

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

“Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões”

Carlos Otávio Damas Martins

Tese para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

“Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões”

CARLOS OTÁVIO DAMAS MARTINS

Engenheiro de Materiais

Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2008

II

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly – UFRGS – RS.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker – UFRGS – RS

Prof. Dr. Rogério Machado – InMetro – RJ

Prof. Dr. Romeu Silva – Centro de Tecnologia SENAI-RJ Solda

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico esta conquista à memória de Nilvia D. Martins (Minha Mãe).

*Que, acima de todas as coisas,
ensinou-me a acreditar e a lutar pelos meus sonhos...*



AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly, por toda a confiança, orientação e ensinamentos;

Ao Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker pelo apoio e ensinamentos transmitidos;

Ao Dr. Ing. Thomas K. Hirsch (IWT – Bremen) por, dentre tantas coisas, ter me ensinado a diferença entre 98 e 100%;

Aos amigos e membros da Banca Examinadora (Dr. Romeu Ricardo Silva e Dr. Rogério Machado) pelas contribuições que elevaram a qualidade deste trabalho;

A Petrobras S/A, em especial aos pesquisadores: Claudio Camerini, João Marcio, Daniel Pipa, Gustavo Pires, Marcelo Piza, Rodrigo Hoppe, Fabrício dos Santos e Ilson Palmiéri;

A Forjas Taurus S/A e ao Laboratório de Magnetismo da UFRGS;

Ao Prof. Dr. Carlos P. Bergmann por todo o apoio e incentivo fornecido durante este pequeno período (11 anos) em que fui aluno da UFRGS;

Aos amigos do PPGEM, FAURGS, UFRGS;

Aos Professores Linilson Padovese (USP), Frank Missel (UCS), Marcos Telló (PUC-RS), Luis Gustavo (UFRGS), Sidia M. C. Jacques (UFRGS), José Ruzzante (CNEA) e Maria Isabel (CNEA) por todo apoio e incentivo;

Aos colegas do LAMEF–UFRGS, em especial para: Sandro, Gilnei, Cerviéri, “Sonaldo”, Rogério, “Cicinho” e Vinicius Milani.

Aos amigos Jorge Braz, Mario Wolfart, Sérgio Damasceno, Luis Vieira e Accacio Neto pelo apoio, confiança e incentivo nos momentos difíceis;

Aos amigos Álvaro Meneguzzi, Giovane Gonçalves e Miguel Basso por todos os ensinamentos passados durante meu período como Iniciação Científica;

Aos amigos Toni e Elisangela por toda paciência, caráter e dedicação que me motivaram a buscar sempre o melhor;

Ao CNPq, FINEP, CAPES e ANP pelo apoio financeiro e confiança na pesquisa brasileira.

Em especial à minha família, por toda ajuda carinho, incentivo e compreensão durante mais esta jornada.

“Nós fomos desacreditados durante toda esta trajetória...

Só tenho uma coisa para dizer àqueles descrentes:

Nunca subestime o coração de um vencedor!”

Rudy Tomjanovich

Técnico Campeão da NBA em 1995

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| AGRADECIMENTOS | V |
| SUMÁRIO..... | VII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABELAS | XV |
| LISTA DE EQUAÇÕES | XVI |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS..... | XIX |
| RESUMO..... | XXI |
| ABSTRACT | XXII |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 Objetivo geral..... | 3 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 2.3 Divisão do Trabalho | 3 |
| 2.4 Motivação..... | 4 |
| 2.5 Justificativa | 4 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 3.1 Risers Flexíveis..... | 5 |
| 3.1.1 A trajetória da Produção Off shore no Brasil..... | 5 |
| 3.1.2 Tecnologia de Risers Flexíveis | 6 |
| 3.1.3 Características Técnicas..... | 7 |
| 3.1.4 Mecanismos de Falhas de Risers Flexíveis..... | 9 |
| 3.1.5 Análise de Tensões em Risers Flexíveis | 13 |
| 3.2 Métodos Magnéticos | 16 |
| 3.2.1 Generalidades..... | 16 |
| 3.2.2 Teoria dos Domínios Magnéticos..... | 17 |
| 3.2.3 Paredes de Domínios Magnéticos | 18 |
| 3.2.4 3MA | 21 |
| 3.2.5 Sensor Micromagnético | 32 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4 | PARTE EXPERIMENTAL..... | 34 |
| 4.1 | Procedimento..... | 34 |
| 4.2 | Metodologia | 34 |
| 4.3 | Hipóteses | 35 |
| 4.4 | Materiais | 36 |
| 4.5 | Métodos | 40 |
| 4.6 | Projeto de Experimentos..... | 40 |
| 4.6.1 | Formulação do Projeto..... | 41 |
| 4.7 | Matriz Experimental | 41 |
| 4.7.1 | Análise dos Parâmetros Magnéticos..... | 43 |
| 4.7.2 | Análise da influência do Encruamento..... | 44 |
| 4.7.3 | Análise da Influência da Microestrutura | 45 |
| 4.7.4 | Análise da influência do Lift Off..... | 46 |
| 5 | RESULTADOS..... | 47 |
| 5.1 | Análise dos Parâmetros Magnéticos..... | 48 |
| 5.1.1 | Apresentação dos Resultados | 48 |
| 5.1.2 | Análise Estatística..... | 64 |
| 5.1.3 | Regressão Multi-Linear | 66 |
| 5.2 | Análise da influência do Encruamento e da Microestrutura | 69 |
| 5.2.1 | Apresentação dos Resultados | 69 |
| 5.2.2 | Análise Estatística..... | 86 |
| 5.2.3 | Regressão Multi-Linear | 87 |
| 5.3 | Análise da influência do Lift off | 91 |
| 5.3.1 | Apresentação dos Resultados | 92 |
| 5.3.2 | Análise Estatística..... | 95 |
| 5.3.3 | Regressão Multi-Linear | 96 |
| 6 | DISCUSSÃO | 99 |
| 7 | CONCLUSÕES | 104 |
| 8 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 105 |
| 9 | REFERÊNCIAS..... | 106 |
| 10 | ANEXO 1..... | 112 |
| 11 | ANEXO 2 | 118 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Sistemas produção de petróleo “Off Shore” (da esquerda para a direita temos: Plataforma fixa, Navio de produção FPSO e Plataforma semi-submersível). 6 | |
| Figura 2: Configuração típica de um duto flexível do tipo Unbonded ¹⁰ . _____ | 7 |
| Figura 3: Montagem em campo do sistema de conexão de um Riser Flexível ¹¹ . ____ | 8 |
| Figura 4: Sistema de conexão geral de dutos flexíveis às plataformas Off shore. __ | 9 |
| Figura 5: Plataforma P-50 – Unidade de Produção e Estocagem (FPSOs -“Floating Production Storage and Offloading”) ¹² . _____ | 12 |
| Figura 6: a) Ruptura da camada protetora de um Riser flexível; b) Ruptura dos arames da armadura de tração na região adjacente ao conector ¹ . _____ | 13 |
| Figura 7: Resistência residual x perda de área da armadura de tração para amostras de Flowline de 4 polegadas ¹³ . _____ | 13 |
| Figura 8: Princípios do sistema de monitoramento da integridade de Risers flexíveis baseado na utilização de sensores de fibra óptica ¹⁶ . _____ | 15 |
| Figura 9: Relação entre as propriedades mecânicas e micromagnéticas para materiais ferromagnéticos ²³ . _____ | 16 |
| Figura 10: Representação da Curva de Histerese para um material ferromagnético ²⁹ . _____ | 18 |
| Figura 11: Representação das paredes de domínios em materiais ferromagnéticos ²² . _____ | 19 |
| Figura 12: Curva de histerese de um material ferromagnético ²³ . _____ | 20 |
| Figura 13: Relação de sinais medidos através da técnica micromagnética 3MA ²³ . _____ | 21 |
| Figura 14: Influência do estado de tensões residuais e da dureza na curva de Histerese e na amplitude do sinal Barkhausen ⁴⁵ . _____ | 25 |

| | |
|---|----|
| Figura 15: Comparação entre técnicas de análises de tensões residuais em anéis para rolamentos ⁵⁴ . | 26 |
| Figura 16: Distorção da indução magnética causada pela não-linearidade da curva de Histerese ⁴⁰ . | 27 |
| Figura 17: Relação entre a forma da onda do campo magnético tangencial $H_t(t)$ e da indução magnética $B(t)$ ²³ . | 27 |
| Figura 18: Efeito da profundidade de pele para a técnica de correntes parasitas, onde CA é a corrente alternada aplicada na bobina a fim de gerar o campo magnético externo ⁵⁹ . | 30 |
| Figura 19: Relação entre a curva de histerese e a variação incremental da permeabilidade magnética ²³ . | 31 |
| Figura 20: Princípio do processo de análise dos efeitos da magnetização em materiais ferromagnéticos. | 33 |
| Figura 21: Configuração do sensor magnético utilizado no Método Micromagnético, Onde: (1) corresponde ao núcleo da unidade de magnetização, (2) corresponde a bobina de excitação da unidade de magnetização, (3) corresponde ao detector de fluxo magnético, (4) é a bobina sensora e (5) o núcleo ferromagnético desta bobina ²⁸ . | 33 |
| Figura 22: Sensor micromagnético especialmente desenvolvido. | 33 |
| Figura 23: Microestruturas, obtidas por microscopia óptica, dos materiais analisados, ataque Nital 2%. | 37 |
| Figura 24: Curvas de tração x deformação para as amostras de aço ABNT 1060. | 38 |
| Figura 25: Curvas de histerese para as amostras de aço ABNT 1060. | 39 |
| Figura 26: Equipamento micromagnético 3MA – II e um sensor micromagnético especialmente desenvolvido para este trabalho. | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 27: Dispositivo de Fixação de Sensor Magnético especialmente desenvolvido para este trabalho. _____ | 42 |
| Figura 28: Comparação entre os desvios padrões dos resultados micromagnéticos obtidos com diferentes sistemas de fixação de amostra. _____ | 42 |
| Figura 29: Configuração dos equipamentos utilizados durante os ensaios de tração das tiras da armadura de tração de Risers flexíveis de 6". _____ | 44 |
| Figura 30: Posicionamento do sensor durante os ensaios com simulação de lift off. _____ | 46 |
| Figura 31: Variação de V_{mag} em função do carregamento (AHCT). _____ | 48 |
| Figura 32: Variação de A_3 em função do carregamento (AHCT). _____ | 48 |
| Figura 33: Variação de A_5 em função do carregamento (AHCT). _____ | 49 |
| Figura 34: Variação de A_7 em função do carregamento (AHCT). _____ | 49 |
| Figura 35: Variação de P_3 em função do carregamento (AHCT). _____ | 50 |
| Figura 36: Variação de P_5 em função do carregamento (AHCT). _____ | 50 |
| Figura 37: Variação de P_7 em função do carregamento (AHCT). _____ | 51 |
| Figura 38: Variação de SAH em função do carregamento (AHCT). _____ | 51 |
| Figura 39: Variação de K em função do carregamento (AHCT). _____ | 52 |
| Figura 40: Variação de H_{co} em função do carregamento (AHCT). _____ | 52 |
| Figura 41: Variação de H_{ro} em função do carregamento (AHCT). _____ | 53 |
| Figura 42: Variação de μ_{max} em função do carregamento (AIP). _____ | 53 |
| Figura 43: Variação de $\mu_{médio}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 54 |
| Figura 44: Variação de μ_r em função do carregamento (AIP). _____ | 54 |
| Figura 45: Variação de $\Delta H_{25\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 55 |
| Figura 46: Variação de $\Delta H_{50\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 55 |
| Figura 47: Variação de $\Delta H_{75\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 56 |
| Figura 48: Variação de H_{cu} em função do carregamento (AIP). _____ | 56 |

| | | |
|---|-------|----|
| Figura 49: Variação de Re_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$. | _____ | 57 |
| Figura 50: Variação de Im_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$. | _____ | 57 |
| Figura 51: Variação de Mag_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$. | ___ | 58 |
| Figura 52: Variação de Ph_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$. | _____ | 58 |
| Figura 53: Variação de Re_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$. | _____ | 59 |
| Figura 54: Variação de Im_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$. | _____ | 59 |
| Figura 55: Variação de Mag_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$. | __ | 60 |
| Figura 56: Variação de Ph_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$. | _____ | 60 |
| Figura 57: Variação de Re_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$. | _____ | 61 |
| Figura 58: Variação de Im_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$. | _____ | 61 |
| Figura 59: Variação de Mag_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$. | __ | 62 |
| Figura 60: Variação de Ph_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$. | ___ | 62 |
| Figura 61: Variação de Re_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. | _____ | 63 |
| Figura 62: Variação de Im_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. | _____ | 63 |
| Figura 63: Variação de Mag_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. | __ | 64 |
| Figura 64: Variação de Ph_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. | _____ | 64 |
| Figura 65: Resultados obtidos para o teste de validação das regressões lineares através da análise micromagnética do estado de tensões para diferentes configurações de parâmetros de controle. | _____ | 68 |
| Figura 66: Variação de V_{mag} em função do carregamento (AHCT). | _____ | 69 |
| Figura 67: Variação de A_3 em função do carregamento (AHCT). | _____ | 69 |
| Figura 68: Variação de A_5 em função do carregamento (AHCT). | _____ | 70 |
| Figura 69: Variação de A_7 em função do carregamento (AHCT). | _____ | 70 |
| Figura 70: Variação de P_3 em função do carregamento (AHCT). | _____ | 71 |
| Figura 71: Variação de P_5 em função do carregamento (AHCT). | _____ | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 72: Variação de P_7 em função do carregamento (AHCT). _____ | 72 |
| Figura 73: Variação de SAH em função do carregamento (AHCT). _____ | 72 |
| Figura 74: Variação de K em função do carregamento (AHCT). _____ | 73 |
| Figura 75: Variação de H_{co} em função do carregamento (AHCT). _____ | 73 |
| Figura 76: Variação do parâmetro micromagnético em função do carregamento. _ | 74 |
| Figura 77: Variação de μ_{max} em função do carregamento (AIP). _____ | 74 |
| Figura 78: Variação de $\mu_{médio}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 75 |
| Figura 79: Variação de μ_r em função do carregamento (AIP). _____ | 75 |
| Figura 80: Variação de $\Delta H_{25\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 76 |
| Figura 81: Variação de $\Delta H_{50\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 76 |
| Figura 82: Variação de $\Delta H_{75\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 77 |
| Figura 83: Variação de $H_{c\mu}$ em função do carregamento (AIP). _____ | 77 |
| Figura 84: Variação de Re_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5kHz$. _____ | 78 |
| Figura 85: Variação de Im_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5kHz$. _____ | 78 |
| Figura 86: Variação de Mag_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5kHz$. ____ | 79 |
| Figura 87: Variação de Ph_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5kHz$. _____ | 79 |
| Figura 88: Variação de Re_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10kHz$. _____ | 80 |
| Figura 89: Variação de Im_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10kHz$. _____ | 80 |
| Figura 90: Variação de Mag_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10kHz$. ____ | 81 |
| Figura 91: Variação de Ph_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10kHz$. _____ | 81 |
| Figura 92: Variação de Re_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20kHz$. _____ | 82 |
| Figura 93: Variação de Im_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20kHz$. _____ | 82 |
| Figura 94: Variação de Mag_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20kHz$. ____ | 83 |
| Figura 95: Variação de Ph_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20kHz$. _____ | 83 |
| Figura 96: Variação de Re_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40kHz$. _____ | 84 |

| | |
|---|----|
| Figura 97: Variação de Im_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. _____ | 84 |
| Figura 98: Variação de Mag_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. ____ | 85 |
| Figura 99: Variação de Ph_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$. _____ | 85 |
| Figura 100: Resultado obtido para o teste de validação das regressões lineares. _ | 91 |
| Figura 101: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (AHCT). _____ | 92 |
| Figura 102: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (AIP). _____ | 93 |
| Figura 103: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (ACP). _____ | 93 |
| Figura 104: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (ACP). _____ | 94 |
| Figura 105: Resultado obtido para o teste de validação das regressões lineares. _ | 98 |
| Figura 106: Resultado obtido para o teste de validação das regressões lineares. _ | 98 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Relação entre a facilidade de aplicação e os tipos de técnicas não destrutivas empregadas para o monitoramento de Risers Flexíveis ⁸ . _____ | 14 |
| Tabela 2: Parâmetros de respostas obtidos através do método 3MA ²³ . _____ | 22 |
| Tabela 3: Profundidades típicas para o 3MA ²³ . _____ | 22 |
| Tabela 4: Composição química das amostras de arame da armadura de tração de Risers flexíveis. _____ | 36 |
| Tabela 5: Propriedades de interesse para as amostras de aço ABNT1060 com diferentes microestruturas. _____ | 39 |
| Tabela 6: Análise Estatística dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho. _____ | 65 |
| Tabela 7: Resultados das Regressões multi-lineares obtidas para as diferentes configurações de parâmetros. _____ | 66 |
| Tabela 8: Análise Estatística dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho. _____ | 86 |
| Tabela 9: Resultados das Regressões multi-lineares obtidas para as diferentes microestruturas. _____ | 87 |
| Tabela 10: Análise Estatística dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho. _____ | 95 |
| Tabela 11: Resultados das Regressões multi-lineares obtidas para as diferentes microestruturas _____ | 96 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1: Profundidade de Pele ²⁹ . _____ | 23 |
| Equação 2: Configuração – A, técnica – AHCT. _____ | 67 |
| Equação 3: Configuração – A, técnica – AIP. _____ | 67 |
| Equação 4: Configuração – A, técnica – ACP. _____ | 67 |
| Equação 5: Configuração – A, técnica – Todas. _____ | 67 |
| Equação 6: Configuração – B, técnica – AHCT. _____ | 67 |
| Equação 7: Configuração – B, técnica – AIP. _____ | 67 |
| Equação 8: Configuração – B, técnica – ACP. _____ | 67 |
| Equação 9: Configuração – B, técnica – Todas. _____ | 67 |
| Equação 10: Configuração – C, técnica – AHCT. _____ | 67 |
| Equação 11: Configuração – C, técnica – AIP. _____ | 67 |
| Equação 12: Configuração – C, técnica – ACP. _____ | 67 |
| Equação 13: Configuração – C, técnica – Todas. _____ | 68 |
| Equação 14: Configuração – D, técnica – AHCT. _____ | 68 |
| Equação 15: Configuração – D, técnica – AIP. _____ | 68 |
| Equação 16: Configuração – D, técnica – ACP. _____ | 68 |
| Equação 17: Configuração – D, técnica – Todas. _____ | 68 |
| Equação 18: Microestrutura – Ec, técnica – AHCT. _____ | 88 |
| Equação 19: Microestrutura – Ec, técnica – AIP. _____ | 88 |
| Equação 20: Microestrutura – Ec, técnica – ACP. _____ | 88 |
| Equação 21: Microestrutura – Ec, técnica – AHCT + AIP. _____ | 88 |
| Equação 22: Microestrutura – Ec, técnica – AHCT + ACP. _____ | 88 |
| Equação 23: Microestrutura – Ec, técnica – AIP + ACP. _____ | 88 |

