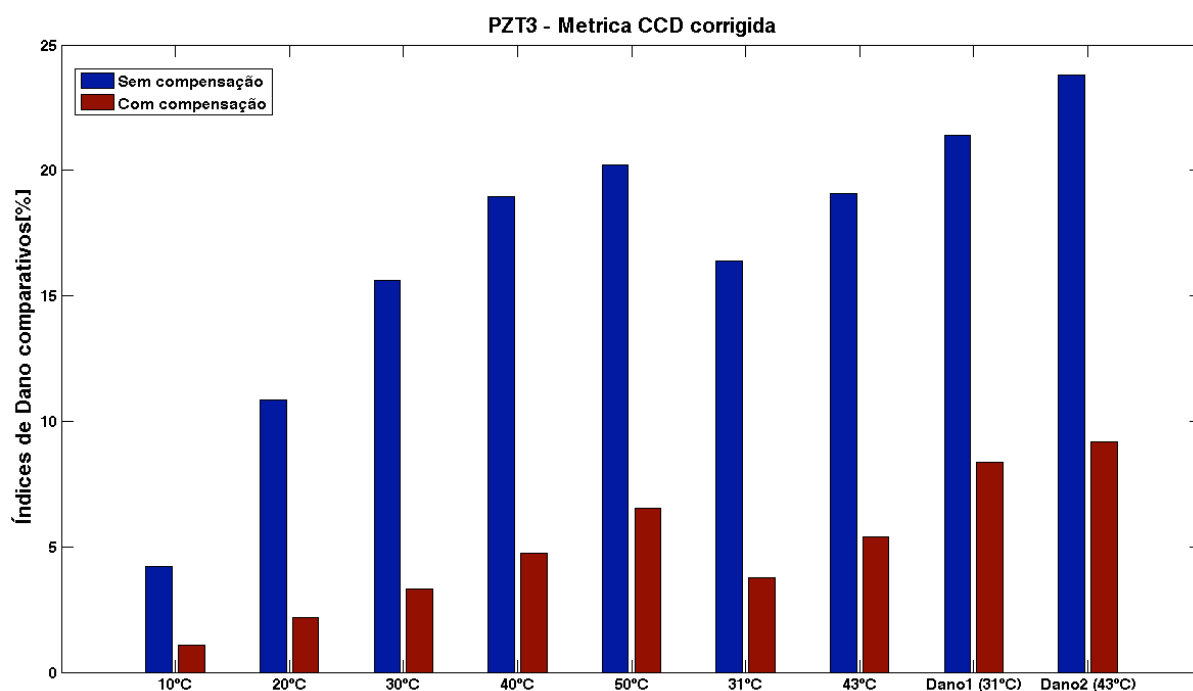


Figura 4.30 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 1 – PZT3.

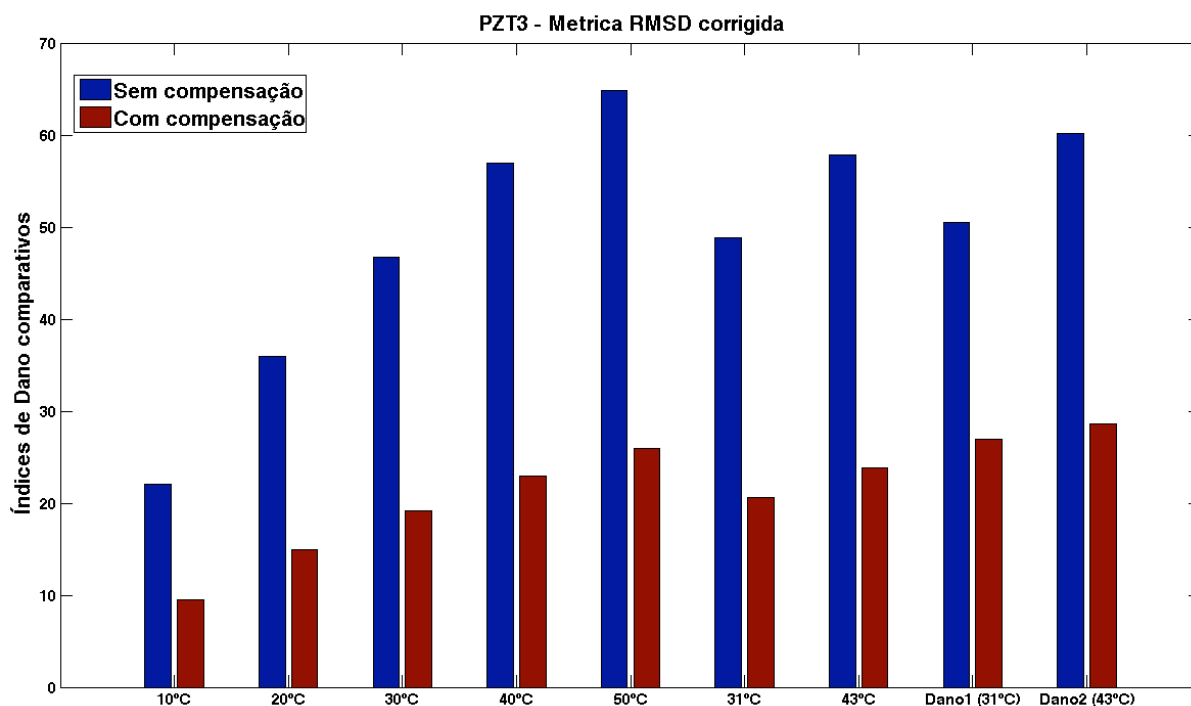


Figura 4.31 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 1 – PZT3.

Com os resultados do Diagnóstico 1 acima, pode-se notar que, com o uso de apenas um *baseline* medido a 0°C, as métricas de dano dos estados Dano1 e Dano2 são ainda próximas dos valores correspondentes aos estados sem dano, dificultando o diagnóstico. Nota-se, entretanto, um pequeno aumento das métricas. A métrica CCD aumentou de 3,79% (medida#7) para 8,35% (medida#9) entre os casos sem dano e com dano (à temperatura de 31°C). Já a métrica RMSD também aumentou, de 20,6 para 26,9. Embora os resultados do Diagnóstico 1 indiquem uma sensibilidade coerente com os casos apresentados, pode-se notar uma melhoria significativa em termos de sensibilidade das métricas para o Diagnóstico 2, cujos resultados são apresentados a seguir.

Para este caso, como a temperatura de medição é de 31°C, o *baseline* correspondente à temperatura mais próxima a ser tomado como referência será o de 30°C. A Figura 4.32 e a Figura 4.33 apresentam os sinais de impedância do PZT3, antes e depois da compensação de temperatura, respectivamente.