| | |
|--|----|
| Equação 24: Microestrutura – Ec, técnica – Todas. _____ | 88 |
| Equação 25: Microestrutura – Re, técnica – AHCT. _____ | 88 |
| Equação 26: Microestrutura – Re, técnica – AIP. _____ | 89 |
| Equação 27: Microestrutura – Re, técnica – ACP. _____ | 89 |
| Equação 28: Microestrutura – Re, técnica – AHCT + AIP. _____ | 89 |
| Equação 29: Microestrutura – Re, técnica – AHCT + ACP. _____ | 89 |
| Equação 30: Microestrutura – Re, técnica – AIP + ACP. _____ | 89 |
| Equação 31: Microestrutura – Re, técnica – Todas. _____ | 89 |
| Equação 32: Microestrutura – Te, técnica – AHCT. _____ | 89 |
| Equação 33: Microestrutura – Te, técnica – AIP. _____ | 89 |
| Equação 34: Microestrutura – Te, técnica – ACP. _____ | 89 |
| Equação 35: Microestrutura – Te, técnica – AHCT + AIP. _____ | 89 |
| Equação 36: Microestrutura – Te, técnica – AHCT + ACP. _____ | 89 |
| Equação 37: Microestrutura – Te, técnica – AIP + ACP. _____ | 90 |
| Equação 38: Microestrutura – Te, técnica – Todos. _____ | 90 |
| Equação 39: Microestrutura – Es, técnica – AHCT. _____ | 90 |
| Equação 40: Microestrutura – Es, técnica – AIP. _____ | 90 |
| Equação 41: Microestrutura – Es, técnica – ACP. _____ | 90 |
| Equação 42: Microestrutura – Es, técnica – AHCT + AIP. _____ | 90 |
| Equação 43: Microestrutura – Es, técnica – AHCT + ACP. _____ | 90 |
| Equação 44: Microestrutura – Es, técnica – AIP + ACP. _____ | 90 |
| Equação 45: Microestrutura – Es, técnica – Todas. _____ | 90 |
| Equação 46: Lift off – 1 mm, técnica – ACP. _____ | 97 |
| Equação 47: Lift off – 1 mm, técnica – Todas. _____ | 97 |
| Equação 48: Lift off – 3 mm, técnica – ACP. _____ | 97 |

| | |
|--|----|
| Equação 49: Lift off – 3 mm, técnica – Todas. | 97 |
| Equação 50: Lift off – 5 mm, técnica – ACP. | 97 |
| Equação 51: Lift off – 5 mm, técnica – Todas. | 97 |
| Equação 52: Lift off – 7 mm, técnica – ACP. | 97 |
| Equação 53: Lift off – 7 mm, técnica – Todas. | 97 |
| Equação 54: Lift off – 9 mm, técnica – ACP. | 97 |
| Equação 55: Lift off – 9 mm, técnica – Todas. | 97 |
| Equação 56: Lift off – 11 mm, técnica – ACP. | 97 |
| Equação 57: Lift off – 11 mm, técnica – Todas. | 97 |
| Equação 58: Lift off – 13 mm, técnica – ACP. | 98 |
| Equação 59: Lift off – 13 mm, técnica – Todas. | 98 |
| Equação 60: Lift off – 15 mm, técnica – ACP. | 98 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| Símbolo | Descrição |
|-----------------------|--|
| μ_{Δ} | Permeabilidade Incremental |
| μ_{\max} | Amplitude Máxima da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização |
| $\mu_{\text{médio}}$ | sinal médio da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização |
| μ_0 | Permeabilidade magnética do vácuo |
| μ_r | Sinal medido da curva $\mu(H)$ para $H= 0$ A/cm |
| μ_r | Permeabilidade relativa do material analisado |
| 3MA | Multi-Parameter, Micro-magnetic, Microstructure and Stress Analyzer |
| ACP | Análise Multi-freqüência das Impedâncias das Correntes Parasitas |
| AHCT | Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial |
| AIP | Análise Incremental da Permeabilidade Magnética |
| ARB | Análise do Ruído Magnético Barkhausen |
| A_x | Amplitude das harmônicas de ordem x |
| B | Indução magnética |
| C | Carregamento externo |
| CA | Corrente Alternada |
| $C_{\text{elétrica}}$ | Condutividade Elétrica |
| δ | Profundidade de pele |
| DHy μ | Expansão da curva $\mu(H)$ para $\mu=0,yy$ M_{\max} |
| DHy M | Expansão da curva $M(H)$ para $M=0,yy\%$ de M_{\max} |
| E_c | Material encruado |
| E_s | Material esferoidizado |
| f_A | Freqüência de análise |
| $f_{\Delta H}$ | Freqüência de análise do campo magnético incremental |
| f_E | Freqüência de magnetização |
| H | Intensidade do campo magnético |
| H_c | Campo coercitivo - coercitividade |
| $H_{C\mu}$ | Campo coercivo, derivado da PI |
| H_{CM} | Campo coercivo, derivado de ARB |
| H_{co} | Campo coercivo, derivado da técnica AHCT |
| H_{ro} | Harmônica mais elevada de $H_t(0)$. |
| Im^* | Parte Imaginária do sinal de corrente parasita para a freqüência de No^* |
| K | Distorção Harmônica, $K = 100\% * (\sum Ax^2)^{1/2}$ |

| Símbolo | Descrição |
|--------------------|---|
| Lift off | Afastamento entre o sensor e o material ferromagnético |
| Mag* | Magnitude do sinal de corrente parasita para a frequência de No* |
| M _{max} | Amplitude Máxima da curva M(H) para um ciclo de magnetização |
| M _{médio} | Sinal médio da curva M(H) para um ciclo de magnetização |
| MQE | Média quadrática do erro |
| M _r | Sinal medido da curva M(H) para H= 0 A/cm |
| PD | Parede de Domínio Magnético |
| PD1 | Parede de Domínio Magnético do tipo 1 (180°) |
| PD2 | Parede de Domínio Magnético do tipo 2 (90°) |
| Ph* | Ângulo de Fase do sinal de corrente parasita para a frequência de No* |
| PITCE | Política Industrial, Tecnológica e do Comércio Exterior |
| PR | Processos de rotação de domínios magnéticos |
| P _x | Ângulo de fase da Harmônica de ordem x |
| r | Coefficiente de correlação |
| r ² | Coefficiente de determinação |
| r ² aj | Coefficiente ajustado de determinação |
| Re | Material recozido |
| Re* | Parte real do sinal de corrente parasita para a frequência de No* |
| RMQE | Raiz quadrada da Média quadrática do erro |
| SAH | Somatório das Amplitudes das Harmônicas SAH = $\sum Ax$ |
| σ_e | Limite de Escoamento do Material |
| Te | Material temperado |
| V _{mag} | Amplitude da voltagem de saída para a análise Micromagnética |
| VSM | Magnetômetro de amostra vibrante |
| ΔB | Indução magnética incremental |
| ΔH | Campo magnético incremental |

RESUMO

O crescimento da produção de petróleo em alto mar tem elevado a utilização de Risers flexíveis. Fazendo a conexão entre o poço e a plataforma, estes dutos estão sujeitos aos severos carregamentos causados pela superposição dos esforços mecânicos com o ambiente corrosivo. Deste modo, torna-se de grande importância, o monitoramento da integridade estrutural de Risers flexíveis para a Indústria petrolífera. Neste trabalho, foram desenvolvidas metodologias de caracterização do estado de tensões de arames da armadura de tração de Risers flexíveis de seis polegadas. Através do monitoramento de ensaios de tração foi testada a influência das variações de carregamento, microestrutura e afastamento entre o sensor e o material ferromagnético (Lift off) nas medidas micromagnéticas. Os resultados mostraram a grande aplicabilidade dos métodos micromagnéticos, separando os efeitos das variações de tensões e microestruturais. Analisando-se diferentes técnicas, foram obtidas correlações entre os carregamentos e as tensões (determinadas através da técnica micromagnética) superiores a 90%. Bons resultados também foram obtidos nas análises da influência do Lift off, onde, apesar da grande atenuação de sinais, obteve-se boas correlações entre propriedades mecânicas e micromagnéticas.

Palavras chaves: Confiabilidade operacional, Métodos Magnéticos, Risers Flexíveis

ABSTRACT

The constant growing of the offshore oil production has increase the use of Flexible Risers. Acting as the connection between the well and the platform, these pipelines are subjected to a superposition of mechanical loads and corrosive environment. In this sense, the development of more reliable systems for monitoring the structural integrity of Flexible Risers is becoming more important. This work aims the development of non destructive methodologies for the analysis of the stress state in the steel wires that forms the tensile armor of a six inch Flexible Riser. Through the monitoring of tensile tests, the influences of the load, microstructure and Lift off variations in the micromagnetic measurements had been analyzed. The results showed the good applicability of the micromagnetic methods, in sorting the microstructure effects from the stress analysis. Using the multi – technique approach, a good correlation (up to 90%) between load stress and the NDT stress (determined through the micromagnetic technique) had been found. The Lift off analysis showed promising results too, where, despite the high signal attenuation, good correlations between mechanical and micromagnetic properties had been observed.

Key Words: Reliability, Micromagnetic Techniques, Flexible Risers

1 INTRODUÇÃO

A falha catastrófica de componentes e estruturas mecânicas vem sempre acompanhada de prejuízos, inadmissíveis justificando o interesse na melhoria dos programas de manutenção da integridade estrutural.

Para a indústria petrolífera, associam-se à falha de equipamentos, prejuízos como: perdas humanas, mecânicas, desastres ambientais e paradas inesperadas. Neste sentido, o conceito de confiabilidade operacional, o qual prioriza a melhoria da utilização dos recursos da infra-estrutura empresarial (assegurando que o foco da empresa não seja afetado pela depreciação estrutural), corrobora com os objetivos da PITCEⁱ, na busca do uso racional de produtos e processos. Deste modo, o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de inspeção e manutenção apresenta grande importância para o desenvolvimento econômico e tecnológico da indústria moderna.

Atualmente a Petrobras S/A possui mais de cinco mil quilômetros de dutos flexíveis instalados, o que representa um capital investido superior a dez bilhões de reais. Nos últimos anos, as condições operacionais das unidades de produção em águas profundas têm permitido a observação de falhas em Risers flexíveis na região do conector. O principal modo de falha identificado tem sido a ruptura dos arames das armaduras de tração. Para os mais de dois mil Risers instalados na Bacia de Campos, a atividade de inspeção utilizada consiste no monitoramento visual e da pressão de gás do espaço anular. Em caso de falha, os procedimentos de re-terminação destes dutos são altamente dispendiosos, envolvendo a aquisição de novos acessórios, recursos de barco e lucro cessante¹.

Diante deste cenário surgiu a demanda pelo desenvolvimento de ferramentas capazes de detectar a ruptura dos arames das armaduras de tração antes de uma possível falha catastrófica do Riser flexível.

i) *A retomada do desenvolvimento nacional deve estar baseada num crescimento econômico sustentável, com a melhoria do bem-estar e da distribuição de renda da população. Deste modo, a Política Industrial, Tecnológica e do Comércio Exterior – PITCE tem como objetivos o aumento da eficiência econômica e do desenvolvimento e difusão de tecnologias com maior potencial de indução do nível de atividade e de competição no comércio internacional. Esta política é focada no aumento da eficiência da estrutura produtiva, aumento da capacidade de inovação e na expansão das exportações por parte das empresas brasileiras.*

Priorizando-se os ensaios não destrutivos, devido à sua natureza não invasiva, foram selecionadas algumas técnicas para desenvolvimento imediato, dentre estas temos: técnicas envolvendo princípios eletromagnéticos (Correntes Parasitas, Métodos Micromagnéticos, Matriz de Sensores Hall); óticos (Televisionamento e Fibra Óptica); e acústicos (Emissão Acústica). Estas técnicas podem ser utilizadas para monitorar as características dos Risers, tais como: variação no estado de carregamento e ruptura de arames nas armaduras de tração, depreciação e variações geométricas na estrutura, entre outras.

Este trabalho buscou o desenvolvimento de metodologias de inspeção e monitoramento de Risers Flexíveis, com vistas para os carregamentos submetidos à armadura de tração através da Técnica Micromagnética. Para tal, foi empregado um equipamento modelo 3MA-II (“**M**ulti-**P**arameter, **M**icro-magnetic, **M**icrostructure and **S**tress **A**nalyzer”) produzido pelo Fraunhofer Institut – Alemanha. Este equipamento combina quatro técnicas micromagnéticas de inspeção. A hipótese sustentada é a de que através desta combinação de técnicas seria possível aumentar o grau de representatividade do método, separando-se da análise de tensões, efeitos como as variações microestruturais, atenuação de sinais devido à presença de camadas não ferromagnéticas, variações geométricas, entre outros.

Através deste estudo, foi possível comprovar a aplicabilidade dos métodos micromagnéticos para a caracterização do estado de tensões em componentes de engenharia, em especial para Risers flexíveis, em situações onde a remoção do Lift off não é possível.

Utilizando-se amostras especialmente desenvolvidas e diferentes combinações de técnicas, os resultados mostraram correlações próximas da unidade. Indicando a forte relação entre as variações de carregamentos e os parâmetros micromagnéticos analisados. Possibilitando ainda a análise dos efeitos das variações microestruturais e da atenuação de sinais devido à presença de camadas não ferromagnéticas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente projeto visa o desenvolvimento de metodologias de inspeção e monitoramento do nível de tensões atuantes em Risers Flexíveis de seis polegadas de diâmetro, com foco na determinação não invasiva do estado de tensões nos arames das armaduras de tração.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de metodologias de ensaios não destrutivos para o monitoramento e inspeção da integridade estrutural dos componentes de linhas flexíveis para a indústria petrolífera.
- Desenvolver e implementar o Método Micromagnético para Análise de Tensões, possibilitando assim, um sistema simplificado e não destrutivo para o monitoramento dos carregamentos e solicitações às quais os componentes estão submetidos.
- Desenvolvimento de dispositivos especiais de calibração e posicionamento de sensores, aplicáveis às técnicas micromagnéticas.

2.3 Divisão do Trabalho

A fim de detalhar o que foi exposto na Introdução, o restante do trabalho está dividido da seguinte forma:

Revisão Bibliográfica: Apresentando as principais características do objeto de estudo (Risers flexíveis) e das técnicas micromagnéticas – empregada para a análise do problema.

Parte Experimental: Descrevendo as propriedades dos materiais utilizados, as quais foram consideradas de interesse para a análise do problema. Detalhando os métodos empregados. E a metodologia adotada para a análise do problema relacionado ao desenvolvimento de um sistema de monitoramento do estado de tensões em arames da armadura de tração de Risers flexíveis.

Resultados: Apresentando os resultados mais expressivos obtidos neste trabalho. Assim como a análise estatística destes.

Discussão: Compilando os dados adquiridos experimentalmente e através da consulta à literatura buscando avaliar a aplicabilidade das técnicas micromagnéticas para o estudo do problema proposto.

Conclusões: Apresentando os principais resultados obtidos a partir deste trabalho.

Sugestões para trabalhos futuros: Apresentando as perspectivas de continuidade do trabalho.

2.4 Motivação

“A energia é, sem comparação, a indústria mais importante do planeta, não só porque movimenta perto de 1/5 do Produto Interno Bruto mundial (avaliado em cerca de 40 trilhões de dólares), mas também porque funciona sob controle rigoroso do Estado, seja qual for o país”. As palavras de Flávio Dieguez apresentadas na edição de maio de 2001 da revista Super Interessante (ANEXO 1) descrevem perfeitamente o interesse (profissional, estratégico, científico) em se desenvolver pesquisa para os setores de energia e petróleo. A importância destes setores e, conseqüentemente, seu desenvolvimento, tende a impulsionar o crescimento de todos os ramos da economia nacional. Neste sentido a disponibilidade de recursos, tecnologias e os desafios apresentados no início do projeto foram os motivos que nos levaram a esta tese.

2.5 Justificativa

Este trabalho faz parte do Projeto Monflex – Monitoramento de Risers Flexíveis – Um projeto multi-centro de pesquisa financiado pelo CENPES – Petrobras S/A. Contando com a participação de universidades e institutos de pesquisas nacionais e internacionais, o Projeto Monflex visa o desenvolvimento de sistemas mais confiáveis de inspeção, monitoramento e análise da integridade estrutural de Risers flexíveis e sistemas de extração, transporte e armazenamento de petróleo em alto mar.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Risers Flexíveis

3.1.1 A trajetória da Produção Off shore no Brasil

Em 1968, a Petrobras iniciou as atividades de prospecção em alto mar (Off shore). No ano seguinte foi descoberto o campo de Guaricema, em Sergipe.

Entretanto, foi em Campos que a Petrobras encontrou a bacia que se tornou a maior produtora de petróleo do país. O campo inicial foi o de Garoupa, em 1974, seguido pelos campos gigantes de Marlim, Albacora, Barracuda e Roncador.

A partir de 2002, a Petrobras ampliou sua área de prospecção, buscando novas frentes exploratórias nas bacias de Santos e Espírito Santo e em bacias ainda pouco exploradas em suas águas profundas, como as da costa sul da Bahia, Sergipe, Alagoas e da margem equatorial brasileira.

O ano de 2003 foi considerado um marco na história da Petrobras. Além do expressivo volume de petróleo descoberto, foram identificadas novas províncias de óleo de excelente qualidade, gás natural e condensado, permitindo que as reservas e a produção da Companhia mudassem para um perfil de maior valor no mercado mundial de petróleo.

Em 2006 foi alcançada a auto-suficiência do Petróleo no Brasil. Com o início das operações da P-50 no campo de Albacora Leste, no norte da Bacia de Campos (RJ), a Petrobras alcançou a marca de 2 milhões de barris por dia, o suficiente para cobrir o consumo do mercado interno de 1,8 milhões de barris diários. A P-50 foi o marco inicial da sustentabilidade, destacando a retomada estratégica do crescimento econômico e tecnológico nacional. Aliada as descobertas recentes, dos campos de petróleo sob a camada de pré-sal, a sustentabilidade indica que os próximos anos serão marcados por grandes desenvolvimentos tecnológicos, possibilitando a extração, processamento e transporte do petróleo brasileiro, elevando a qualidade de vida nacional.

A decisão de explorar petróleo em alto mar foi um marco na história nacional. A partir disto, a Petrobras, tem trilhado um caminho de inúmeras descobertas, alcançando o título de líder mundial em tecnologia de exploração de petróleo em águas profundas^{2,3}.

3.1.2 Tecnologia de Risers Flexíveis

As plataformas e navios de produção “Off shore” são ligados aos poços petrolíferos através de dutos rígidos ou flexíveis (Figura 1). A experiência da Petrobras utilizando tubos flexíveis para extração e transporte de petróleo (e seus derivados) iniciou no ano de 1979, desde então, tais aplicações vêm crescendo constantemente, acompanhando os avanços em tecnologias de águas profundas.

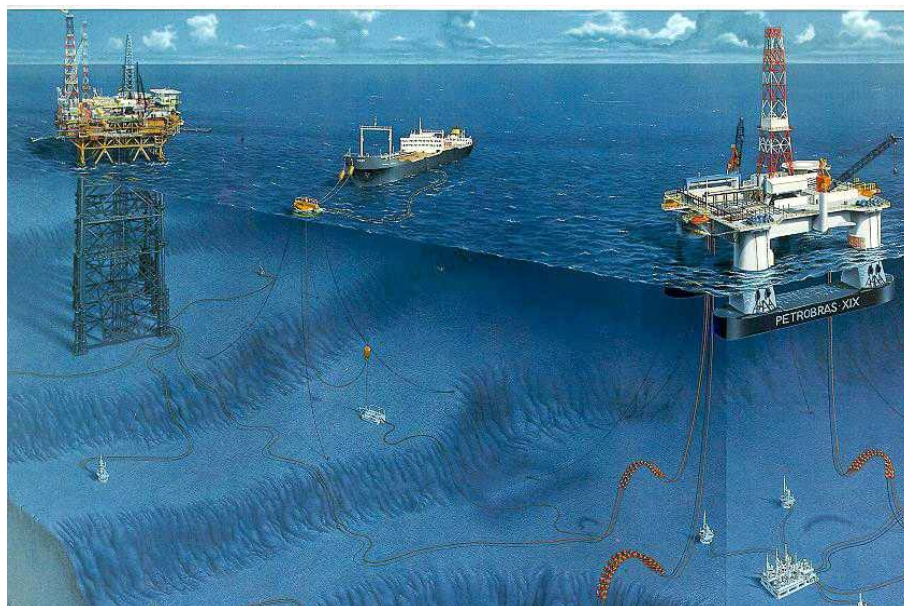


Figura 1: Sistemas produção de petróleo “Off Shore” (da esquerda para a direita temos: Plataforma fixa, Navio de produção FPSO e Plataforma semi-submersível)⁴.