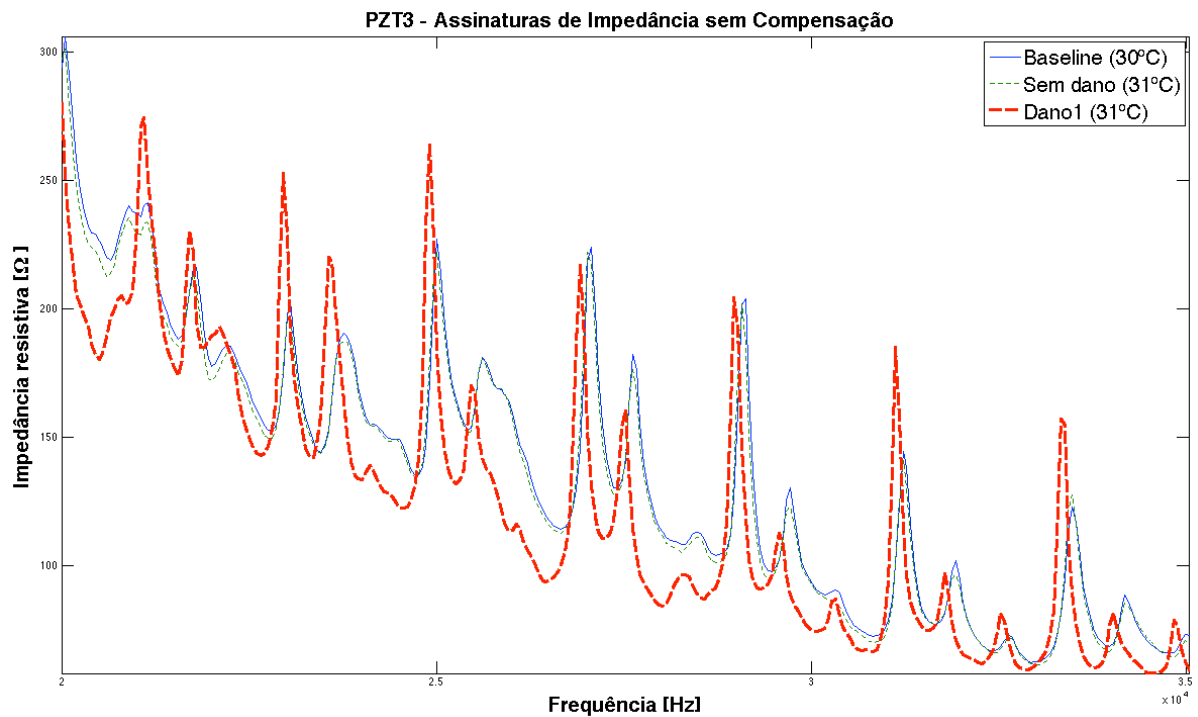


Figura 4.32 – Assinaturas de Impedância do PZT3 sem compensação térmica para Diagnóstico 2 – Pannel aeronáutico.

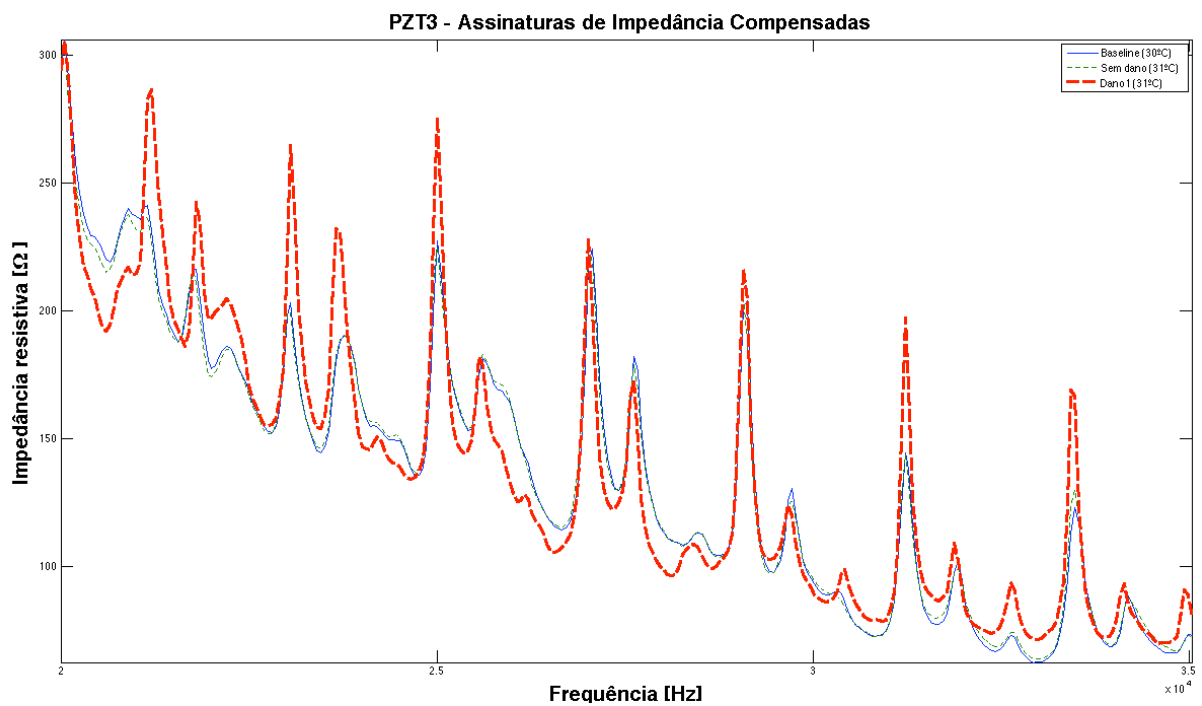


Figura 4.33 – Assinaturas de Impedância do PZT3 com compensação térmica para Diagnóstico 2 – Pannel aeronáutico.

As métricas de dano CCD e RMSD para o PZT1 através do Diagnóstico 2 são ilustradas na Figura 4.34 e Figura 4.35, respectivamente.

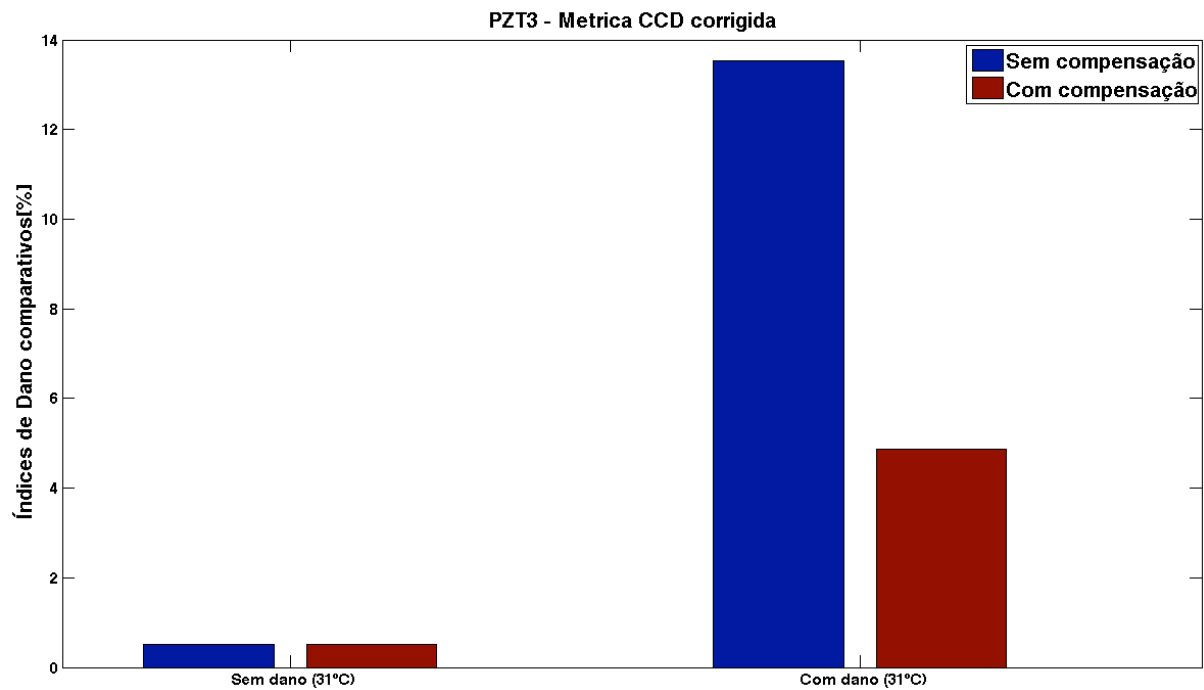


Figura 4.34 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 2 – PZT3.

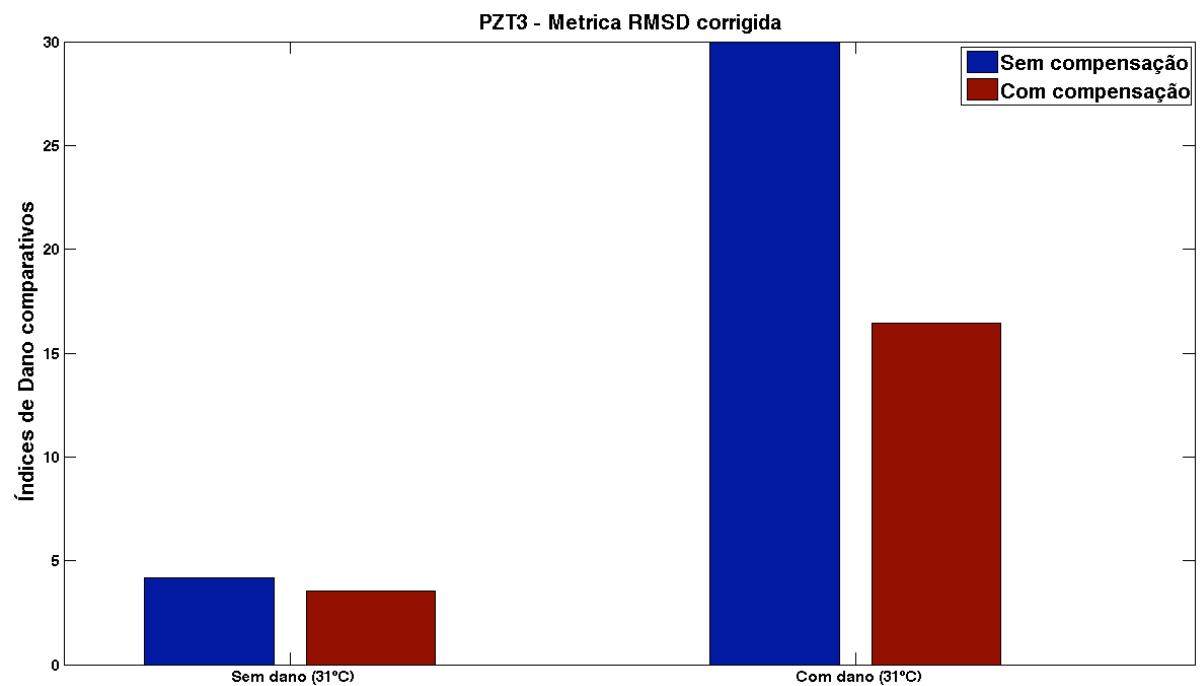


Figura 4.35 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 2 – PZT3.

De modo similar aos dados obtidos pelo PZT1, os resultados do Diagnóstico 2 são satisfatórios quando comparados ao Diagnóstico 1, pois observa-se que entre os casos sem dano e com dano (referindo-se ao dano 1), as métricas de dano foram suficientemente sensíveis, aumentando os valores correspondentes. Assim, a métrica CCD aumentou de 0,524% para 4,87% entre os casos sem dano e com dano. Já a métrica RMSD aumentou de 3,53 para 16,4.

A Tabela 4.6 resume o resultado dos 2 Diagnósticos para o PZT3, em relação ao Dano 1:

Tabela 4.6 – Diagnósticos do PZT3.

	CCD Sem dano	CCD Com dano	RMSD Sem dano	RMSD Com dano
Diagnóstico 1	3,79%	8,35%	20,6	26,9
Diagnóstico 2	0,524%	4,87%	3,53	16,4

De modo similar ao observado nos dados obtidos a partir do PZT1, nota-se que o Diagnóstico 2 apresentou métricas de dano mais coerentes com a configuração estrutural testada, de modo que o sistema apresenta maior robustez quanto à influência da temperatura para as condições realizadas nos testes.

Buscou-se aqui apresentar apenas os dados que apresentaram variação significativa, evitando repetições desnecessárias. Lembra-se que a totalidade dos dados obtidos para os demais transdutores piezelétricos é apresentada no Anexo II desta dissertação.

De um modo geral, pode-se observar que as assinaturas de impedância compensadas não alinham-se perfeitamente aos *baselines* de referência. No entanto, pode-se claramente observar a diferença entre os casos intactos na presença de variação da temperatura com um caso em que um dano estrutural se encontra presente através desta técnica de compensação. Por outro lado, esta distinção se torna difícil de ser feita sem a compensação dos efeitos térmicos. Como pôde ser notado nas métricas de dano de diversos estudos de caso neste trabalho, a variação da temperatura poderia levar a uma conclusão incorreta a respeito da integridade estrutural fornecida pelo sistema de SHM baseado na impedância (falso negativo), de modo que um dano poderia facilmente deixar de ser detectado devido aos efeitos térmicos. Situação inversa também poderia ocorrer, ou seja, o sistema apontar um dano sem que sua real ocorrência seja comprovada. A técnica de compensação implementada minimiza as variações nas métricas de dano de forma significativa e torna o sistema capaz de fornecer sinais mais significativos para indicar a

presença de dano estrutural em condições reais de aplicação de uma estrutura de engenharia.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho, além de perspectivas de continuidade do mesmo.

Neste trabalho de mestrado a técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica foi investigada considerando a influência da variação da temperatura. Foi constatado experimentalmente que a mudança de temperatura influencia significativamente tanto os transdutores de PZT como a estrutura monitorada. Neste sentido, mudanças de temperatura causam deslocamentos verticais e horizontais do padrão da assinatura de impedância no domínio da frequência, enquanto que o dano estrutural provoca mudanças abruptas. Por isto, a técnica de compensação baseada em análise de correlação, proposta por Park (1999) e otimizada por Koo (2009) foi implementada e sua eficácia foi investigada neste trabalho.

No capítulo 1 foi introduzido o tema monitoramento de integridade estrutural (SHM), bem como o objetivo da dissertação. Desta forma a apresentação deste tema assim como as necessidades de se implementar melhorias às técnicas de SHM foram discutidas.

O capítulo 2 apresentou a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho, além de discorrer sobre o estado da arte da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. Pode-se considerar que foram abordados os tópicos mais essenciais, facilitando uma melhor e mais ampla compreensão do assunto.