O crescimento tecnológico alcançado pela Petrobras decorre, principalmente, de dois fatores:

- a) Os dutos flexíveis são estruturas complacentes, que podem ser utilizados em conexões permanentes entre o sistema de produção e instalações submarinas que apresentem movimento relativo;
- b) Os dutos flexíveis podem ser fabricados em grandes comprimentos e estocados em carretéis ou em navios de transporte, simplificando os processos de transporte e instalação, quando comparados aos componentes rígidos^{5,6,7}.

Apesar do custo (superior aos componentes rígidos) os tubos flexíveis são estruturas compostas que oferecem alta resistência aos carregamentos aximétricos, tais como tração, torção e pressão e possuem também uma baixa resistência ao dobramento. Esta performance é alcançada através da utilização de tubos

poliméricos complacentes (para o isolamento dos elementos) e camadas helicoidais de aço (para garantir resistência mecânica à estrutura)^{8,9}.

3.1.3 Características Técnicas

Os dutos flexíveis são estruturas multicamadas (Figura 2)^{5,6,7,8,9,10}. De maneira geral, estes são classificados, segundo a natureza da aplicação, em: “Flowlines” (Utilizados em aplicações estáticas) e Risers (os quais são utilizados em aplicações dinâmicas)ⁱⁱ. Além desta classificação, os Risers podem ser divididos em: Risers “Bonded” (Com adesivo entre as camadas, com a função de reforçar a matriz polimérica) e Risers “Unbonded” (sem adesivo entre as camadas)^{6,7,8,9}.



Figura 2: Configuração típica de um duto flexível do tipo Unbonded¹⁰.

A lista abaixo apresenta uma breve descrição das camadas, usualmente, integrantes de um Riser flexível do tipo Unbonded:

- Carcaça – Tem a função de resistir à pressão interna e suportar os esforços causados pela inércia do componente. Geralmente é composta de aços inoxidáveis do tipo AISI 316L ou 304L (Limite de escoamento (σ_e) \cong 290 MPa).
- Camada de Estanqueidade – Tem a função de impedir a permeabilidade de gases para as camadas posteriores. É formada por polímeros variados, dependendo da temperatura de aplicação do duto: Polietileno de alta densidade - HDPE (60°C), Nylon – Poliamida - PA11 (80°C) e Fluoreto de Polivinilideno – PVDF (130°C).

ii) A aplicação é considerada dinâmica quando existe um movimento relativo entre os pontos de entrada e saída do tubo.

- Armadura de Pressão – Tem a função de suportar as tensões de topo, induzidas pela pressão interna no tubo. A armadura de pressão contém duas camadas de tiras de aço, as quais, dependendo da natureza do carregamento, podem ter a forma de um perfil plano ou de um perfil em C. Geralmente esta camada é confeccionada em aço carbono de alta resistência do tipo ABNT 1060.
- Armadura de Tração – Tem a função de resistir aos esforços axiais aos quais o duto esta sujeito. Funciona também para o balanceamento à torção, apresentando camadas de arames helicoidalmente distribuídas aos pares. Geralmente é confeccionada por aço carbono de alta resistência mecânica do tipo ABNT 1060 encruado, ($\sigma_e \cong 900 \text{ MPa}$).
- Camada Externa – Tem a função de garantir resistência à corrosão e à abrasão à armadura de tração. É formada de material polimérico (PEAD para Flowline e PA11 para Riser) apresentando espessura variável segundo a aplicação (entre 5 e 12 mm)⁵.

Outra importante parte do sistema flexível é o conector, elemento que faz a conexão entre a terminação do duto e a plataforma. Fazendo a interface entre o sistema flexível e a plataforma rígida, no conector estão engastados os arames da armadura de tração, sendo que sua montagem e remontagem demanda de um processo artesanal de alto custo associado (Figura 3)^{1,8,11}.



Figura 3: Montagem em campo do sistema de conexão de um Riser Flexível¹¹.

Adiciona-se a este sistema o Bend Stiffner, elemento enrijecedor, utilizado para reduzir os esforços dinâmicos na região de conexão do Riser.

A Figura 4 apresenta um exemplo da configuração final do sistema de fixação de um Risers flexível.

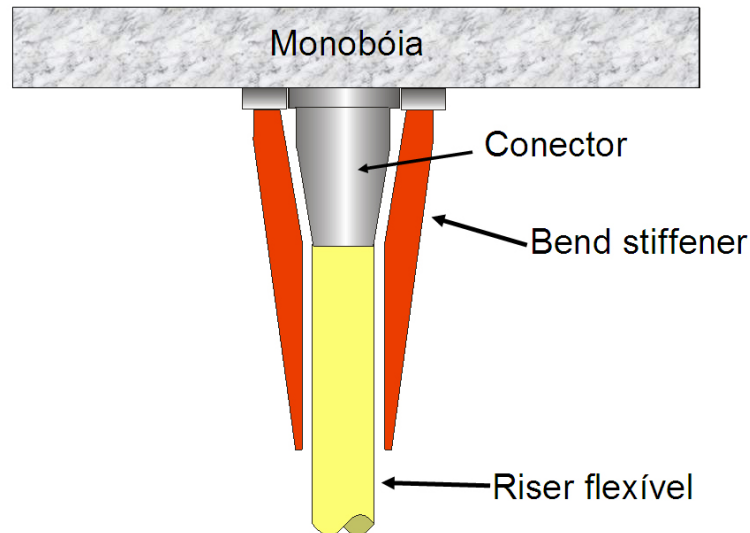


Figura 4: Sistema de conexão geral de dutos flexíveis às plataformas Off shore.

3.1.4 Mecanismos de Falhas de Risers Flexíveis

O aumento da produção de petróleo está intimamente relacionado à melhoria da tecnologia associada aos Riser flexíveis. Por esses Risers, através de um sistema de bombas e injeção, é possível extrair o petróleo dos poços e transportá-lo até a plataforma ou navio. No entanto, não é apenas petróleo o produto extraído, mas também gases residuais e outros compostos corrosivos que atacam os dutos e o sistema de bombeamento. É necessário, portanto, que seja feita a manutenção constante dos Risers e troca quando o componente se encontra comprometido. Lembrando que se o Riser falhar, os produtos transportados podem ser liberados para o ambiente. Além disso, se for Gás Natural o produto extraído, o escape do mesmo pode acarretar em uma diminuição na densidade da água. Como os dutos se encontram logo abaixo da plataforma, o escape de bolhas e conseqüente queda da densidade da água diminuem o empuxo e podem resultar na instabilidade da estrutura⁴.

A Norma N-2409⁹ cita vários modos de falha, os quais são definidos como eventos que levam o duto a não atuar como especificado. Estes podem ser divididos de acordo com a região onde ocorrem:

Camadas Estruturais Metálicas

- Ruptura de tiras da camada estrutural causada por tensão, pressão interna, compressão radial, torção, curvatura ou combinação desses tipos de carregamento;
- Ruptura por fadiga do material constituinte da camada estrutural;

- Deformação excessiva permanente ou temporal da camada causada por cargas excessivas;
- Colapso da carcaça ou da armadura de pressão causado por pressão externa aplicada em camadas poliméricas mais leves que a água;
- Colapso da carcaça ou da armadura de pressão causado por aperto da armadura de tração, associado ou não com qualquer outra carga radialmente compressiva atuando no tubo simultaneamente;
- Formação de “gaiola de pássarinho” (“birdcaging”) da armadura de tração causada por fricção entre duas camadas estruturais;
- Desgaste excessivo causado por fricção entre duas camadas estruturais;
- Perda de acoplamento entre estruturas, causado por dobramento excessivo, torção excessiva ou compressão axial durante os processos de instalação ou operação;
- Corrosão excessiva, degradação química e/ou biológica, ou abrasão de qualquer camada estrutural causada por fenômeno galvânico, fluidos agressivos ou abrasivos ou pelo contato do meio ambiente com a camada estrutural.

Barreira de Pressão

- Ruptura causada por pressão interna, tensão, torção, dobramento ou pela combinação de algumas dessas cargas;
- Extrusão excessiva da camada de pressão através de espaços entre as tiras da camada estrutural adjacente, causado por efeito da pressão, para os limites de temperatura considerados, incluindo deformações de curta e longa duração;
- Ruptura do material por fadiga;
- Desgaste excessivo causado por fricção com outra camada;
- Dano à camada devido à rupturag intermolecular ou interlamelar do material, causado por despressurização de gás difundido no material polimérico da barreira de pressão;
- Degradação química excessiva causada pela ação de fluidos ou ambiente externo;
- Perda de propriedades físicas causada pela temperatura do fluido interno ou ambiente externo;

- Erosão excessiva causada por fluido interno ou abrasão causada por sistemas de inspeção;
- Difusão excessiva de gás causada por envelhecimento, fadiga, desgaste ou erosão da camada.

Conector

- Escoamento de qualquer parte estrutural do conector causado por tração, pressão, dobramento, torção ou combinação dessas cargas;
- Colapso hidrostático da estrutura do conector;
- Ruptura da estrutura do conector por fadiga;
- Corrosão ou degradação excessiva de qualquer parte estrutural do conector causada pela ação do fluido interno ou ambiente externo;
- Perda de propriedades físicas de qualquer parte estrutural do conector induzida pela temperatura do fluido interno ou do ambiente externo (incluindo fragilidade por temperatura ou concentração de tensões residuais);
- Perda do sistema de ancoramento das armaduras de tração causada por tração, pressão, dobramento, torção ou combinação destas;
- Deslocamento relativo excessivo entre os cantos das camadas e do corpo do conector;
- Vazamento através do sistema selante (interno ou externo) observado quando carregamentos de tração, pressão, dobramento ou torção são aplicados;
- Dano ao sistema selante (interno ou externo) causado por fadiga;
- Dano à região da barreira de pressão em contato com o conector causado pela ação de tração, pressão, dobramento, torção ou combinação destas;
- Degradação de curta ou longa duração do sistema selante (interno ou externo), ou da resina de preenchimento, causado por agentes físicos, químicos, térmicos ou corrosivos.

Nota-se que, devido ao número de materiais que são empregados e as complexidade da montagem, existem diversas possibilidades de falha para os Risers Flexíveis. Para os atuais Risers, em especial os projetados para águas profundas, adicionalmente, possuem camadas anti-atrito, reduzindo, portanto, a importância do desgaste abrasivo entre camadas adjacentes. Neste caso, o modo de falha mais importante é o de fadiga pura, com pouco desgaste das camadas metálicas.

Para as condições de operação dos Risers no Brasil, sujeitos a pressões internas relativamente baixas, mas expostos a altos níveis de tração, a falha da armadura de tração na conexão tem sido apontado como o principal modo de falha a ser investigado. Em vista disto e com a recente tendência de se priorizar a utilização de unidades baseadas em antigos navios convertidos para unidades de produção e estocagem chamados FPSOs (“Floating Production Storage and Offloading”) com turrete situado na proa (Figura 5), a verificação da vida útil desses Risers vem se tornando cada vez mais importante, justificando o desenvolvimento de metodologias confiáveis de inspeção e estimativa da vida remanescente destes componentes^{1,5,6,11,12}.



Figura 5: Plataforma P-50 – Unidade de Produção e Estocagem (FPSOs – “Floating Production Storage and Offloading”)¹².

É importante considerar que a ruptura das camadas protetoras permite a passagem de soluções corrosivas (gases e água do mar) para o interior do duto, acelerando o processo de degradação através da combinação de fatores associados à fadiga e a corrosão. A Figura 6¹ apresenta a ruptura da camada protetora externa de uma seção de Riser flexível. Para esse processo diz-se que o anular foi alagado, onde o contato entre a água do mar e a armadura de tração resulta em um processo acelerado de degradação, associando os esforços trativos aos efeitos da corrosão. Outro fator refere-se ao fato de que nem todo o comprimento do Risers está sujeito a esforços excessivos, tanto dinâmicos quanto estáticos, suficientes para levar o componente à falha. Em geral, os pontos de conexão, de curvaturas acentuadas e de contato são os que sofrem as condições mais severas^{1,8,9,11}.

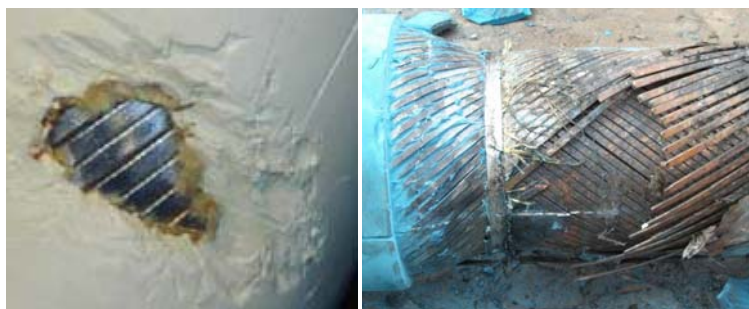


Figura 6: a) Ruptura da camada protetora de um Riser flexível; b) Ruptura dos arames da armadura de tração na região adjacente ao conector¹.

3.1.5 Análise de Tensões em Risers Flexíveis

Dos diversos mecanismos de falhas citados anteriormente, a literatura aponta como o mais freqüente a ruptura dos arames da armadura de tração na região do conector^{5,6,8}.

Na conexão os arames estão sujeitos a tensões da ordem de 30 a 50% do limite de escoamento do material. Geralmente estes arames sofrem um processo de fadiga, causando a ruptura progressiva na região. A partir de um valor crítico de arames rompidos, os efeitos de torção tornam-se mais pronunciados, acentuando a agressividade do dano, levando o componente a falhar.

Alves e Costa^{13,14}, analisando amostras de Flowline de 4" de diâmetro, mostraram que quando a redução da seção metálica da linha foi superior à 10%, o descarte se tornou inevitável. Os autores também mostraram que para reduções superiores à 5% (Figura 7), ocorreu uma mudança no modo predominante de falha da estrutura, passando do colapso da carcaça para a ruptura dos arames da armadura de tração na região do dano.

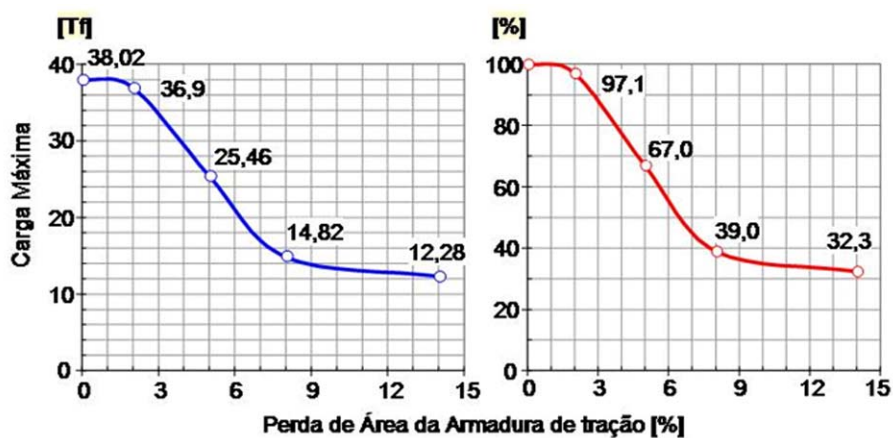


Figura 7: Resistência residual x perda de área da armadura de tração para amostras de Flowline de 4 polegadas¹³.

Deste modo, além dos efeitos associados (torção e degradação estrutural), torna-se de grande importância o monitoramento do número de arames rompidos na região de conexão. Porém, tal atividade encontra grande dificuldade, devido ao fato destes arames estarem deformados, ancorados e protegidos pelas camadas adjacentes.

Out et al⁸ apresentaram como opções para inspeção de Risers flexíveis as técnicas de Radiografia, Correntes Parasitas, Emissão Acústica, Ultra-som, Análise do Fluxo Magnético, entre outras, indicando as possibilidades de aplicação de cada técnica, como mostra a Tabela 1 onde OG corresponde à ondas guiadas, ME corresponde à medição de espessura e os números de 0 a 5 indicam a maior possibilidade de aplicação do método empregado (sendo 0 uma técnica considerada não aplicável).

Tabela 1: Relação entre a facilidade de aplicação e os tipos de técnicas não destrutivas empregadas para o monitoramento de Risers Flexíveis⁸.

| Técnica | Região | | | | |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|
| | Degradação da Armadura de Tração | Ruptura da Armadura de tração | Fadiga da armadura de pressão | Trincas na armadura de pressão | Conector |
| Radiografia | | 3 | | 2 | 4 |
| Fluxo Magnético | 1 | 3 | | | |
| Correntes Parasitas | | 4 | | 3 | |
| Reflectometria elétrica | | 1 | | | |
| Ultra-som OG | | 1 | | | |
| Ultra-som ME | 2 | | | | |
| Emissão Acustica | 3 | | 2 | | |
| Fotogrametria | | 0 | | | |

Veith et al¹⁵ apresentaram os esforços do Instituto Francês do Petróleo (IFP) e seus associados, em desenvolver um equipamento dedicado à inspeção em serviço de Risers flexíveis. As técnicas utilizadas na ocasião foram a Radiografia, Correntes Parasitas, Análise do Fluxo Magnético.

Berg e Nielsen¹⁶ apresentaram a técnica que utiliza fibras ópticas para o monitoramento da integridade de Risers flexíveis. Apresentando as vantagens da técnica para o monitoramento do estado de tensões nas armaduras de tração. (Figura 8). Apesar da grande aplicabilidade, a necessidade de contato entre a fibra e a superfície a ser monitorada, inviabiliza a aplicação da técnica nas estruturas pré-existentes.

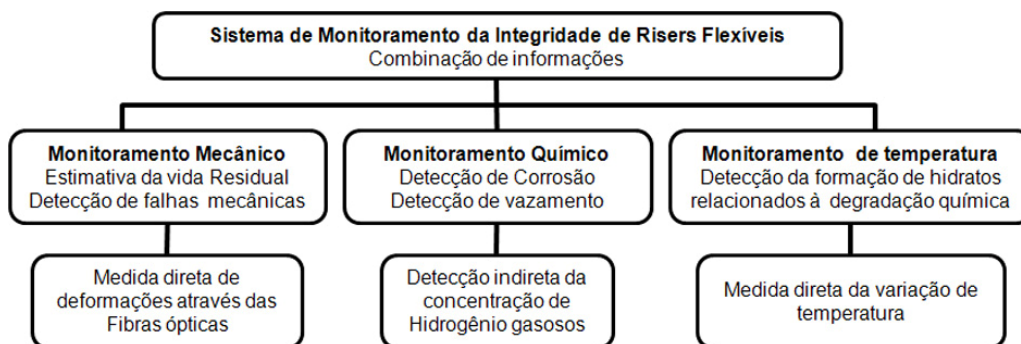


Figura 8: Princípios do sistema de monitoramento da integridade de Risers flexíveis baseado na utilização de sensores de fibra óptica¹⁶.

Carneval et al^{1,11} apresentaram o programa de inspeção da Petrobras, o qual se baseia na aplicação das técnicas de análise visual, ensaio hidrostático e técnicas de monitoramento superficial. Os autores indicaram os avanços apresentados pelos pesquisadores do CENPES, na utilização de técnicas não destrutivas tais como Correntes Parasitas, Ultra-som, Radiografia, assim como o desenvolvimento de um PIG externo para a detecção de alterações geométricas na estrutura.

Santos et al¹⁷ apresentaram os esforços despendidos pelo CENPES, através da implementação de um projeto de pesquisa destinado ao desenvolvimento de técnicas não destrutivas de inspeção e monitoramento de Risers flexíveis. Neste trabalho, os autores identificaram a ruptura da armadura de tração como o principal modo de falha de Risers flexíveis e apresentaram as técnicas de correntes parasitas, Análise do Ruído Barkhausen, emissão acústica, televisionamento, fibras ópticas como potenciais aplicações para o monitoramento e inspeção destas estruturas. Neste sentido, Pipa e Pires¹⁸ apresentaram os avanços obtidos com a técnica de monitoramento da torção em Risers flexíveis através de processamento de imagens. O trabalho fundamentou-se nos critérios estabelecidos pela norma API RP 17B¹⁹, os quais indicam que a ruptura progressiva dos arames da armadura de tração é acompanhada pela torção da estrutura na região do conector. Deste modo, o monitoramento da torção pode prevenir a falha catastrófica. Através da captação e processamento de imagens, os autores mostraram que a técnica permite medir a variação do ângulo de torção do Riser em relação ao conector.