Já no capítulo 3, o efeito da temperatura sobre a técnica estudada foi investigado em detalhes, desde sua influência nos materiais piezelétricos como na própria estrutura monitorada. Uma revisão de trabalhos anteriores relacionados também foi feita, de modo que esta auxiliou na seleção da técnica de compensação que foi posteriormente

implementada no sistema de monitoramento de danos desenvolvido pela equipe do LMEst-UFU. A técnica de compensação da temperatura, denominada de “deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação” foi assim apresentada em detalhes e, em seguida, foi implementada nas lógicas de pós processamento do sistema de detecção de danos. Após sua implementação, buscou-se primeiramente verificar a ocorrência de histerese quando uma estrutura se submete a ciclos sequenciais de aquecimento/resfriamento. Utilizando-se uma estrutura simples constituída por uma viga de alumínio, notou-se que as assinaturas de impedância, e conseqüentemente as métricas de dano calculadas, sofreram pequenas variações entre três ciclos realizados em dias diferentes para a mesma estrutura. Da mesma forma, em testes com outras estruturas mais complexas, observou-se a mesma tendência, de modo que as assinaturas de impedância sofrem deslocamentos horizontais e verticais similares para as mesmas variações de temperatura. Entretanto, variações nas amplitudes de alguns picos de ressonância podem também ser observados, embora, felizmente, estas variações causam pouca variação nas métricas de dano analisadas.

Em seguida, a técnica de compensação da temperatura implementada foi testada numa extensa faixa de temperatura com o auxílio de uma câmara climática, onde a faixa variou de -30°C a +55°C em passos de 5°C, usando-se como corpo de prova uma placa de alumínio retangular. A técnica mostrou significativa redução das métricas de dano ao longo de toda a faixa de temperatura com o uso de apenas um *baseline*. No entanto, nesta etapa a influência de um dano estrutural não foi avaliada, pois o objetivo desta etapa do trabalho foi o de simplesmente verificar a eficácia da técnica de compensação em função da variação da temperatura em uma estrutura intacta. Notou-se que, à medida que o gradiente de temperatura se torna maior, a técnica tem menor redução percentual da métrica de dano. Neste ponto, cabe ressaltar que para se definir qual seria a capacidade da técnica em distinguir o efeito da temperatura de um dano estrutural real está diretamente sujeita à sensibilidade desejada para o sistema de detecção de danos com relação à faixa de temperatura a que a estrutura é sujeita em suas condições normais de operação. Isto levou aos estudos mais aprofundados da capacidade da técnica realizados no capítulo seguinte.

No capítulo 4, a técnica de compensação da temperatura foi investigada com maiores detalhes. Primeiramente, foi estudada a influência não somente da temperatura, como também da faixa de frequência selecionada para o monitoramento. Foi constatado, ao se fazer a medição com uma ampla faixa de monitoramento, que os deslocamentos horizontais devido às variações térmicas não são uniformes ao longo da frequência. Desta forma, a técnica de compensação da temperatura tecnicamente funciona melhor em bandas de frequência menores, em geral, de 2 kHz a 15 kHz de banda. Com isto, deve-se ressaltar a grande importância de selecionar adequadamente a faixa de frequência de

monitoramento, pois com a limitação da largura de banda imposta pela técnica de compensação da temperatura, a faixa selecionada deve conter a maior quantidade de picos e vales. Deste modo, a faixa considerada representa satisfatoriamente (quantidade de informação) a saúde estrutural quando responde dinamicamente à excitação provocada pelas pastilhas de PZT. Métodos para superar esta limitação, entretanto, estão sendo desenvolvidos pela equipe LMEst-UFU.

Posteriormente, uma estrutura complexa de fuselagem de um painel aeronáutico em alumínio foi testada em diferentes temperaturas com a técnica de compensação implementada. Aplicando-se diferentes níveis de dano, observou-se que, após a compensação da temperatura, utilizando-se somente um *baseline* medido a uma temperatura distante das condições de dano realizadas, o sistema de detecção de danos não foi capaz de detectar o dano no PZT1 colado ao painel da estrutura, embora o PZT3 tenha obtido resultados melhores em seu diagnóstico. Isto se deve ao fato de que o PZT3 foi instalado em uma viga de reforço, o que implica que, naturalmente, sua assinatura de impedância contém mais picos e vales, sendo portanto mais rica em informações sobre o comportamento dinâmico da estrutura, diferentemente do PZT1. No entanto, notou-se que, ao utilizar-se um sistema de diagnóstico diferente, gravando-se um novo *baseline* a cada 10°C, as métricas de dano tornaram-se muito mais pronunciadas entre os casos sem dano e com dano, para ambos os PZTs. Assim, nota-se uma necessidade importante em se adquirir *baselines* em diferentes temperaturas, quando possível, para integrar um sistema de monitoramento que seja mais robusto e confiável.

Para se realizar conclusões finais a respeito da capacidade do sistema em distinguir efeitos da temperatura em danos estruturais, o autor sugere o uso de técnicas estatísticas tais como a análise de *outlier*, ou teste de hipóteses com análise de variância (ANOVA), como pode ser observado em alguns trabalhos da área. Esta abordagem, entretanto, não foi realizada neste trabalho, de modo que será objeto de estudos futuros para, principalmente, dar fundamento às técnicas de Probabilidade de Detecção, que também fazem parte do escopo do trabalho da equipe LMEst-UFU no contexto dos projetos de pesquisa em que esse trabalho de mestrado está inserido.

A maior contribuição deste trabalho está relacionada ao estudo da eficácia da técnica de compensação da temperatura por análise de correlação no método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância, considerando não apenas a variação da temperatura, como também a faixa de monitoramento levada em consideração. Foi evidenciada a necessidade de usar mais de um *baseline* em diferentes temperaturas para se obter um diagnóstico final mais confiável. Para isso, o uso das métricas RMSD e CCD em conjunto é aconselhado, uma vez que a métrica CCD é extremamente sensível à variação

da temperatura, ao passo que a métrica RMSD tem maior sensibilidade a uma mudança abrupta na assinatura de impedância, característica típica de um dano estrutural.

Como conclusão final, o efeito da variação térmica pode ser significativamente reduzido com o uso de técnicas de compensação da temperatura, embora seja extremamente importante que o sistema de detecção de danos possua assinaturas de impedância de *baseline* de condições intactas em diferentes temperaturas para uma maior confiabilidade em seu diagnóstico. Assim, desenvolvimentos no sentido de melhorar o nível de prontidão tecnológica do método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância são ainda necessários. Além disto, fica evidente a carência de desenvolvimento de modelos numéricos para auxiliar na obtenção de sinais de referência para as estruturas. Isto se deve ao fato da complexidade do acoplamento termo-eleto-mecânico, além das elevadas frequências utilizadas no monitoramento de falhas incipientes. Ainda, considerando que os modelos numéricos mais precisos baseiam-se em técnicas de análise modal e que os casos avaliados se restringem apenas a vigas unidimensionais, as técnicas empíricas aparecem como a única alternativa para o monitoramento de estruturas complexas, contemplando situações práticas. Neste contexto, esta dissertação buscou aperfeiçoar o nível de robustez da técnica contemplando os grandes desafios hoje enfrentados pela indústria no monitoramento de falhas ainda incipientes. Estudos posteriores deverão ser realizados no sentido de tornar o processo de monitoramento tecnologicamente viável, em busca de melhorias concretas para os programas de manutenção das estruturas de engenharia, e principalmente, fornecer maior segurança à operação destas estruturas. Evidentemente, no caso das estruturas aeronáuticas, esta necessidade é evidente.