Este trabalho buscou o desenvolvimento de técnicas micromagnéticas de análise de tensões, assim como o estudo de sua aplicabilidade para o monitoramento dos carregamentos atuantes na armadura de tração de Risers flexíveis de seis polegadas de diâmetro.

3.2 Métodos Magnéticos

3.2.1 Generalidades

Segundo a teoria micromagnética, as propriedades mecânicas e magnéticas dos materiais ferromagnéticos têm a mesma origem: os defeitos cristalinos. Deste modo, tais propriedades são dependentes e sensíveis as variações microestruturais do material. A Figura 9 apresenta um esboço da interdependência entre propriedades mecânicas e micromagnéticas^{20,21,22,23}.

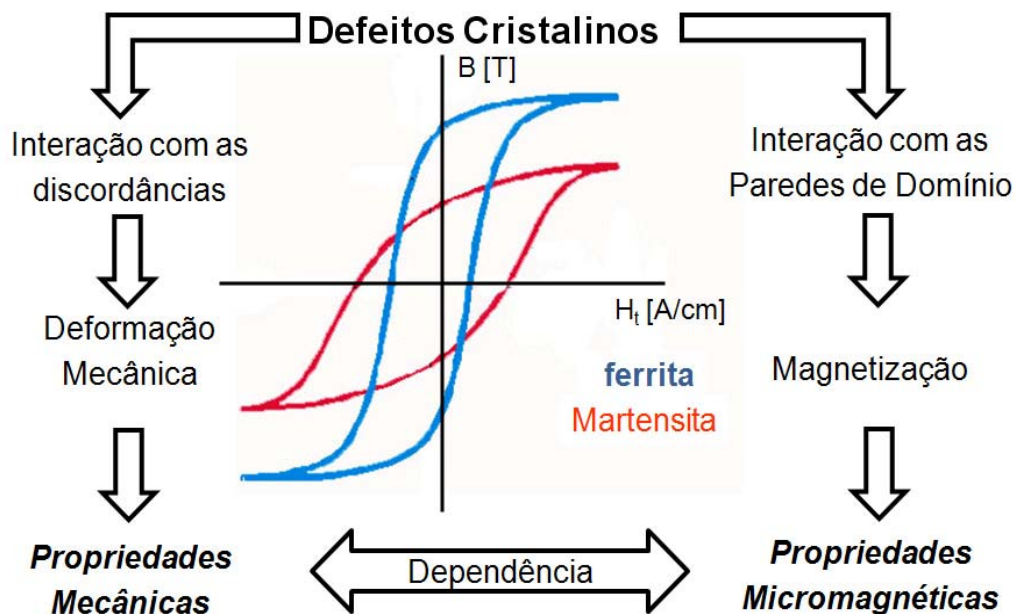


Figura 9: Relação entre as propriedades mecânicas e micromagnéticas para materiais ferromagnéticos²³.

Neste sentido, torna-se possível analisar as características mecânicas de materiais ferromagnéticos a partir de medidas magnéticas não destrutivas. Este conceito é a base fundamental das técnicas magnéticas de caracterização de materiais.

Atualmente cada vez mais as indústrias têm buscado por métodos capazes de medir as tensões de maneira precisa, rápida, fácil e sem danificar a amostra²⁴.

Estas são técnicas não destrutivas, baseadas na relação entre as propriedades mecânicas e a microestrutura magnética do material, indicadas para o controle de processo e de qualidade quando um grande número de medidas não destrutivas se fazem necessárias^{20,21,22,25}.

3.2.2 Teoria dos Domínios Magnéticos

Um material ferromagnético é subdividido em diversas regiões, com diferentes orientações do vetor de magnetização, chamadas de Domínios Magnéticosⁱⁱⁱ. Os Domínios Magnéticos podem ser vistos como regiões onde todos os átomos possuem spins alinhados em uma mesma direção e sentido^{22,25,26,27}.

O conceito de domínios magnéticos foi originalmente introduzido por P. Weiss em 1906 para explicar a capacidade dos materiais magnéticos de estarem desmagnetizados enquanto continuam tendo, localmente, uma magnetização espontânea não nula. Dentro de um domínio, a magnetização é paralela à uma das direções preferenciais (as quais são determinadas pela energia de anisotropia do material) e o campo magnético encontra-se no estado de saturação. Para um material policristalino, os domínios estão divididos e orientados de maneira aleatória. O efeito global é nulo e na ausência de um campo magnético externo, o material se encontra desmagnetizado. Uma vez que um campo magnético de grande magnitude seja imposto no material, tem-se início aos processos de crescimento dos domínios magnéticos, até a saturação, a partir deste momento, o material encontra-se magnetizado, na mesma direção do campo externo^{20,21,22,25}.

Microscopicamente, o processo de magnetização de um material ferromagnético pode ser dividido em duas etapas:

- 1) À medida que um campo magnético alternado é aplicado no material, ocorre o crescimento dos domínios que possuem momentos magnéticos orientados na mesma direção, até restarem dois domínios, magnetizados na mesma direção, porém com sentidos contrários;
- 2) O segundo estágio seria a rotação dos vetores dos domínios magnéticos restantes até que estes possuam o mesmo sentido.

O primeiro processo ocorre a baixos campos magnéticos, próximos do campo coercivo, e é caracterizado pelo movimento das paredes de domínio magnético.

iii) Para um átomo qualquer, os elétrons presente em sua eletrosfera estão em movimentos de translação em torno do núcleo e rotação (ao redor de seu próprio eixo). No caso de um material ferromagnético, por exemplo o ferro, dos 26 elétrons 14,1 possuem spin para um lado e 11,9 possuem spin para o outro lado. Neste caso, os 2,2 elétrons desemparelhado originam o magnetismo do átomo de ferro. Uma vez que milhares de átomos de ferro estejam extremamente organizados (materiais sólidos) e associados à uma energia de troca (a qual obriga momentos magnéticos à ocuparem orientações preferenciais) temos então a formação dos domínios magnéticos.

O segundo processo ocorre em campos de alta intensidade, pois é necessário um acréscimo de energia para orientar o domínio magnético a uma direção diferente da direção de fácil magnetização do cristal.

3.2.3 Paredes de Domínios Magnéticos

Paredes de domínio (PD), ou paredes de Bloch são interfaces entre regiões onde a polarização espontânea tem diferente direção. A polarização deve mudar de direção no interior da parede. Neste sentido, as paredes possuem espessura finita de modo a alcançar o equilíbrio entre a energia de troca (que força ao paralelismo) e a anisotropia magnetocristalina (que força os domínios a se orientarem em direções específicas).

A Figura 10 demonstra a visão micromagnética do laço de histerese de um material ferromagnético, onde (B) é a indução magnética e (H) a intensidade do campo magnético externo aplicado. Cada linha vertical nos degraus representa o movimento discreto de um conjunto de paredes de domínios magnéticos de uma barreira de energia para a outra. Cada linha horizontal representa o tempo de espera (ou a barreira de energia a ser ultrapassada) antes que o próximo movimento ocorra^{21,22,24,25,26,28,29}.

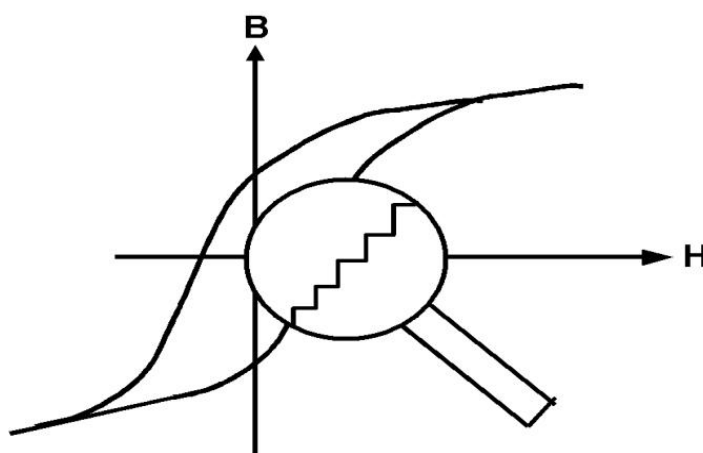


Figura 10: Representação da Curva de Histerese para um material ferromagnético²⁹.

Esta curva explica porque materiais endurecidos apresentam curvas de histerese largas. Este efeito é devido a uma maior barreira de energia a ser ultrapassada, para que ocorra um dado movimento de um conjunto de paredes de domínios magnéticos, durante o processo de magnetização.

Em relação aos efeitos das tensões residuais, pode-se dizer que as tensões residuais compressivas atuando na mesma direção do campo magnético aplicado reduzem a taxa de crescimento dos domínios magnéticos. A mesma analogia pode ser utilizada para explicar o fato de que materiais de baixa dureza ou que apresentem altos níveis de tensões residuais tratativas atuando na direção do campo magnético externo aplicado apresentam curvas de histerese mais estreitas^{20,21,22,25,28,29}.

Basicamente, existem dois tipos de paredes de domínio magnético (Figura 11): as de 180° (PD1, as quais separam domínios de mesma direção mais com sentidos de magnetização contrários) e as de 90° (PD2, as quais separam domínios com diferentes direções)^{20,21,22,25,28,29}.

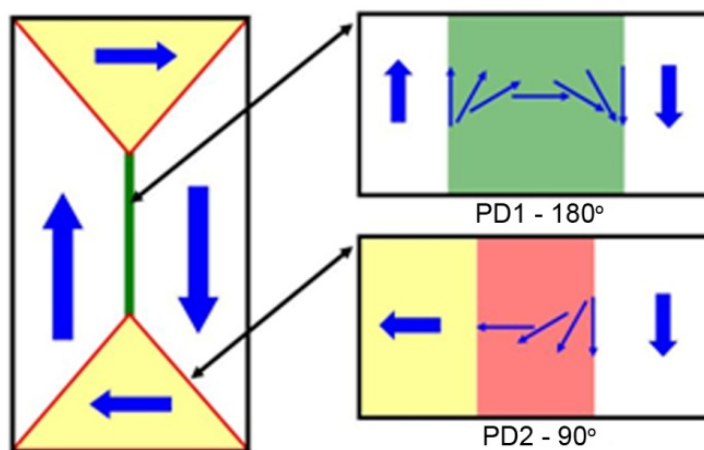


Figura 11: Representação das paredes de domínios em materiais ferromagnéticos²².

A teoria micromagnética nos diz que PD1 e PD2 contribuem, a diferentes intensidades de campo magnético, para processo de magnetização. Num material ferroso policristalino PD2 contribui para a remagnetização de forma dominante perto do campo coercitivo (H_c). Fora desta região PD1 se torna dominante. Quando a magnetização atinge a saturação os movimentos de parede decrescem, dando espaço para a os processos de rotação (PR)^{22,28,29}.

A Figura 12 apresenta uma visualização da curva de histerese de um material ferromagnético com vistas para os movimentos de paredes de domínio magnético²³.

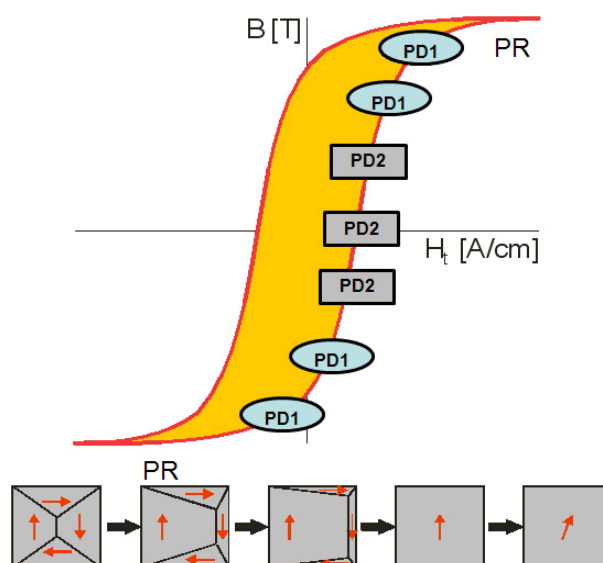


Figura 12: Curva de histerese de um material ferromagnético²³.

Para as medidas micromagnéticas não-destrutivas os diferentes tipos de paredes dos domínios magnéticos são sensores intrínsecos muito importantes.

As paredes do 1º tipo (PD1) são as que separam os domínios onde as tensões residuais magnetostrictivas não desaparecem com a união dos mesmos. Este tipo de parede tem grande interação volumétrica. Sempre que uma PD1 se mover a densidade de energia elástica variará em dependência da sua posição local. Isto significa que as PD1 só podem ser movidas de sua posição atual se a força magnética local ou a densidade de energia elástica for alterada por uma energia externa e as macrotensões interagirão com estas paredes de maneira direta.

As PD2 só produzem tensões residuais dentro da própria parede.

Devido ao fato de que as PD2 separam áreas com o mesmo comportamento magnetostrictivo nenhuma energia elástica mudará durante seus movimentos.

As PD2 não interagem com as macrotensões e nem com as microtensões dentro dos grãos com dimensões maiores que a espessura da parede.

Além das PD1 os processo de rotação (PR) variam a densidade de energia magnetoelástica e assim são sensíveis à variação de tensão, sendo magnetogestrictivamente ativos^{20,22,26,29}.

A presença de um campo magnético externo força a rotação dos momentos magnéticos atômicos dos átomos da parede. Para não aumentar a energia da parede, ela se movimenta. A mobilidade das paredes de domínio está relacionada com a energia magnetoelástica total, a qual varia com o tamanho, forma e microestrutura do material, sendo fortemente influenciada pela estrutura de defeitos,

tais como vazios, inclusões, discordâncias, contornos de grão e pela presença de tensões residuais. Estas heterogeneidades estruturais atuam como barreira à movimentação das fronteiras dos domínios, fazendo com que seu movimento seja realizado aos saltos e não de forma contínua. Deste modo, parâmetros micromagnéticos podem ser utilizados para determinar as características microestruturais dos materiais ferromagnéticos^{20,21,26,29}.

3.2.4 3MA

3.2.4.1 Generalidades

O método 3MA (Método Micromagnético Multi-Paramétrico para a Análise de Microestrutura e Estado de Tensões) baseia-se na interação entre o processo de magnetização e as propriedades mecânicas e microestruturais de materiais ferromagnéticos. Através da utilização de quatro técnicas de medidas micromagnéticas, este método não destrutivo apresenta até 41 parâmetros de resposta, os quais são utilizados em combinação, a fim de determinar, de forma mais representativa, o estado de tensões ou microestrutural de diversos componentes. Combinando as técnicas de Análise do Ruído Barkhausen (ARB), Análise Incremental da Permeabilidade Magnética (AIP), Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial (AHCT) e Análise das Impedâncias das Correntes Parasitas (ACP) (Figura 13), o método permite separar os diversos fatores que influem no processo de crescimento dos domínios magnéticos, elevando assim, sua confiabilidade^{25,23,30,31,32, 33,34,35}.

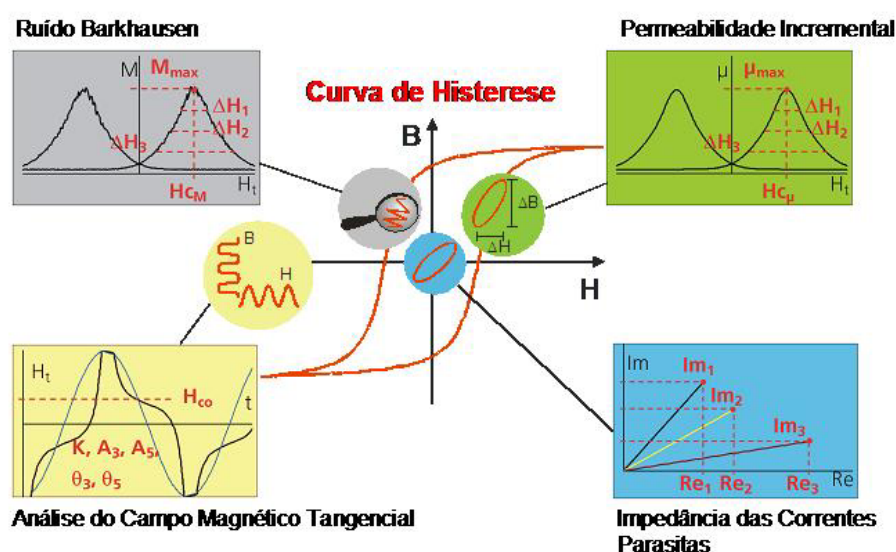


Figura 13: Relação de sinais medidos através da técnica micromagnética 3MA²³.

A Tabela 2 apresenta a relação de parâmetros de resposta (e suas respectivas unidades) obtidos através da análise via 3MA²³.

Tabela 2: Parâmetros de respostas obtidos através do método 3MA²³.

| | Símbolo | Unidade | Descrição |
|------|---------------|---------|--|
| AHCT | A_x | [A/cm] | Amplitude das harmônicas de x ordem |
| | P_x | [rad] | Ângulo de fase da Harmônica de x ordem |
| | H_{co} | [A/cm] | Campo coercivo, derivado da técnica AHCT |
| | H_{ro} | [A/cm] | Harmônica mais elevada de $H_t(0)$. |
| | K | [%] | Distorção Harmônica, $K = 100\% * (\sum A_x^2)^{1/2}$ |
| | SAH | [A/cm] | Somatório das Amplitudes das Harmônicas $SAH = \sum A_x$ |
| | V_{mag} | [V] | Amplitude da voltagem de saída para a análise Micromagnética |
| | AHCT | - | Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial |
| ARB | M_{max} | [V] | Amplitude Máxima da curva $M(H)$ para um ciclo de magnetização |
| | $M_{médio}$ | [V] | Sinal médio da curva $M(H)$ para um ciclo de magnetização |
| | M_r | [V] | Sinal medido da curva $M(H)$ para $H = 0$ A/cm |
| | H_{CM} | [A/cm] | Campo coercivo, derivado de ARB |
| | $DHyy_M$ | [A/cm] | Expansão da curva $M(H)$ para $M=0,yy\%$ de M_{max} |
| | ARB | - | Análise do Ruído Magnético Barkhausen |
| AIP | μ_{max} | [V] | Amplitude Máxima da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização |
| | $\mu_{médio}$ | [V] | sinal médio da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização |
| | μ_r | [V] | Sinal medido da curva $\mu(H)$ para $H = 0$ A/cm |
| | $H_{C\mu}$ | [A/cm] | Campo coercivo, derivado da PI |
| | $DHyy\mu$ | [A/cm] | Expansão da curva $\mu(H)$ para $\mu=0,yy$ M_{max} |
| | AIP | - | Análise Incremental da Permeabilidade Magnética |
| ACP | Re^* | [V] | Parte real do sinal de corrente parasita para a frequência de No^* |
| | Im^* | [V] | Parte Imaginária do sinal de corrente parasita para a frequência de No^* |
| | Mag^* | [V] | Magnitude do sinal de corrente parasita para a frequência de No^* |
| | Ph^* | [rad] | Ângulo de Fase do sinal de corrente parasita para a frequência de No^* |
| | ACP | - | Análise Multi-frequência das Impedâncias das Correntes Parasitas |

O método é rápido e simples de ser aplicado, onde os diferentes parâmetros são registrados quase que simultaneamente. Teoricamente, não exige contato direto entre o sensor e a peça, possibilitando até a inspeção de peças cobertas por camadas não ferromagnéticas ou que operem em altas temperaturas. Sua versatilidade está fundamentada na combinação de diferentes técnicas as quais apresentam maior sensibilidade há diversos parâmetros, tais como dureza, microestrutura, defeitos internos, tensões e tensões residuais. Outra vantagem é a faixa de profundidade alcançada, permitindo medidas mais superficiais, através da ARB, ou provenientes de camadas internas, através da AHCT, como mostra a Tabela 3²³.