Deve-se observar que o trabalho realizado implicou a realização de experimentos de longa duração com sistemas mecatrônicos inteligentes, envolvendo o uso de uma câmara climática, desenvolvimento de software para aquisição de dados, além de software para pré-processamento e pós-processamento de sinais. É ainda importante mencionar que todo o trabalho foi realizado dentro de um laboratório de pesquisa para atender a um projeto específico de interesse da indústria aeronáutica. Este conjunto de atividades de pesquisa científica aplicada, juntamente com o contexto de sua execução, revelou-se extremamente formador e capaz de fornecer ao mestrando uma oportunidade ímpar.

5.1. Perspectivas Futuras

Como perspectivas para trabalhos futuros, pode-se mencionar:

- Extensão das técnicas de compensação de temperatura buscando ampliar o escopo da técnica já existente, incluindo o uso de técnicas de extração de características e reconhecimento de padrões, tornando o sistema de detecção de danos pouco sensível a padrões relacionados com a influência da temperatura ou com as condições de contorno, mas sensível ao dano estrutural. O estudo do uso de várias técnicas de compensação simultaneamente deve ser empreendido. Neste caso, não apenas a influência da temperatura pode ser avaliada, mas também o efeito de vibração, carregamentos estáticos e dinâmicos, bem como outras condições operacionais da estrutura.
- O uso de técnicas de redes neurais artificiais e de técnicas de agrupamento de dados pode contribuir para o reconhecimento de padrões. Estas ferramentas podem auxiliar na estimativa de assinaturas de impedância (*baselines*) em temperaturas que não foram previamente armazenadas na memória do sistema de detecção de danos, tornando assim o procedimento ainda mais robusto. Ainda pensando na estimação de assinaturas de impedância, o coeficiente de correlação, juntamente com técnicas de interpolação, pode ser utilizado para obter *baselines* equivalentes a temperaturas que não foram previamente adquiridos.
- Diagnóstico de sensores: É muito importante garantir o pleno funcionamento da rede de sensores durante o processo de monitoramento. Este cuidado diminui a incidência de falsos diagnósticos que podem comprometer a confiabilidade do procedimento. Neste sentido, pode-se mencionar a implementação de lógicas de auto diagnóstico dos sensores no software de monitoramento em nível de pré-processamento dos dados.
- Aumento da confiabilidade do processo de detecção de danos: O processo de monitoramento deve ser capaz, através de ferramentas de estatística, de definir um limiar de dano detectável para as métricas utilizadas para as condições impostas ao processo de avaliação. Pode-se mencionar o estudo da influência de fatores como confiabilidade de longo termo, durabilidade dos transdutores piezelétricos, efeitos de envelhecimento, fadiga, despolarização, dentre outros.
- Desenvolver uma metodologia para avaliar a região de sensoriamento.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, D. E. **Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications**. Purdue University, USA. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.

ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Application of Electromechanical Impedance Technique for Engineering Structures: Review and Future Issues. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 21, n. 1, p. 41-59, fev. 2010.

ATCP Engenharia Física. **Materiais e Dispositivos Piezoelétricos: Fundamentos e Desenvolvimento**. São Carlos, 2004. 17 p. Apostila 3 da fase 1.

BANKS, H. T.; SMITH, R.C.; WANG, Y. **Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control**. Paris: John Wiley & Sons, 1996.

BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; ALMEIDA, V. A. D.; ULSON, J. A. C. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Sensors** v. 14, p. 1208-1227, 2014.

BAPTISTA, F.; VIEIRA, J.; INMAN, D. J. Influence of excitation Signal on Impedance-based Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 21, n. 14, p. 1409-1416, nov. 2010.

BASTANI, A.; AMINDAVAR, H.; SHAMSHIRSAZ, M.; SEPEHRY, N. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health

monitoring using piezoelectric sensor array method. **Structural Health Monitoring**, v. 11, p. 305-314, 2012.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; ONG, C.W.; SOH, C. K. Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE. In: **Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems**, 2002, Melbourne, Australia.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of Structure-Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. In: **Proceedings ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems**, 2002, Bangalore, India (paper n. ISSS-SA-502).

BUSCH-VISHNIAC, I. J. **Electromechanical Sensors and Actuators: Mechanical Engineering Series**. Springer: Berlin, Germany, 1998; 343 p.

CHAUDHRY, Z.; JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C. Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches. In: **Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference**, 1995. San Diego, CA. Proceedings of SPIE. Vol.2443.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C. **Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors**. 1996. AIAA-1996-1074-CP.

DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B. A summary review of vibration-based damage identification methods. **Shock and Vibration Digest**, Thousand Oaks, v. 30, n. 2, p. 91-105, 1998.

DOSCH, J. J.; INMAN, D. J.; GARCIA, E. A Self sensing piezoelectric actuator for collocated control. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, n.3, p. 166-185. 1992.

FARRAR, C. R.; DOEBLING, S. W.; NIX, D. A. Vibration-based structural damage identification. **Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. London, v. 359, n. 1778, p. 131-149, 2001. doi:10.1098/rsta.2000.0717.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. T., An Introduction to Damage Prognosis. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp.1-12. 2005.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. London, v. 365, n.1851, p. 303-315, 2007. doi: 10.1098/rsta.2006.1928.

GIBILISCO, S. **Manual de Eletrônica e de Telecomunicações**. Reichmann e Affonso Editores, Brasil. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structure with the Electro-Mechanical Impedance Method. **Structural Health Monitoring**. v. 4(2), p. 99-118, 2005.

GIURGIUTIU, V.I ZAGRAI, A. Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 11. p. 959-976. 2000.

GIURGIUTIU, V.I ZAGRAI, A. Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification. **Journal of Vibration and Acoustics**. v. 124. p. 1-10. 2002.

GIURGIUTIU, V.I ZAGRAI, A.; BAO, J.J. Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. **International Journal of Structural Health Monitoring**. v. 1. p. 41-61. 2002.

GIURGIUTIU, V.I ZAGRAI, A.; BAO, J.J. REDMOND, J.; ROACH, D.; RACKOW, K. Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures. **International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management**. v. 6. n. 1. p. 3-21. 2003.

GONZALES, C. G. **Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas SHM utilizando a técnica da impedância eletromecânica (E/M)**. 2009. 166f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

GRISSE, B.; INMAN, D. J. Temperature Corrected Sensor Diagnostics for Impedance-based SHM. **Journal of Sound and Vibration**. v. 329, n. 12, p. 2323-2336, 2010.

GYEKENYESI, A.; MARTIN, R.; SAWICKI, J.; BAAKLINI, G. Memorando Técnico da NASA **“Damage Assessment of Aerospace Structural Components by Impedance-Based Health Monitoring”**. Ohio, USA, 2005. 13 p. NASA TM-2005-213579.

HONG, D. S.; NGUYEN, K. D.; LEE, I. C.; KIM, J. T. Temperature-compensated damage monitoring by using wireless acceleration-impedance sensor nodes in steel girder connection. **International Journal of Distributed Sensor Networks**. 2012, 167120:1-167120:12. 2012.

INMAN, D. J. **Smart structures: examples and new problems**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 16, 2001. Uberlândia. Anais... Uberlândia: ABCM, 2001.

KOO, K.-Y.; PARK, S.; LEE J.-J.; YUN, C.-B. Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2009. DOI: 10.1177/1045389X08088664. Fev. 2009.