Tabela 3: Profundidades típicas para o 3MA²³.

| Técnica | Profundidades típicas |
|---------|-----------------------|
| AHCT | 0,2 - 10 mm |
| ARB | 0,01 - 1 mm |
| ACP | 0,01 - 0,5 mm |
| AIP | 0,2 - 5 mm |

Esta tabela fundamenta-se nas características específicas dos sensores e no efeito “Skin depth” – profundidade de pele. De um modo simplificado, a profundidade que um campo alternado penetra em um determinado material (δ) é governada pela frequência desse campo, pela condutividade e pela permeabilidade magnética do material (Equação 1).

Equação 1: Profundidade de Pele²⁹.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi * f_A * C_{elétrica} * \mu_0 * \mu_r}}$$

Onde: f_A é a frequência de análise em Hz, $C_{elétrica}$ é a condutividade elétrica em $\Omega^{-1} m^{-1}$, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo: $4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$ e μ_r é a permeabilidade relativa do material analisado^{20,21,22,25,28,29}.

O método é indireto, deste modo, faz-se necessária à utilização de uma etapa de calibração para relacionar os parâmetros micromagnéticos com a propriedade a ser analisada. Para a análise de tensões, esta calibração pode ser realizada através de ensaios mecânicos ou através de métodos de determinação de tensões residuais, tais como a Difração de raios-X e o método do Furo Cego^{20,21,23,26,28,29}.

A partir dos dados obtidos, a calibração é efetuada com auxílio de um software de regressão linear multi-paramétrica, buscando-se identificar os parâmetros, ou conjunto de parâmetros que melhor se correlacionam com a propriedade a ser analisada^{20,21, 23,29}.

A calibração deve ser efetuada sempre que haja uma mudança no processamento, ou seja, das características físicas do material a ser analisado^{20,21}.

Dobmann et al³⁶ apresentaram as aplicações industriais da técnica 3MA. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida para a caracterização microestrutural de estruturas nucleares, porém, devido ao grande número de parâmetros analisados, a técnica tornou-se aplicável a uma vasta gama de situações, incluindo: Inspeção de chapas laminadas, controle de qualidade para a indústria automotiva e análise de tensões residuais.

A descrição individual das técnicas empregadas no método 3MA será apresentada a seguir.

3.2.4.2 Análise do Ruído Barkhausen

A mais difundida das técnicas micromagnéticas, deriva da constatação de H. G. Barkhausen (1919) de que os movimentos das paredes de domínio magnético originam as descontinuidades na curva de histerese de um material ferromagnético. Barkhausen provou que estas descontinuidades podem induzir um ruído detectável na forma de um pulso de voltagem em uma bobina indutora posicionada na superfície do material, sendo este chamado de ruído ou Sinal Magnético Barkhausen em sua homenagem^{20,21, 23,26,28,29,37,38,39}.

O ruído Barkhausen é a evidência prática da existência de uma organização magnética da matéria, introduzida de maneira teórica por P. Weiss^{39,40}.

A técnica de Análise do Ruído Magnético Barkhausen utiliza campos magnéticos variantes com o tempo para determinar certas características sobre as amostras metálicas⁴¹. Assim, a partir da aplicação de um campo magnético externo, pulsos de correntes parasitas são excitados nas proximidades dos eventos Barkhausen, as quais são recebidas pelo sensor magnético indutivo, na forma de um ruído^{23,42}. A amplitude destas correntes parasitas é dependente da frequência e absorvida por dispersão⁴². Como consequência, a vasta banda inicial do ruído é segregada para frequências menores em função do aumento da distância^{23,29,38}.

Desde que o ruído Barkhausen resulte diretamente do movimento abrupto das paredes de domínio, a configuração original do domínio magnético tem grande influência na geração do sinal^{43,44}.

Titto⁴⁵ verificou a dependência do Sinal Barkhausen com o estado de tensões residuais e com as características microestruturais dos materiais ferromagnéticos. Os resultados (Figura 14) mostraram que a presença de tensões residuais compressivas no material produz um laço de histerese largo e baixos valores para a amplitude do sinal Barkhausen. Este efeito decorre da imposição ao crescimento dos domínios magnéticos, efetuada pela presença das tensões. O efeito é inverso para as tensões residuais trativas atuando na direção de magnetização, apresentando este um laço de histerese estreito e altos níveis de amplitude para o sinal Barkhausen. Porém, percebe-se que o efeito é semelhante para materiais endurecidos, onde a densidade de discordâncias tem o mesmo efeito das tensões residuais compressivas no material.

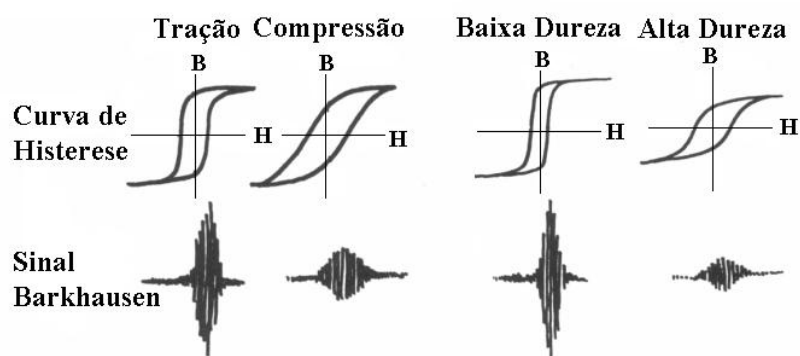


Figura 14: Influência do estado de tensões residuais e da dureza na curva de Histerese e na amplitude do sinal Barkhausen⁴⁵.

Desta forma, deve-se buscar a utilização de parâmetros adicionais de medida, capazes de separar os efeitos microestruturais da influência do estado de tensões presentes no material. Para tal, utilizam-se em conjunto com a medida do sinal M_{\max} (amplitude máxima do ruído Barkhausen) as medidas de $M_{\text{médio}}$ (Valor médio da curva $M(H)$ para um dado período), M_r (O valor medido para $M(H)$ quando o campo é nulo), H_{cm} e as larguras do pico do ruído para 25%, 50% e 75% de M_{\max} ($\Delta H_{25\%M}$, $\Delta H_{50\%M}$, $\Delta H_{75\%M}$)^{23,42,45,46}.

O sinal magnético gerado durante o processo de magnetização tem baixa intensidade. Em geral, o sinal é amplificado na frequência de medida na faixa de 0,7 a 200 kHz e filtrado antes de ser armazenado sobre o meio ciclo de histerese para a análise digital posterior. A seguir um filtro de frequência de corte é utilizado para eliminar as interferências devido a magnetização de baixa frequência (ruído de fundo de escala) e para selecionar o intervalo de frequência desejado^{42,46-52}.

Atualmente existe uma vasta gama de referências citando a aplicação da técnica de análise do Ruído Barkhausen.

Dobmann et al⁴⁶, apresentaram o método 3MA indicando a necessidade de se processar o sinal magnético Barkhausen, a fim de se evitar a distorção causada pelas correntes parasitas e as harmônicas de alta ordem.

Tönshoff et al⁵³, apresentaram uma proposta multi-paramétrica, combinando as técnicas de ARB e análise das correntes parasitas para investigar e descrever a complexa integridade superficial de amostras endurecidas. Utilizando uma combinação de 12 parâmetros micromagnéticos, os autores encontraram uma correlação de 95% com o estado de tensões residuais.

Martins et al⁵⁴, mostraram a grande representatividade do método, quando comparado com métodos mais consolidados, tais como o Método de Difração de raios X e o Método do Furo Cego para análise de tensões residuais em anéis para rolamentos do aço ABNT 52100. Os resultados (Figura 15) mostraram coerência entre os diferentes métodos, sendo que o Método Magnético apresenta como vantagens a grande velocidade de análise e o caráter não destrutivo.

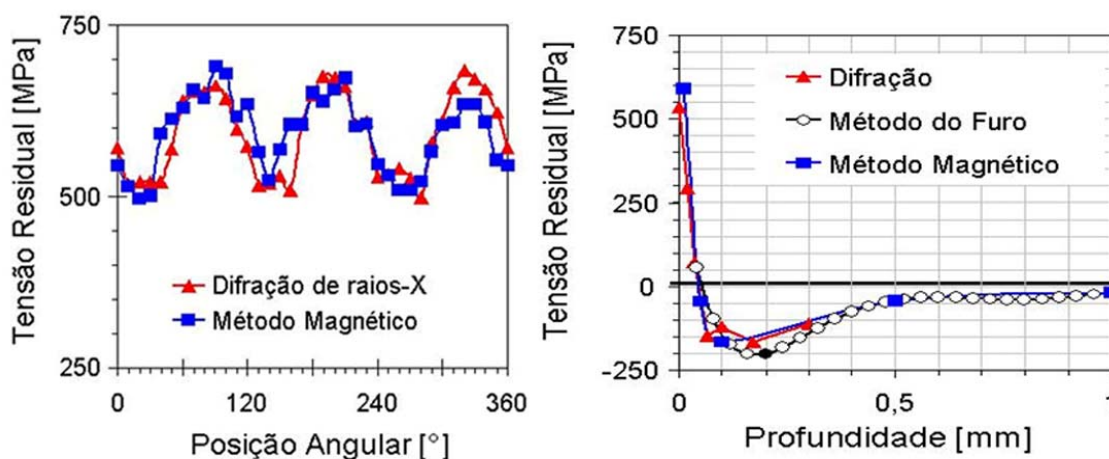


Figura 15: Comparação entre técnicas de análises de tensões residuais em anéis para rolamentos⁵⁴.

Maru e Padovese⁵⁵ mostraram a representatividade da técnica na determinação da anisotropia magnética de chapas de aço A36 laminadas a frio. Em outro trabalho, Padovese⁵⁶ apresentou uma nova abordagem, dividindo a banda de frequência de um sinal magnético em sinais de baixa (AHCT) e alta frequência (ARB), a partir disto, os autores estudaram a relação entre a concentração de carbonetos e a intensidade do sinal magnético Barkhausen. Os resultados mostraram grande sensibilidade da terceira Harmônica ao estado de tensões e proporcionalidade inversa entre a coercitividade e a concentração de carbono no material.

Silva Jr. et al⁵⁷, mostraram a relação entre o ruído Barkhausen e o afastamento entre o sensor e a peça (Lift off), mostrando que uma redução de 50% na intensidade do sinal pode ser esperada para um Lift off da ordem de 1,4 mm, utilizando-se um sensor magnético de pequeno porte.

Neste sentido, é importante constatar que o Lift off modifica a permeabilidade magnética do circuito, mas não altera a permeabilidade do material analisado⁵⁸.

3.2.4.3 Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial

Devido à histerese magnética e a não linearidade da permeabilidade, a indução magnética, B , de um material ferromagnético sujeito a um campo magnético externo senoidal, H_t , não é senoidal, mas distorcida^{23,38,40,42}.

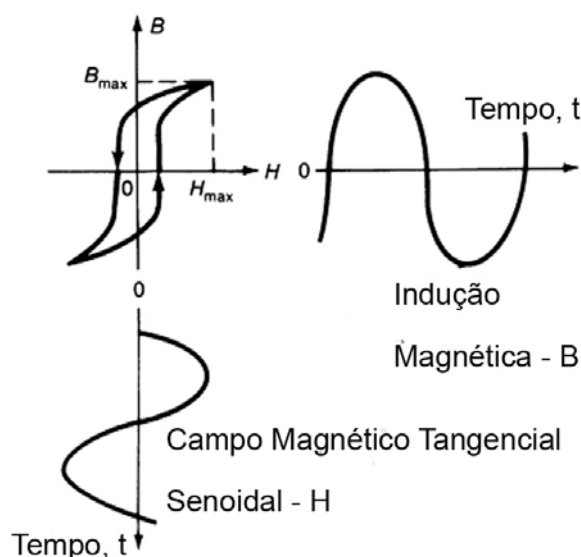


Figura 16: Distorção da indução magnética causada pela não-linearidade da curva de Histerese⁴⁰.

Esta onda distorcida da indução magnética contém as frequências harmônicas^{iv} do campo magnético aplicado (Figura 17).

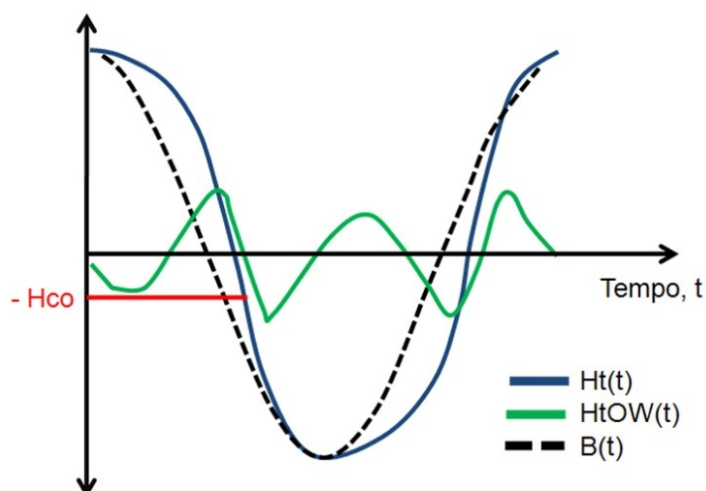


Figura 17: Relação entre a forma da onda do campo magnético tangencial $H_t(t)$ e da indução magnética $B(t)$ ²³.

^{iv} Tecnicamente, uma harmônica é a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental.

Assim, a partir da aplicação de um campo magnético alternado, a quantidade harmônica da onda também é excitada com a frequência fundamental, dependendo da indutância total do eletromagneto, da frequência de magnetização e da forma do laço de histerese.

Durante este processo, devido à simetria do laço de histerese, apenas as harmônicas ímpares são exibidas. Amplitudes e fases da oscilação fundamental e das ondas harmônicas (A_i , P_i ; com $i = 1, 3, 5, 7$ e 9) são determinadas pela Análise de Fourier^v de $H_t(t)$. Amplitudes e fases das 3^a, 5^a e 7^a harmônicas, assim como o somatório das amplitudes até a 9^a harmônica (SAH), são usadas como respostas para esta técnica.

A amplitude das harmônicas, geralmente da 3^a, é sensível ao estado de tensões, assim como da orientação relativa entre o campo magnético externo e o estado de carregamento e/ou tensões⁴⁰.

Usualmente altos valores de coercitividade (H_{ro}) são associados a materiais magneticamente e mecanicamente duros. A distorção harmônica (K), a qual representa a relação proporcional da Wattagem das altas harmônicas e da oscilação fundamental, se comporta de forma inversa.

O sinal do tempo $H_t^{OW}(t)$ que contém apenas a porção harmônica – porção de frequência da onda harmônica – é computado através de uma transformação inversa de Fourier. Este sinal cruza o eixo das abscissas em $H_t^{OW}(t_0) = 0$, sendo que $H_t(t_0) = H_c = H_{co}$, determinado através desta técnica.

Outros parâmetros de ensaio:

H_{ro} – A porção da onda harmônica para $t=0$ de H_t .

V_{mag} – parâmetro que representam a amplitude de voltagem de saída requerida para ajustar a intensidade do campo magnético. Reflete a impedância do eletromagneto sob carregamento na frequência de excitação²³.

v No século XIX, o matemático francês Joseph Fourier demonstrou que toda função periódica pode ser decomposta em uma função constante e uma série de funções senoidais. O primeiro termo da série tem frequência igual à da função original. Este é chamado de componente fundamental (1^a Harmônica). Os demais componentes possuem frequências múltiplas inteiras da fundamental, recebendo o nome de i^a harmônica, de acordo com o fator de multiplicidade.

3.2.4.4 Análise Multi-Freqüência das Impedâncias das Correntes Parasitas

O Método de Análise das Correntes Parasitas tem suas origens a partir da descoberta da indução eletromagnética por Faraday em 1831. Anos antes (1874), Oersted havia provado que uma corrente passando através de uma bobina condutora cria um campo magnético capaz de defletir uma agulha. Faraday e Henry descobriram o oposto: que um campo magnético alternado induzira uma voltagem em um eletro-condutor em suas proximidades. Contudo, foi apenas após a segunda guerra mundial (1950) que essas teorias foram aplicadas no desenvolvimento de técnicas não destrutivas para a inspeção de materiais. Desde então, a técnica de análise das correntes parasitas tem sido largamente aplicada para a detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais^{59,60,61,62}.

Porém, a análise da integridade estrutural não se limita a apenas a caracterização de defeitos, envolvendo também a caracterização do estado de tensões⁶³. Neste sentido, pesquisas foram desenvolvidas visando relacionar os parâmetros de análise desta técnica com a variação do estado de tensões em componentes de engenharia.

Dybiec et al⁶⁴ aplicaram o método de Análise das Correntes Parasitas para caracterizar o estado de tensões em materiais ferromagnéticos.

Zergoug et al⁶⁵ utilizaram o método para a análise do carregamento externo aplicado em amostras de alumínio e aços austeníticos. Os resultados mostraram boa correlação com os parâmetros mecânicos (carregamento, deformação e alongação) permitindo, através da análise da Impedância e do Ângulo de fase das correntes parasitas, identificarem as zonas de transição elasto-plásticas e de rupturas para as amostras analisadas.

Além da impedância e do ângulo de fase, a parte real e a imaginária das correntes parasitas são utilizadas como respostas para este ensaio²³.

As propriedades das correntes parasitas no material dependem da freqüência, da voltagem alternada, da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética do material. Uma vez que permeabilidade e condutividade são sensíveis aos parâmetros microestruturais, estas medidas podem ser utilizadas para caracterização de materiais de engenharia.

Em geral, a permeabilidade relativa é inversamente proporcional a dureza do material. A condutividade age de forma inversa, sendo diretamente proporcional a densidade de discordâncias atuando no material.

Em concordância com a Lei de Lenz^{vi} as correntes parasitas são alinhadas na direção oposta ao campo magnético induzido, assim o campo primário é enfraquecido e empurrado para a superfície condutora (efeito de pele – “Skin Effect” Figura 18)^{23,42,59,60,61,62,66,67,68}.

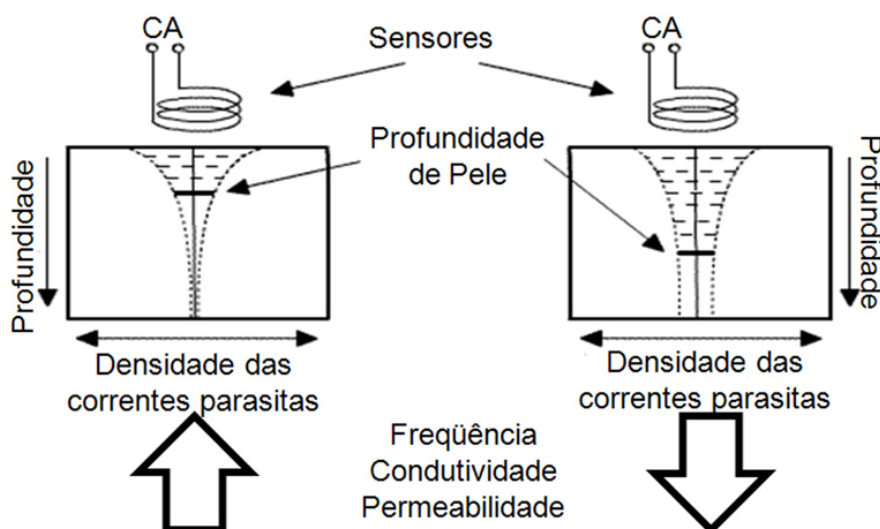


Figura 18: Efeito da profundidade de pele para a técnica de correntes parasitas, onde CA é a corrente alternada aplicada na bobina a fim de gerar o campo magnético externo⁵⁹.

Outro fator que exerce grande influência no ensaio é o efeito do Lift off. A priori, a bobina sensora não necessita de contato direto com a peça a ser inspecionada. Porém, para uma dada geometria de sensor, à medida que se eleva o afastamento (Lift off) temos uma considerável perda na intensidade dos sinais analisados^{23,59,60,61,62,69}.

É importante lembrar que o Lift off altera as propriedades eletromagnéticas do sistema mas não altera as propriedades da amostra⁵⁸.