KRISHNAMURTHY, K.; LALANDE, F.; ROGERS, C. A. **Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors**. In: Proc. SPIE 2717, Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems, 302 (mai. 1996); San Diego, CA. doi: 10.1117/12.239033.

LEO, D. **Engineering analysis of smart material systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 556p.

LEUCAS, L. F. **Utilização das Técnicas de Impedância eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebite**. 2009. 58f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. 1994. v. 5. p. 12-20.

LIM, H. J.; KIM, M. K.; SOHN, H.; PARK, C. Y. Impedance-based damage detection under varying temperature and loading conditions. **NDT&E International**. v. 44, p. 740-750, 2011.

LIU, X.; PAUROBALLY, R. Robust Damage Metric in Terms of Magnitude and Phase for Impedance-based Structural Health Monitoring. **Structural Health Monitoring**. v. 8. n. 4. p. 303-309, mar. 2009.

MASSOUD, M. **Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques**. Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. 1985. p. 4-14.

MOURA JR., J. R. V. **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. 158 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA JR., J. R. V. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais**. 2008. 264f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA JR., J. R. V.; STEFFEN JR., V. **Damage Detection Techniques for Aeronautic Structures**. In: IMAC-XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando – Florida – USA, 2005.

MOURA JR., J. R. V.; STEFFEN JR., V. Impedance-based Health Monitoring for Aeronautic Structures using Statistical Meta-modeling. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 17, p. 1023-1036, 2006.

MOURA JR., J. R. V.; STEFFEN JR., V. **Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation**. XXII IMAC. Dearborn, MI, USA. 2004.

NETO, R. M. F.; STEFFEN, V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V. A Low-cost Electromechanical Impedance-based SHM Architecture for Multiplexed Piezoceramic Actuators. **Structural Health Monitoring**. v. 10, n. 4, p. 391-401, 2011.

PALOMINO, L. V. **Análise das Métricas de Dano Associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para o Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 117 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L. V.; TSURUTA, K. M.; MOURA, J. R. V.; RADE, D. A.; STEFFEN, V.; INMAN, D. Evaluation of the Influence of Sensor Geometry and Physical Parameters on Impedance-based Structural Health Monitoring, **Shock and Vibration**. v. 19, p. 1-13, 2012.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 11. n. 6. p. 448-455. 2000b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**. v. 30. n. 10. p. 1463-1474. 2001.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures. In: **Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials**. Proceedings of the SPIE. v. 3670. p. 461-469. 1999b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**. v. 6. n. 4. p. 153-160. 2000a.

PARK, G.; INMAN, D.J. Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp. 1-12. 2005.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. v. 42. n. 42. p. 249-258. 1999a.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. Overview of Piezoelectric Impedance-based Health Monitoring and Path-Forward. **The Shock and Vibration Digest**. v. 35, Issue 6. 2003. p. 85-92.

PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B.; INMAN, D. J. Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA-Data Compression and *k*-means Clustering Algorithms. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. DOI: 10.1177/1045389X11421814. Mar. 2008.

PEAIRS, D. M. **High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring**. 2006. 150 f. Tese de Doutorado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S. Effects of Elevated Temperature on Guided-Wave Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 19. n. 12. p. 1383-1398, Dez. 2008.

RAJU, V. **Implementing Impedance-Based Health Monitoring**. 1997. 224 f. Dissertação de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; ABDOLLAHI, F. Temperature Variation Effect Compensation in Impedance-Based Structural Health Monitoring Using Neural Networks. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. DOI: 10.1177/1045389X11421814. Set. 2011.

SOH, C. K.; TSENG, K.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge. **Smart Materials and Structures**. v. 9. p. 533-542. 2000.

STASZEWSKI, W. J.; BOLLER, C.; TOMLINSON, G. R. **Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing**. Department of Mechanical Engineering, Sheffield University, UK. John Wiley & Sons, Ltd., 2004.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 6. p. 134-139. 1995.

TSURUTA, K. M. **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica de Impedância Eletromecânica**. 2008. 114 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

XU, Y. G.; LIU, G. R. A modified electro-mechanical impedance modelo f piezoelectric actuator-sensors for debonding detection of composite sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 13, n. 6, p. 389-396, 2002.

YANG, Y.; LIM, Y. Y.; SOH, C. K. Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment. **Smart Materials and Structures**. v. 17, n. 3. doi:10.1088/0964-1726/17/3/035008. Mar. 2008.

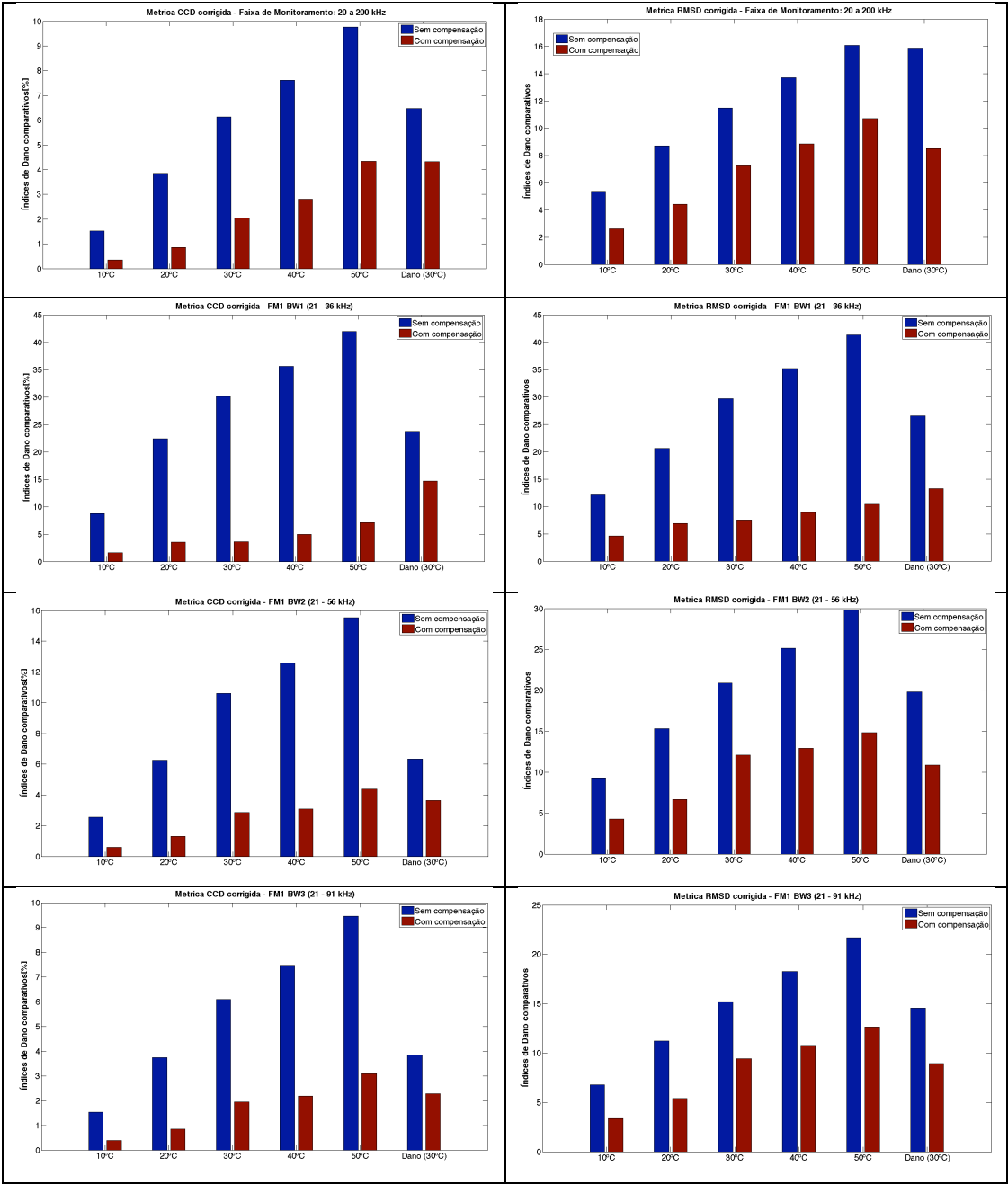
ZHOU, D.; KIM, J. K.; HA, D. S.; QUESENBERRY, J. D.; INMAN, D. J. A System Approach for Temperature Dependency of Impedance-Based Structural Health Monitoring. In: **Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2009**, Proceedings of the SPIE v. 7293, doi: 10.1117/12.816285. 2009.