Tian e Sophian⁷⁰ estudaram a redução do efeito Lift off para a técnica de correntes parasitas pulsadas. Partindo do princípio que o efeito pode ser reduzido através do processamento de sinais, otimização dos parâmetros de controle e otimização de sensores, os autores mostraram que uma redução na intensidade do sinal é esperada, na presença de Lift off.

O método é sensível a uma gama de fatores relativos ao estado do material⁷¹.

^{vi} A lei de Lenz determina o sentido de propagação da corrente induzida, indicando que o sentido desta sempre se opõe à causa que lhe deu origem. Ou seja, ao passar um ímã no interior de uma bobina condutora uma corrente elétrica é gerada na bobina (Lei de Faraday). Como tal corrente deve se opor ao movimento do ímã, segundo a lei de Lenz, a mesma terá um sentido tal que crie um campo magnético que se oponha ao movimento.

Deste modo, além da prática e calibração adequada, a utilização da técnica multi-freqüência permite a melhoria da aplicabilidade da técnica de análise das correntes parasitas^{23,42,51,53}.

Utilizando-se o sistema 3MA-II é possível aplicar-se até quatro freqüências simultaneamente, obtendo-se assim dezesseis respostas para o ensaio.

O método é considerado reversível e aplicável a materiais sólidos condutores elétricos²³.

3.2.4.5 Análise Incremental da Permeabilidade

Na análise do Ruído Magnético Barkhausen apenas a porção irreversível da curva de magnetização é analisada. Entretanto, a porção reversível também carrega informações e esta pode ser analisada através da superposição do campo magnético externo (H) a um campo magnético incremental (ΔH). Este campo Incremental deve ser pequeno (em geral, $\Delta H < H_C/2$), mas de alta freqüência (em geral, $f_{\Delta H} > 100 \cdot f_E$, afim de evitar a interferência causada pelos sinais reversíveis com freqüência semelhante à freqüência de magnetização). Através deste processo, pequenos ciclos de histerese são adicionados à curva de magnetização, permitindo a determinação da permeabilidade incremental (μ_{Δ}) como sendo a inclinação dos ciclos incrementais de histerese em função do campo magnético aplicado^{23,72}.

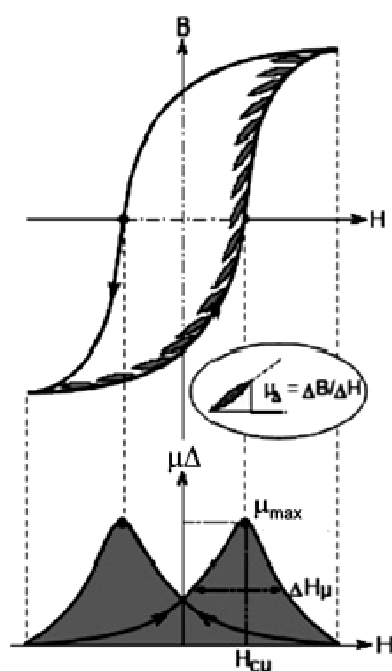


Figura 19: Relação entre a curva de histerese e a variação incremental da permeabilidade magnética²³.

Na prática, medidas de $\Delta B/\Delta H$ são pouco aplicáveis, sendo mais usual a utilização de medidas da impedância de uma bobina de correntes parasitas. Neste sentido, aplicando-se uma fonte de correntes como um gerador de alta frequência para excitar a bobina de correntes parasitas, um campo magnético ΔH é induzido, sendo este um campo magnético incremental pouco sensível a distúrbios elétricos e magnéticos. Para este caso, a impedância de saída das correntes parasitas é proporcional à ΔB e, por consequência, proporcional à μ_{Δ} .

A impedância das correntes parasitas pode ser medida continuamente, obtendo-se um perfil de permeabilidade incremental em função do campo magnético aplicado ($\mu(H)$), semelhante ao perfil obtido para a análise do ruído Barkhausen (Figura 13)^{23,69}.

Semelhante ao resultado obtido para a ARB, o máximo da curva de permeabilidade (μ_{\max}) coincide com a posição da coercitividade derivada desta técnica ($H_{C\mu}$). Outros parâmetros derivados desta técnica são: $\mu_{\text{médio}}$, a intensidade média do sinal, para um dado número de ciclos; μ_r , o valor da permeabilidade para $H = 0$; as expansões da curva para larguras de 25, 50 e 75% ($\Delta H_{25\mu}$, $\Delta H_{50\mu}$, $\Delta H_{75\mu}$, respectivamente)^{23,42, 46,72}.

Esta técnica corresponde a uma análise por Correntes Parasitas, onde vários valores de campo magnético são aplicados²³.

3.2.5 Sensor Micromagnético

Um fator determinante para a melhoria da confiabilidade das medidas micromagnéticas refere-se às características do sensor magnético. A partir de uma dada aplicação, devem ser otimizadas características tais como geometria, capacidade de magnetização, frequência de análise entre outras. Em relação à geometria, pode-se dizer que esta limita a sensibilidade da técnica visto que a distância entre os pólos magnéticos tem influência direta nas quantidades micromagnéticas detectadas na bobina sensora. Além disso, sabe-se que a intensidade do campo magnético e a frequência de magnetização influenciam diretamente na profundidade da medida, ou seja, no volume de material analisado.

A Figura 20 apresenta o princípio básico das medidas micromagnéticas, onde uma bobina sensora irá medir os sinais micromagnéticos gerados a partir da magnetização cíclica do componente. Na Figura 21 temos a configuração básica de sensor micromagnético²⁸.

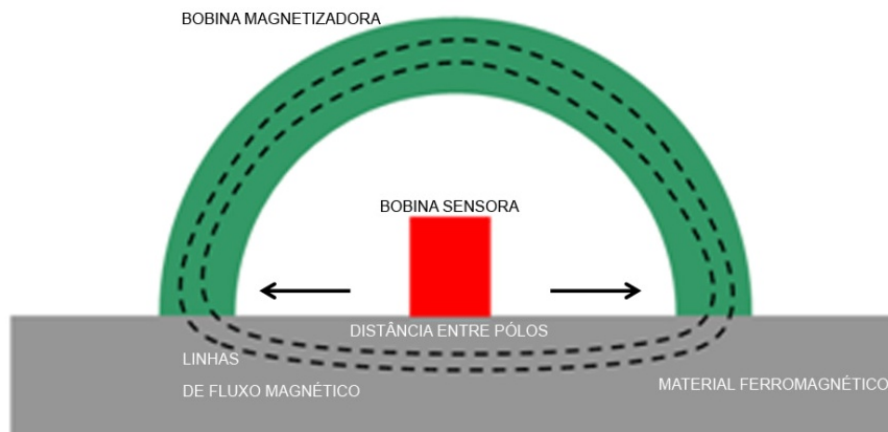


Figura 20: Princípio do processo de análise dos efeitos da magnetização em materiais ferromagnéticos.

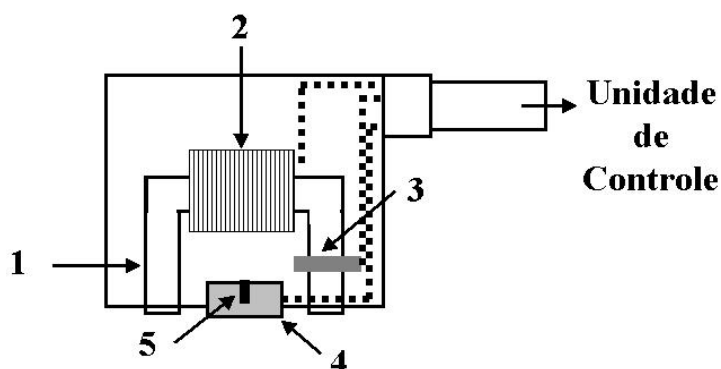


Figura 21: Configuração do sensor magnético utilizado no Método Micromagnético, Onde: (1) corresponde ao núcleo da unidade de magnetização, (2) corresponde a bobina de excitação da unidade de magnetização, (3) corresponde ao detector de fluxo magnético, (4) é a bobina sensora e (5) o núcleo ferromagnético desta bobina²⁸.

A geometria deste sensor depende da forma e do tamanho do componente a ser inspecionado, visto que, para uma medida mais representativa, as três peças devem manter o contato com a superfície do componente²⁸.

A Figura 22 apresenta um sensor micromagnético especialmente desenvolvido para a análise micromagnética, através da técnica 3MA.



Figura 22: Sensor micromagnético especialmente desenvolvido.

4 PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Procedimento

Visando analisar o problema relacionado ao monitoramento da falha da armadura de tração de Risers flexíveis de seis polegadas de diâmetro, buscou-se definir um conjunto de hipóteses para formar a metodologia experimental.

Foi selecionado o método micromagnético de análise de tensões como objeto de estudo. A partir disto, foram confeccionados corpos de prova especiais e definido um conjunto de experimentos em escala reduzida, a fim de testar a viabilidade de aplicação das técnicas micromagnéticas.

4.2 Metodologia

A revisão bibliográfica permitiu identificar a ruptura dos arames da armadura de tração como o problema mais severo relacionado à falha catastrófica de Risers flexíveis. Estes arames fazem parte da camada responsável pela sustentação do componente, estando, portanto, sujeito aos esforços mecânicos de natureza trativa e em algumas condições torcionais. Em vista disto, torna-se de grande importância o monitoramento do estado de tensões nos arames da armadura de tração. Porém, o fato desta camada, estar protegida por uma camada polimérica, não sendo passível de acesso direto, restringe em grande parte as técnicas a serem aplicadas.

Devido a sua aplicabilidade ser restrita aos materiais ferromagnéticos, as técnicas micromagnéticas se apresentam como potenciais ferramentas para o monitoramento do estado de tensões da armadura de tração. Assumindo-se que o campo magnético não seja afetado pela presença da camada polimérica.

Porém, as técnicas micromagnéticas são recentes, de desenvolvimento restrito, cuja aplicabilidade depende do melhor conhecimento e entendimento a cerca de uma série de fatores tais como: sensibilidade da técnica, configuração de parâmetros, características da amostra, efeitos do Lift off, entre outras.

Deste modo, a metodologia adotada nesta tese visou analisar a influência das variáveis anteriormente descritas na confiabilidade dos resultados obtidos a partir de ensaios em escala reduzida, a fim de se formular uma proposta confiável para um posterior programa de monitoramento de Risers flexíveis.

Para tal, foram formuladas hipóteses e definido um conjunto de experimentos a fim de testá-las e confrontá-las com a literatura consultada.

4.3 Hipóteses

A fim de se desenvolver um sistema eficiente de monitoramento dos estados de tensões atuantes nas armaduras de tração de Risers flexíveis, foram formuladas as seguintes hipóteses:

- 1) É possível alcançar a melhoria da confiabilidade operacional através do desenvolvimento de ferramentas de inspeção e monitoramento de dutos flexíveis^{vii}.
- 2) É possível estimar, de forma mais conveniente, a durabilidade de Risers flexíveis através do monitoramento das tensões atuantes em uma dada seção da estrutura^{viii}.
- 3) O Monitoramento das tensões pode ser realizado através da utilização de Técnicas Micromagnéticas para a análise das tensões atuantes nas armaduras de tração, mesmo quando estas se encontram dispostas abaixo da camada protetora dos Risers flexíveis^{ix}.
- 4) Os métodos micromagnéticos são sensíveis à microestrutura e ao estado de tensões, porém, é possível, através da seleção do conjunto de parâmetros adequados, separar tais efeitos.
- 5) Os métodos micromagnéticos são aplicáveis a materiais ferromagnéticos, uma vez que a literatura afirma que o contato direto entre o sensor e a amostra não é necessário, é possível analisar as propriedades dos materiais mesmo quando estes encontram-se recobertos por uma camada não magnética.

^{vii}) Neste sentido, com base nos conceitos teóricos da Mecânica da Fratura sabe-se que o desempenho dos componentes mecânicos pode ser avaliado através da caracterização dos defeitos presentes ou das tensões atuantes na estrutura.

^{viii}) A estratégia de trabalho sugere o monitoramento das tensões atuantes, a partir do princípio de que estas apresentam um efeito não localizado no componente, permitindo a realização de medidas em pontos convenientemente escolhidos.

^{ix}) Esta hipótese sugere o desafio de se manter a integridade estrutural dos componentes, realizando-se as medidas por sobre a camada polimérica externa.

4.4 Materiais

Para o presente trabalho foram selecionadas amostras da armadura de tração de Risers flexíveis de seis polegadas.

As tiras foram cortadas em corpos de prova contendo as seguintes dimensões: Espessura: 4 mm; Largura: 9 mm; Comprimento: 300 mm.

Estas amostras provêm da etapa anterior à montagem dos Risers flexíveis, ou seja, não apresentam a deformação oriunda do ângulo de passo utilizado na montagem (o qual proporciona a configuração helicoidal à armadura de tração).

A Tabela 4 apresenta a composição química do aço utilizado. O material foi identificado como sendo um aço ABNT 1060. A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica, conforme a Norma ASTM E1009. No estado original, os arames da armadura de tração apresentam grau de encruamento da ordem de 60% (oriundo da etapa de laminação a frio do processo de manufatura deste componente).

Tabela 4: Composição química das amostras de arame da armadura de tração de Risers flexíveis.

| Composição química [% massa] | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|------|-----------|----------|----------|------|--------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
| Medida | 0,61 | 0,24 | 0,84 | 0,018 | 0,011 | 0,04 | <0,005 |
| ABNT 1060 | 0,55 - 0,65 | - | 0,6 - 0,9 | 0,03 Max | 0,05 Max | - | - |

A fim de testar a influência da microestrutura nas respostas micromagnéticas, os arames foram tratados termicamente, obtendo-se os seguintes grupos de amostras:

- Encruada (Ec): Arame (ABNT 1060) extraído da armadura de tração de Risers flexíveis, não tratado termicamente.
- Recozida (Re): Arame (ABNT 1060) extraído da armadura de tração de Risers flexíveis, submetida ao processo de recozimento (Austenitizada a 830 °C, resfriada no forno, com taxa de resfriamento de 26 °C/hora até 500 °C;).
- Temperada (Te): Arame (ABNT 1060) extraído da armadura de tração de Risers flexíveis, submetida ao processo de Têmpera e Revenido (temperada desde a temperatura de austenitização de 840 °C, resfriada em óleo, revenida a 200 °C);
- Esferoidizada (Es): Arame (ABNT 1060) extraído da armadura de tração de Risers flexíveis, submetida ao processo de esferoidização (Aquecida até 750 °C, mantida neste patamar por 5 horas, redução da temperatura para 705 °C, mantida

neste patamar por 1,5 horas, redução da temperatura para 695 °C, mantida neste patamar por 1,5 horas e resfriada no forno até 500 °C).^x.

A Figura 23 apresenta as microestruturas apresentadas pelos diferentes materiais utilizados neste trabalho.

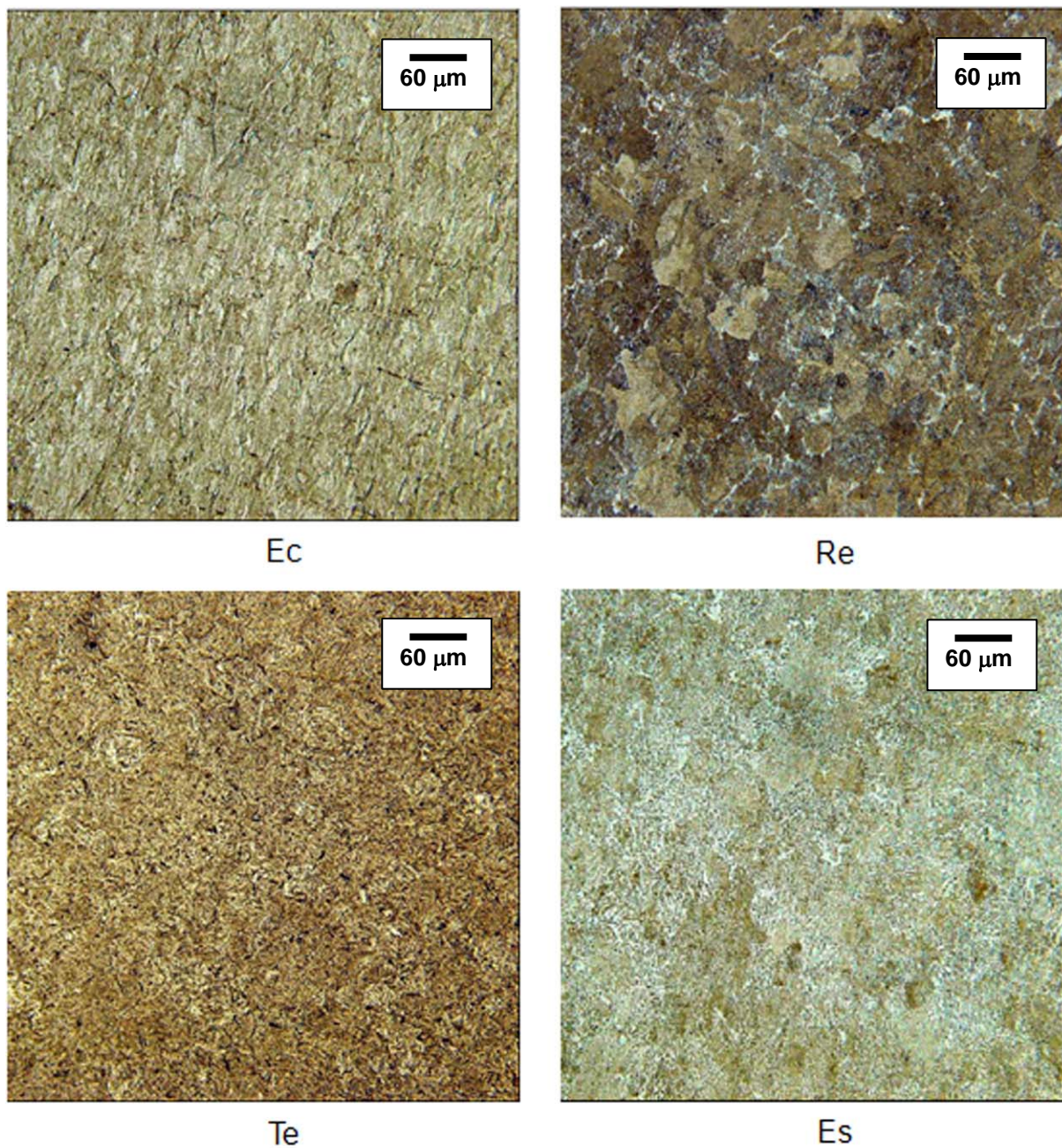


Figura 23: Microestruturas, obtidas por microscopia óptica, dos materiais analisados, ataque Nital 2%.

^x Os tratamentos térmicos foram realizados na empresa Forjas Taurus – Divisão de Forjados – São Leopoldo, RS, Brasil, sob os cuidados do Eng. Jorge Luis Braz Medeiros, M.Sc.

As amostras foram preparadas seguindo a norma NBR13284 e atacadas com reagente químico Nital 2%, conforme norma NBR 8108.

As imagens revelam as microestruturas perlítica – ferrítica com alto grau de encruamento (Amostra Ec) e recuperada (Amostra Recozida). Também foram reveladas as microestruturas martensítica (Amostra Temperada) e ferrítica com carbonetos esferoidizados (Amostra esferoidizada), mostrando o resultado dos tratamentos térmicos realizados.

Na Figura 24 estão apresentadas as curvas de tração para as amostras estudadas. Os ensaios foram conduzidos em uma máquina de ensaios Instron modelo H5585H, com taxa de carregamento de 10 kN/min.

Na Figura 25 estão apresentadas as curvas de histereses obtidas em um magnetômetro de amostra vibrante (VSM), com frequência de magnetização da ordem de 60 Hz e Campo Magnético alternado variante de -10000 a +10000 A/cm^{xi}.

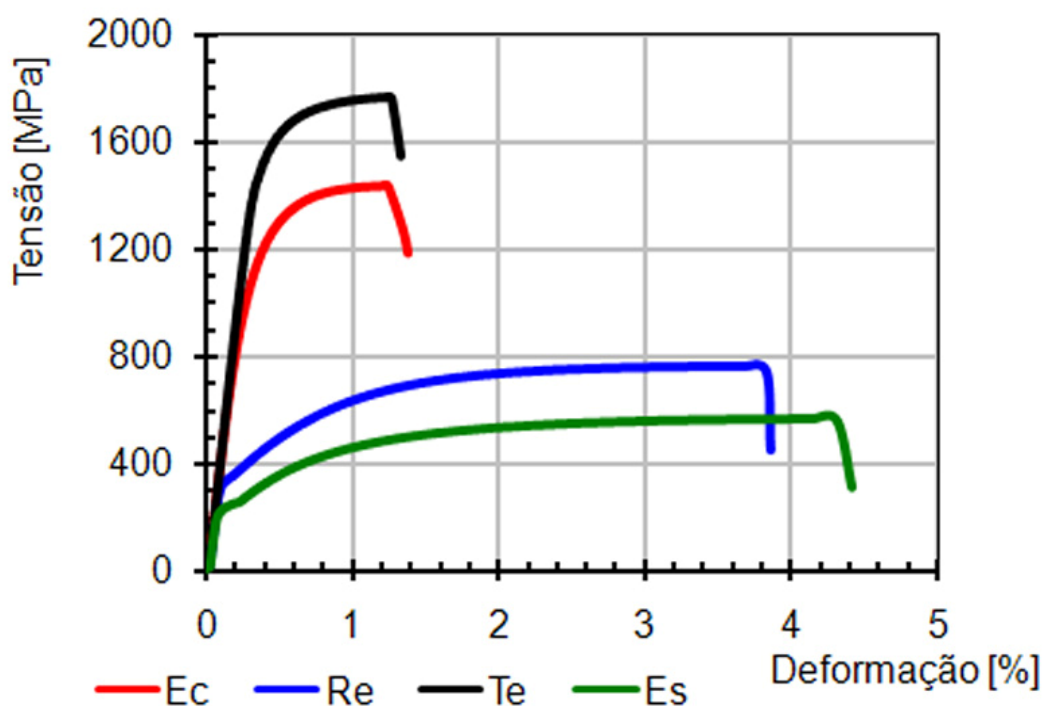


Figura 24: Curvas de tração x deformação para as amostras de aço ABNT 1060.

^{xi} Estes ensaios foram conduzidos no Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física – UFRGS, com o apoio do Prof. Dr. Luis Gustavo Pereira.

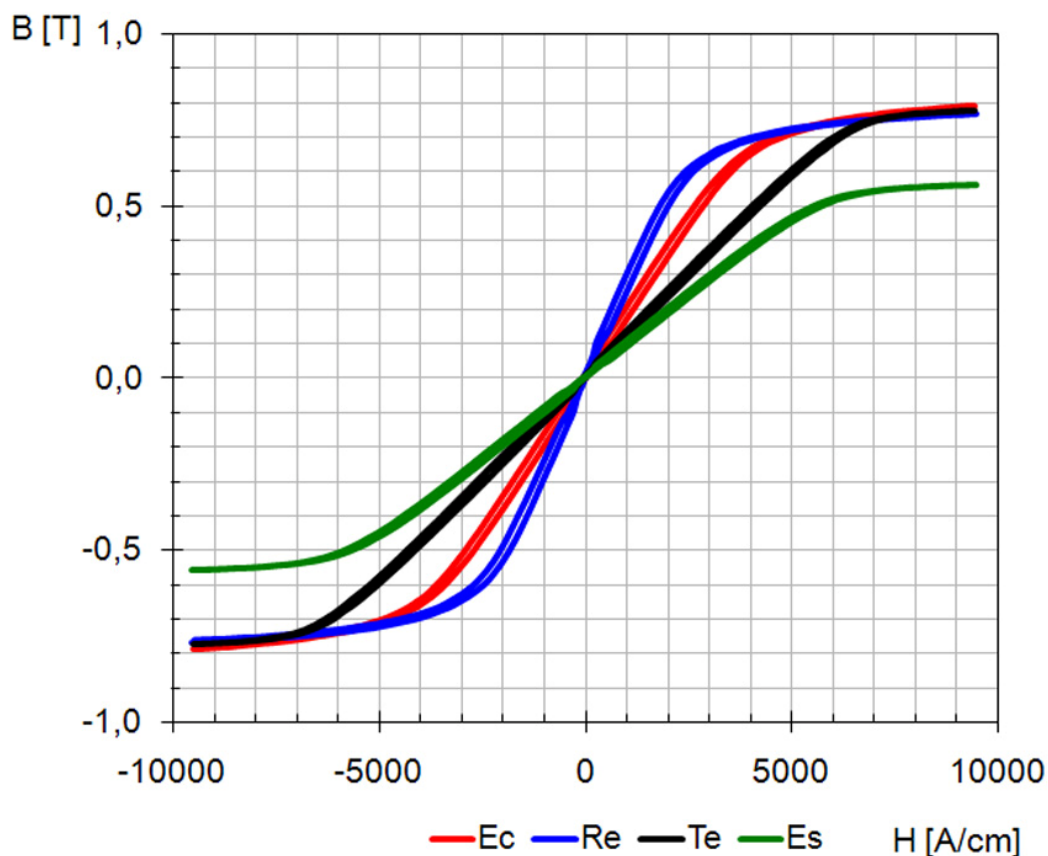


Figura 25: Curvas de histerese para as amostras de aço ABNT 1060.

A Tabela 5 apresenta um resumo das propriedades de interesse desses materiais.

Tabela 5: Propriedades de interesse para as amostras de aço ABNT1060 com diferentes microestruturas.

| | | Amostras | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Propriedades | Unidade | Ec | Re | Te | Es |
| σ_e | [MPa] | 892,4 | 320,6 | 1391,5 | 217,2 |
| σ_{max} | [MPa] | 1430,9 | 742,2 | 1766,3 | 562,4 |
| Dureza | [HV/0,2] | 442 | 306,5 | 577,25 | 259,5 |
| | [HRC] | 44 | 32 | 52 | 25 |
| $C_{elétrica}$ | [1/Ω*m] | 4,56E+06 | 4,60E+06 | 4,25E+06 | 4,96E+06 |
| Hc | [A/cm] | -25,5 | -24,5 | -40 | -33 |

Os ensaios de dureza correspondem a média de quatro indentações realizadas na escala Vickers com carga de 200 gf.

4.5 Métodos

Devido à predominância dos esforços trativos, apenas a influência destes esforços nas respostas micromagnéticas foram testadas neste trabalho.

Neste sentido, foi adquirido um equipamento modelo 3MA-II desenvolvido pelo centro de pesquisa Fraunhofer Institut – IZFP da Alemanha.

A seguir, foi customizado um sensor magnético, indicado para os ensaios em escala reduzida, contendo uma área de contato de $9 \times 3 \text{ mm}^2$.

A Figura 26 apresenta uma visualização do equipamento e do sensor especialmente desenvolvido para este trabalho.

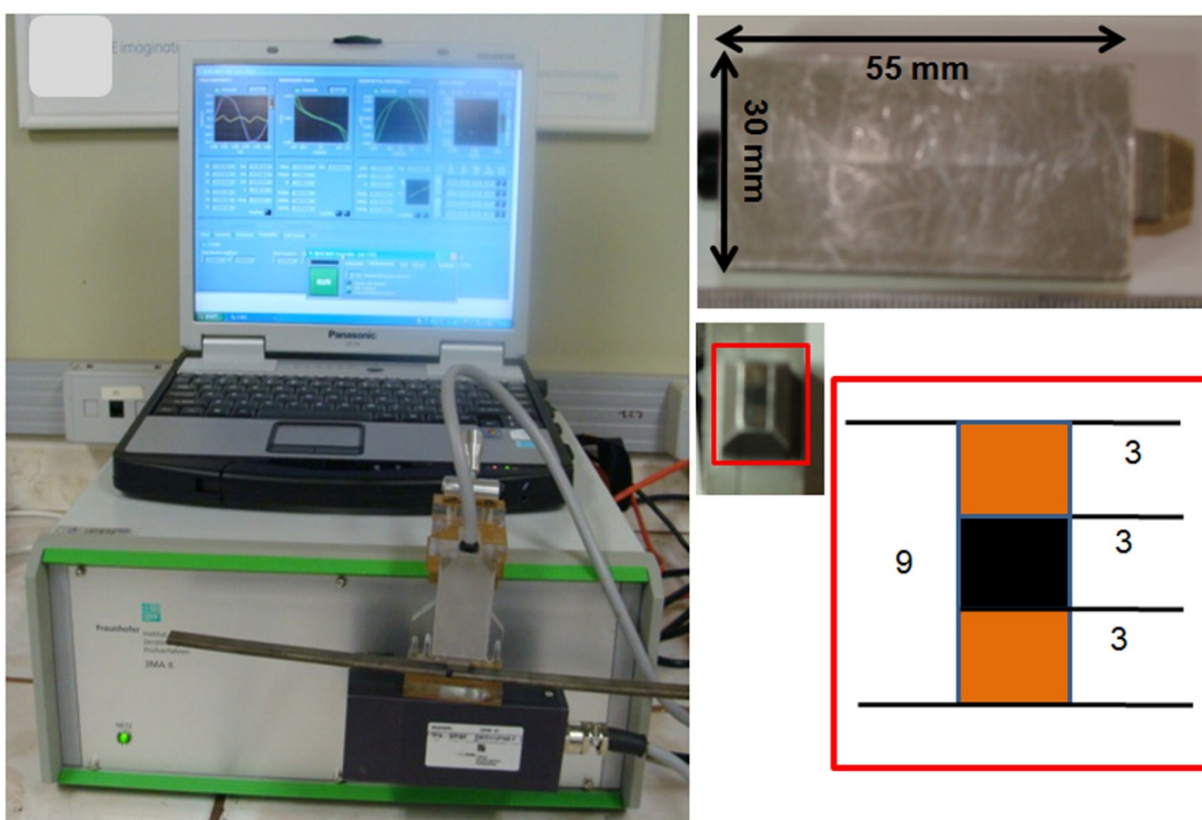


Figura 26: Equipamento micromagnético 3MA – II e um sensor micromagnético especialmente desenvolvido para este trabalho.

4.6 Projeto de Experimentos

Neste trabalho foram escolhidos os projetos fatoriais devido ao fato destes permitirem a investigação de todas as combinações de níveis de fatores e pela simplicidade de análise destes projetos, os quais possibilitam a otimização do sistema através da análise por Regressão Linear Simples ou Múltipla.

4.6.1 Formulação do Projeto

- Características de qualidade:

Definiu-se como objeto de estudo a região adjacente à conexão de Risers Flexíveis de seis polegadas de diâmetro. Uma vez que na região do conector, os arames da armadura de tração estão sujeitos a tensões da ordem de 30 a 50% do limite de escoamento do material, esses carregamentos foram tomados como base e serão averiguados nos ensaios mecânicos posteriores.

- Variáveis de respostas

A partir da utilização do equipamento 3MA-II, e com a capacidade reduzida do sensor utilizado, passou-se a trabalhar com três técnicas micromagnéticas, fornecendo um total de trinta e quatro respostas diferentes por análise.

- Fatores controláveis

A fim de se testar a viabilidade da técnica, foram variados os seguintes parâmetros: Sistema de Fixação, Microestrutura, Grau de encruamento, carregamento, espessura da camada polimérica.

- Ruído

Imprecisão das técnicas empregadas, desalinhamento de sensores e outros fatores intrínsecos dos materiais.

4.7 Matriz Experimental

Os ensaios em escala reduzida foram divididos em quatro etapas, em função do objetivo almejado.

Primeiramente, foram testadas diferentes configurações variando-se a intensidade e a frequência do campo magnético externo. Porém, percebeu-se que grande parte da variabilidade estava associada às variações angulares resultantes da fixação manual do sensor magnético na peça. Assim, foi desenvolvido um dispositivo portátil de fixação do sensor magnético, a fim de se garantir a reprodutibilidade das medidas^{xii}.

A Figura 27 apresenta um esboço do sistema de fixação desenvolvido. A fim de comprovar a eficiência destes esforços, a Figura 28 apresenta uma comparação entre os desvios padrões dos resultados obtidos com e sem a utilização do dispositivo de fixação.

^{xii} O sistema de fixação foi criado e produzido pelo colega Técnico em Metrologia Rogério Soares.

Os resultados referem-se à realização 40 repetições de ensaios. Percebe-se que a utilização deste dispositivo minimizou consideravelmente a variabilidade das medidas.

Deste modo, os demais experimentos foram conduzidos sempre com a utilização deste dispositivo de fixação.

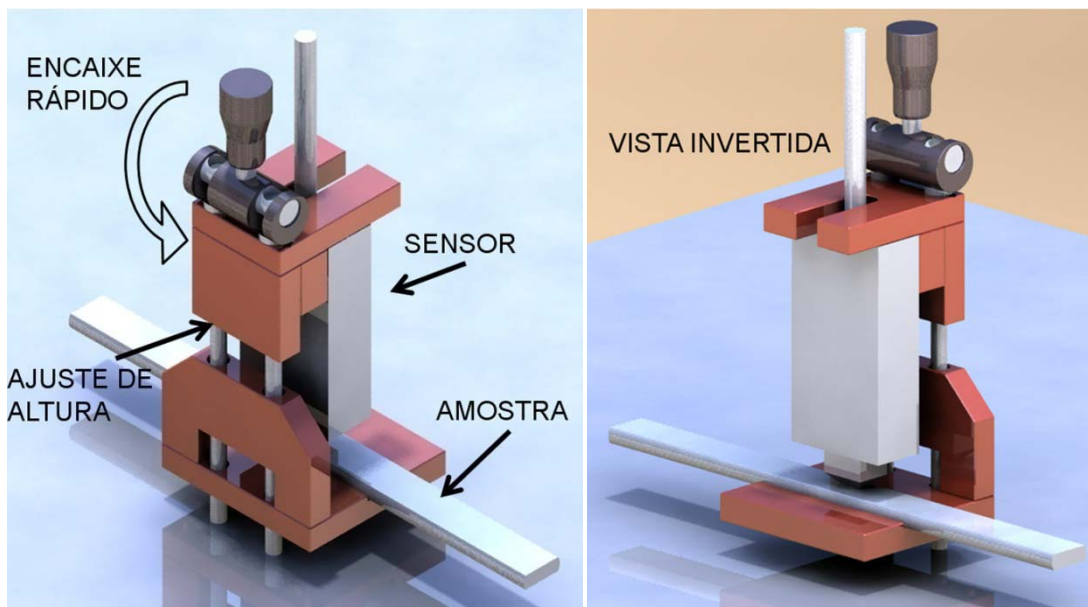


Figura 27: Dispositivo de Fixação de Sensor Magnético especialmente desenvolvido para este trabalho.

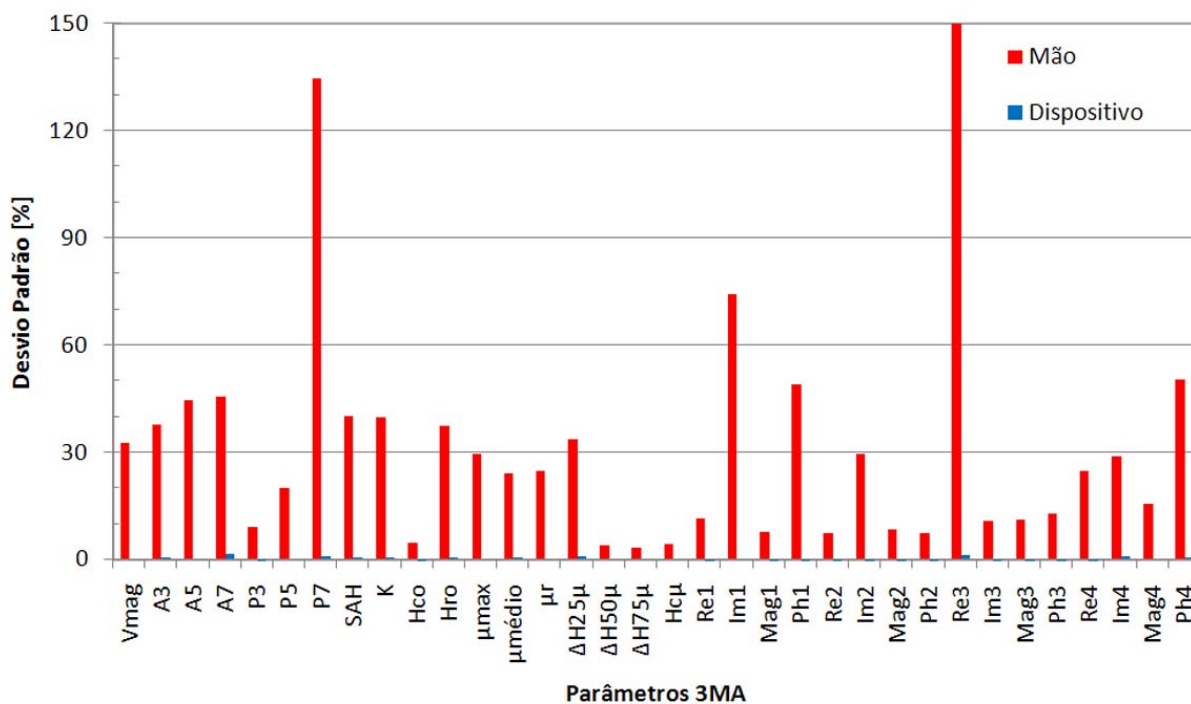


Figura 28: Comparação entre os desvios padrões dos resultados micromagnéticos obtidos com diferentes sistemas de fixação de amostra.

4.7.1 Análise dos Parâmetros Magnéticos

Objetivos:

A partir da configuração de parâmetros fornecida pelo fabricante do equipamento, esta etapa buscou, analisando amostras encruadas, otimizar os parâmetros de controle magnéticos a serem utilizados nos ensaios posteriores.

Premissas:

- Intensidade do campo magnético influi no sinal de resposta – posição analisada na curva de magnetização.
- Frequência de excitação do campo magnético externo aplicado influi na sensibilidade da medida.

Variáveis de Resposta:

Sinais resultantes das seguintes técnicas: Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial (AHCT), Análise Incremental da Permeabilidade (AIP) e Análise Multi – frequência das Correntes Parasitas (ACP).

Fatores Controláveis:

- Configuração de parâmetros:
 - A) $F_H = 200 \text{ Hz}$; $H_{AHCT} = 20 \text{ A/cm}$, $H_{AIP} = 20 \text{ A/cm}$, $H_{ACP} = 20 \text{ A/cm}$ (Configuração fornecida pelo Fabricante do Equipamento)
 - B) $F_H = 200 \text{ Hz}$; $H_{AHCT} = 35 \text{ A/cm}$, $H_{AIP} = 15 \text{ A/cm}$, $H_{ACP} = 15 \text{ A/cm}$.
 - C) $F_H = 200 \text{ Hz}$; $H_{AHCT} = 35 \text{ A/cm}$, $H_{AIP} = 20 \text{ A/cm}$, $H_{ACP} = 15 \text{ A/cm}$.
 - D) $F_H = 200 \text{ Hz}$; $H_{AHCT} = 35 \text{ A/cm}$, $H_{AIP} = 25 \text{ A/cm}$, $H_{ACP} = 15 \text{ A/cm}$.
- Carregamento (σ_{EXT}) [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % σ_e].

Repetições: 40 análises por amostra.

Resultados Esperados: Definição dos valores ótimos dos parâmetros de controle em função das variáveis de resposta.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios Instron modelo H5585H, com taxa de carregamento de 10 kN/min.

A Figura 29 apresenta uma visualização da configuração de equipamentos para os ensaios de tração. Note que temos da esquerda para a direita: Computador controlador do sistema magnético; Computador para monitoramento de deformações

– Sistema de aquisição de dados Spider 8 – Equipamento micromagnético 3MA-II; Computador de controle da máquina de ensaios; Máquina de ensaios Instron e uma visão detalhada do posicionamento do sensor na peça.



Figura 29: Configuração dos equipamentos utilizados durante os ensaios de tração das tiras da armadura de tração de Risers flexíveis de 6”.