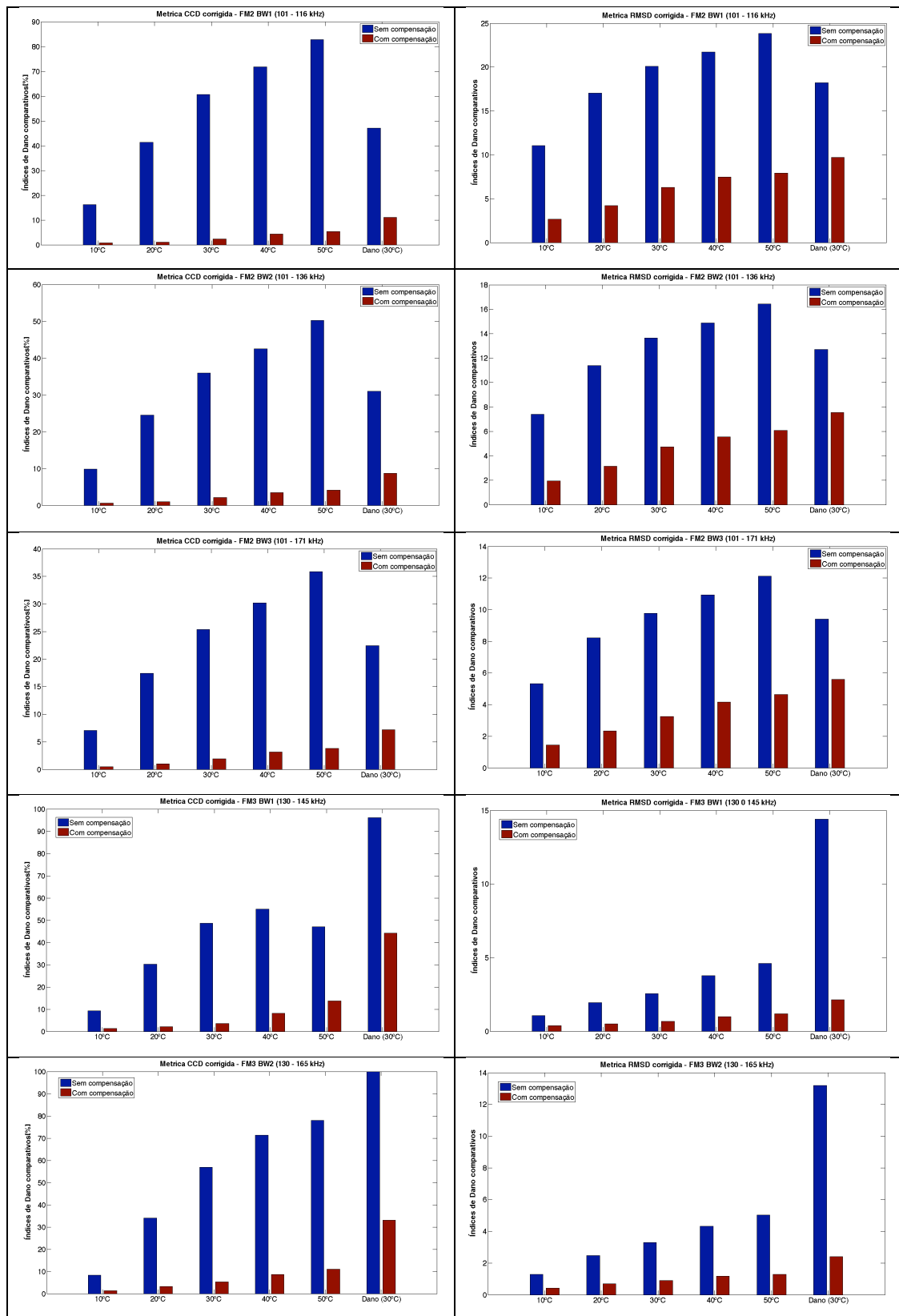
Anexo I

MÉTRICAS DE DANO PARA ENSAIO COM DISTINTAS LARGURAS DE BANDA

Neste anexo são apresentados os gráficos das métricas calculadas para a Viga de Alumínio com cada Faixa de monitoramento especificadas no capítulo 4.

Tabela A.1 – Métricas de dano RMSD e CCD comparadas ao baseline medido a 0°C (Diagnóstico 1).





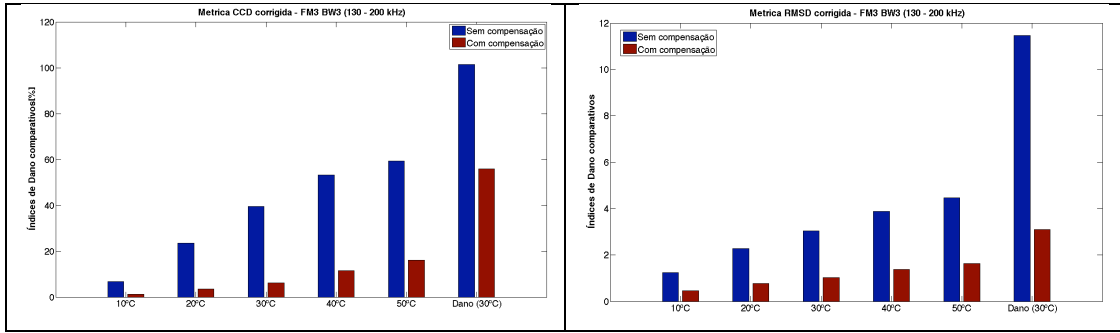
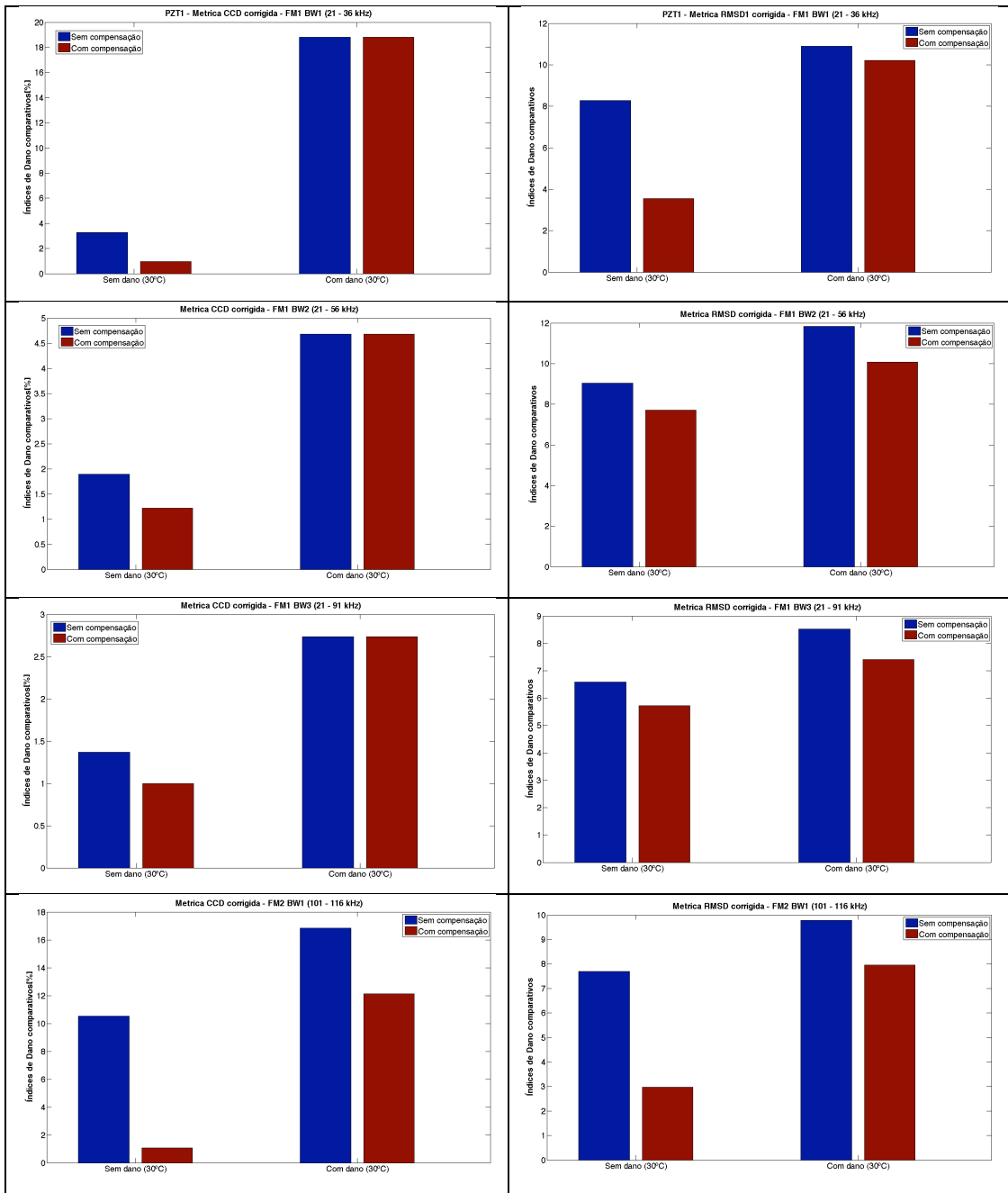
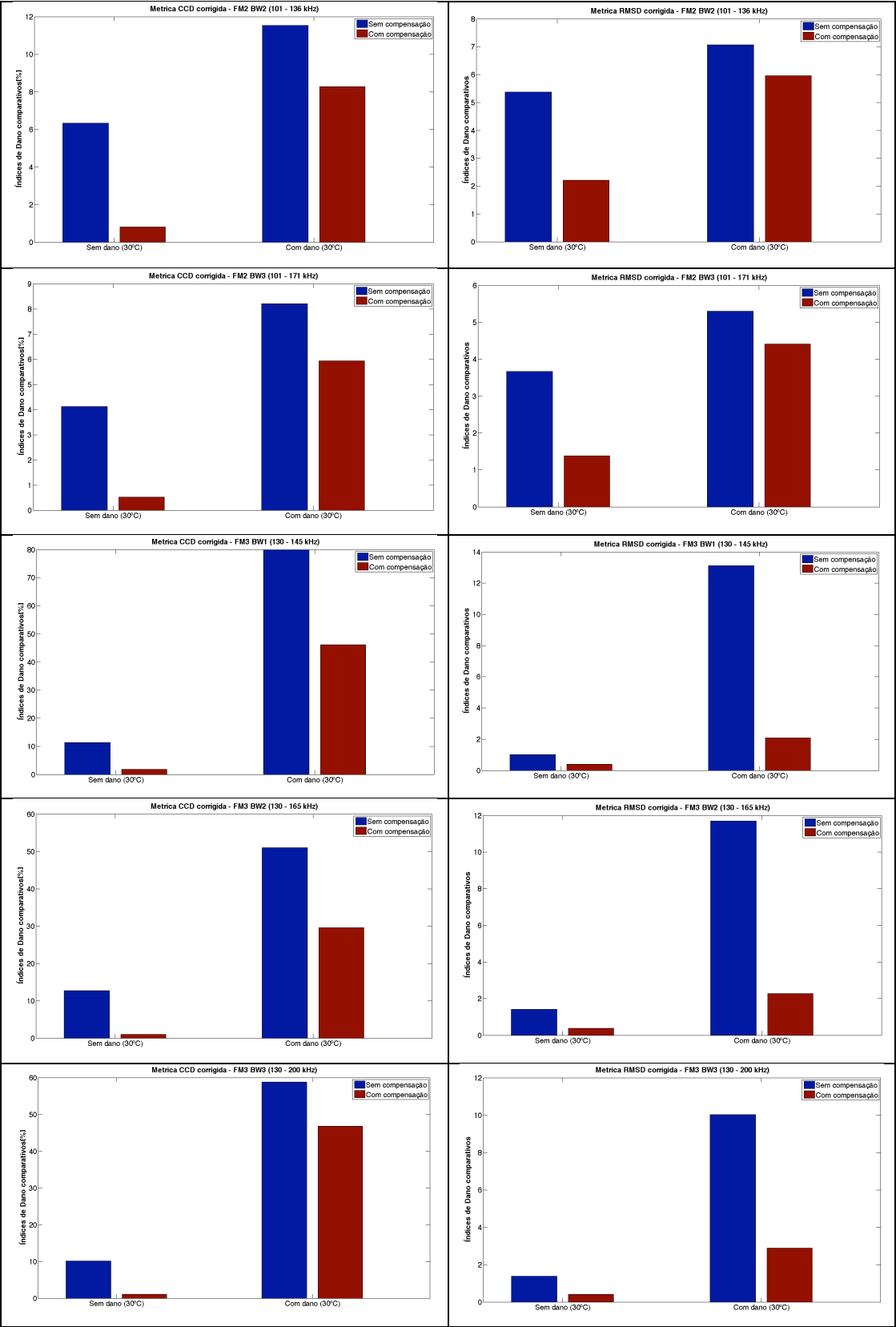


Tabela A.2 – Métricas de dano RMSD e CCD comparadas ao baseline medido a 20°C (Diagnóstico 2).





Anexo II

MÉTRICAS DE DANO PARA ENSAIO COM PAINEL AERONÁUTICO

Neste anexo são apresentados os gráficos das métricas calculadas para o Painel Aeronáutico para cada sensor PZT conforme descrito no capítulo 4.

Tabela A.3 – Métricas de dano RMSD e CCD PZT1.