4.7.2 Análise da influência do Encruamento

Objetivos:

Definir a sensibilidade das medidas para a presença de encruamento nas camadas superficiais em função da variação de carregamentos. É sabido que a variação da densidade de discordâncias influi no movimento das paredes de domínio magnético, influenciando assim na intensidade e característica dos sinais magnéticos gerados.

Premissas:

Os sinais micromagnéticos são dependentes da configuração de discordâncias atuando como barreiras aos movimentos das paredes de domínio magnéticos no interior do componente.

Variáveis de resposta:

Sinais resultantes das seguintes técnicas: AHCT, AIP, ACP.

Fatores controláveis:

- Configuração: $F_H = 200$ Hz; $H_{AHCT} = 35$ A/cm, $H_{AIP} = 25$ A/cm, $H_{ACP} = 15$ A/cm;
- Carregamento (σ_{EXT}) [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % σ_e];
- Condição [Encruado, recozido].

Repetições: 40 análises por amostra.

Resultados Esperados:

Separação dos efeitos do carregamento e do encruamento sobre as propriedades micromagnéticas dos materiais.

4.7.3 Análise da Influência da MicroestruturaObjetivos:

Definir a sensibilidade das medidas para diferentes microestruturas e carregamentos. Os sinais micromagnéticos dependem da Microestrutura e do estado de tensões atuante no componente, através destes ensaios espera-se separar estes efeitos, identificando-se a sensibilidade de cada técnica em função das variáveis estudadas.

Premissas:

As respostas micromagnéticas são dependentes da Microestrutura e do estado de tensões atuante no componente.

Variáveis de Resposta:

Sinais resultantes das seguintes técnicas: AHCT, AIP, ACP.

Fatores Controláveis:

- Configuração: $F_H = 200$ Hz; $H_{AHCT} = 35$ A/cm, $H_{AIP} = 25$ A/cm, $H_{ACP} = 15$ A/cm;
- Carregamento (σ_{EXT}) [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % σ_e];
- Microestrutura (M) [Encruado, Temperado, Esferoidizado];

Repetições: 40 análises por amostra.

Resultados Esperados: Separação dos efeitos do carregamento e da microestrutura sobre as propriedades micromagnéticas dos materiais.

4.7.4 Análise da influência do Lift Off

Objetivos:

Analisar os efeitos da variação do Lift off nas medidas micromagnéticas a partir da variação do estado de tensões. Para tal, foram desenvolvidos dispositivos poliméricos com diferentes espessuras, simulando diferentes condições de afastamento. A Figura 30 apresenta uma visualização destes ensaios.

Premissas:

A presença de um material não ferromagnético entre o sensor e a amostra pode ser considerada uma barreira para a propagação de sinais, causando uma atenuação nos sinais medidos.

Variáveis de Resposta:

- Sinais resultantes das seguintes técnicas: AHCT, AIP, ACP.

Fatores Controláveis:

- Configuração: $F_H = 200$ Hz; $H_{AHCT} = 35$ A/cm, $H_{AIP} = 25$ A/cm, $H_{ACP} = 15$ A/cm.
- Carregamento (σ_{EXT}) [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % σ_e],
- Espessura da camada de Polímero (Lift off) [0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 mm],

Repetições: 40 análises por amostra.

Resultados Esperados:

Identificação dos sinais mais sensíveis ao efeito do Lift off.

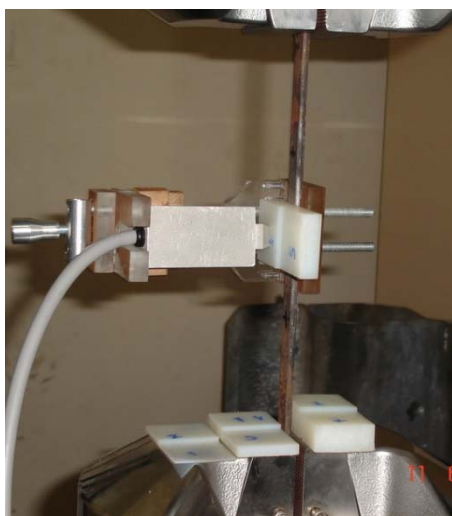


Figura 30: Posicionamento do sensor durante os ensaios com simulação de lift off.

5 RESULTADOS

Partindo-se da configuração de parâmetros fornecidas pelo fabricante, as primeiras medidas foram obtidas, sem a aplicação de carregamento, variando-se a frequência de magnetização na faixa de 100 a 300 Hz. Os resultados indicaram a frequência de 200 Hz como potencial de aplicação (devido à boa intensidade e estabilidade dos sinais obtidos). A seguir, buscando analisar a influência da intensidade de magnetização, os ensaios foram repetidos variando-se também a intensidade do campo magnético para os valores de 20, 25 e 30 A/cm. Os resultados indicaram a dependência singular para cada técnica.

Deste modo, após a revisão da literatura, optou-se por testar a influência da interação entre a intensidade do campo magnético para as diferentes técnicas. Estes estudos foram conduzidos variando-se a intensidade do campo magnético em diferentes níveis para cada técnica. No total, foram testadas 36 configurações, das quais 3 foram selecionadas para a etapa seguinte, onde foi considerada a influência do carregamento, utilizando-se valores inferiores e superiores à coercitividade magnética dos materiais. Os critérios utilizados para tal seleção foram a aproximação do valor de coercitividade (determinado a partir das curvas de histerese - Figura 25) e a intensidade dos demais sinais obtidos.

A configuração inicial (fornecida com o equipamento) também foi testada nesta etapa. Os resultados destes ensaios preliminares estão apresentados no ANEXO 1.

A seguir, serão apresentados os resultados referentes à:

- Análise dos Parâmetros Magnéticos;
- Análise da influência do Encruamento e da Microestrutura;
- Análise da Influência do Lift off na respostas Micromagnéticas.

Além dos resultados micromagnéticos, serão apresentados os resultados da análise estatística e das etapas de calibração efetuada através da regressão multi – linear através do programa MMS, o qual utiliza o sistema de seleção progressiva dos regressores e os critérios de seleção de 3,9 (f_{sai}) e 4 (f_{entra})^{xiii}.

^{xiii} O procedimento de seleção progressiva está baseado no princípio de que os regressores devem ser adicionados ao modelo um de cada vez até que não haja mais candidatos que produzam aumento significativo

5.1 Análise dos Parâmetros Magnéticos

5.1.1 Apresentação dos Resultados

Primeiramente, serão apresentados os resultados obtidos através da técnica de Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial. Os resultados estão dispostos nas figuras 31 – 41, onde as configurações A, B, C, D diferem devido à intensidade dos campos magnéticos aplicados para cada técnica.

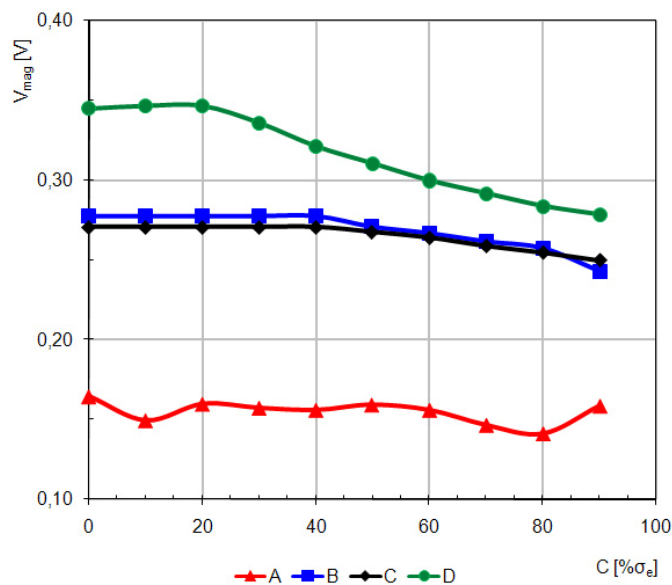


Figura 31: Variação de V_{mag} em função do carregamento (AHCT).

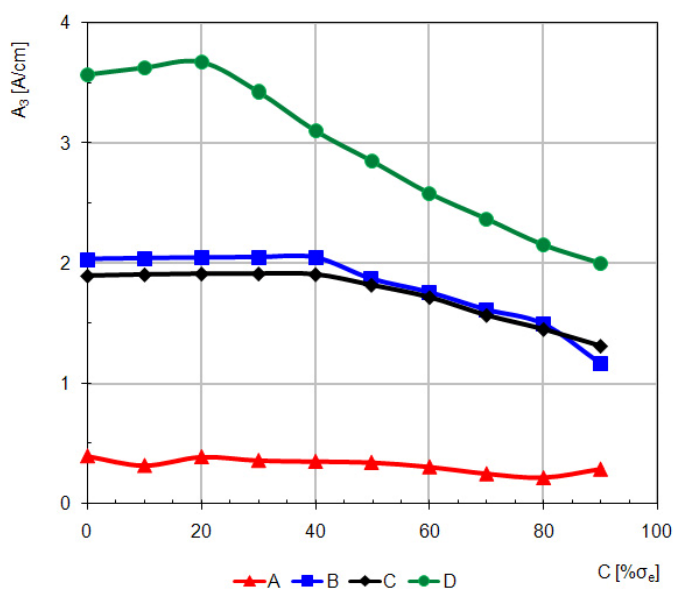


Figura 32: Variação de A_3 em função do carregamento (AHCT).

na soma quadrática da regressão. Isto é, variáveis são adicionadas uma de cada vez desde que seu valor parcial de F exceda f_{entra} .

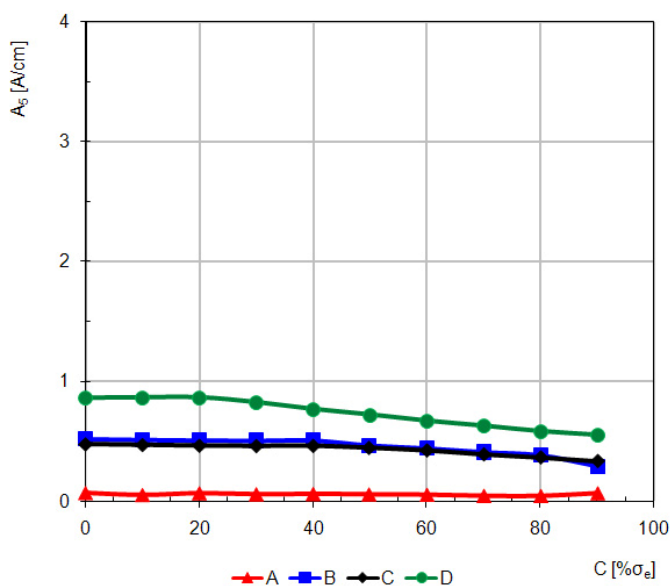


Figura 33: Variação de A_5 em função do carregamento (AHCT).

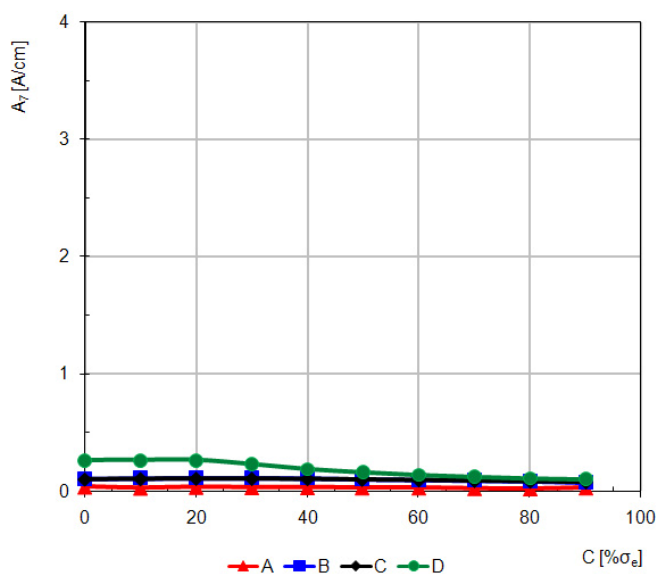


Figura 34: Variação de A_7 em função do carregamento (AHCT).

Nota-se que tanto para V_{mag} quanto para as amplitudes das harmônicas os resultados da configuração D apresentaram maior dependência à variação de carregamento. A configuração A, fornecida pelo fabricante, apresentou pouca sensibilidade à variação de carregamento para estes parâmetros. É importante lembrar que para esta técnica foi utilizado o mesmo campo magnético para as configurações B, C, D. A diferença nos resultados é um indicio da interação entre os parâmetros de controle utilizados nas diferentes técnicas.

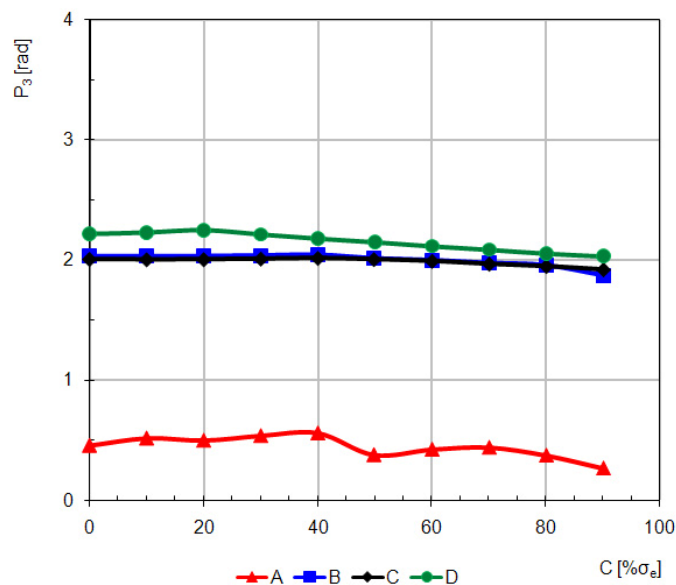


Figura 35: Variação de P_3 em função do carregamento (AHCT).

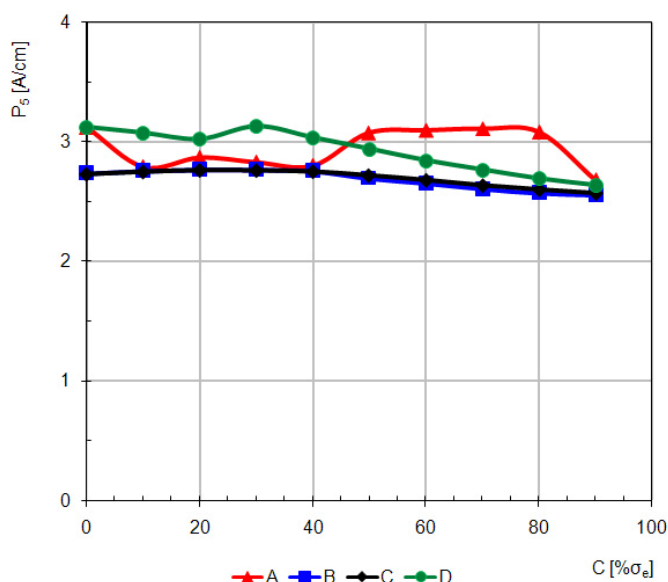


Figura 36: Variação de P_5 em função do carregamento (AHCT).

Os ângulos de fases das 3^a, 5^a e 7^a (Figura 37, a seguir) Harmônicas também apresentaram sensibilidade à variação de carregamentos, sendo este efeito mais pronunciado para a 7^a Harmônica. Mais uma vez, as maiores variações foram apresentadas pela configuração D. Os resultados até aqui apresentados apresentam pouca sensibilidade na faixa de 0 a 20% do limite de escoamento do material, indicando a influência do grau de encruamento nas propriedades micromagnéticas do material, em especial, no avanço dos processos de magnetização.

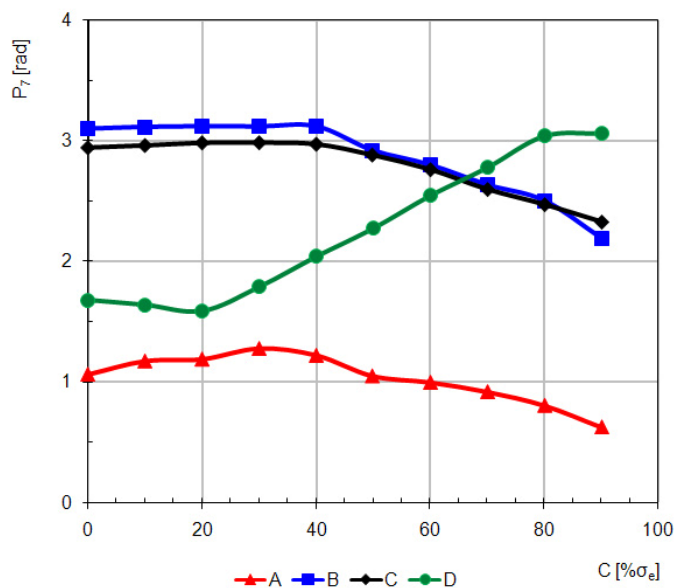


Figura 37: Variação de P_7 em função do carregamento (AHCT).

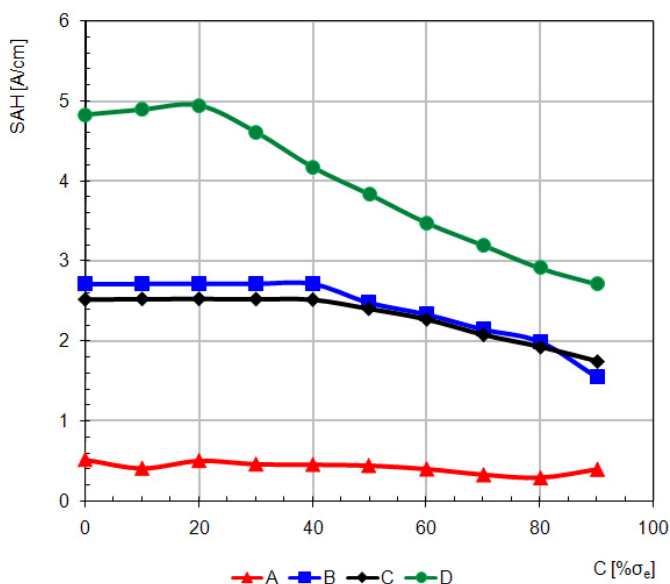


Figura 38: Variação de SAH em função do carregamento (AHCT).

Seguindo a sensibilidade apresentada pelas ondas harmônicas, o somatório de suas amplitudes apresentou boa sensibilidade à variação de carregamento, sendo este um parâmetro passível de aplicação para a etapa seguinte de calibração por regressão linear. Os resultados obtidos com a configuração A apresentaram pouca sensibilidade às variações de carregamento, indicando a necessidade de utilizarem-se campos magnéticos mais intensos para esta técnica.

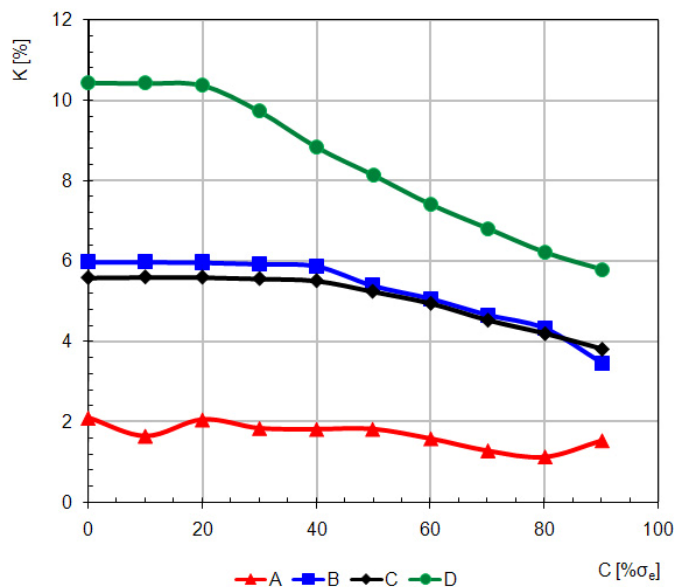


Figura 39: Variação de K em função do carregamento (AHCT).

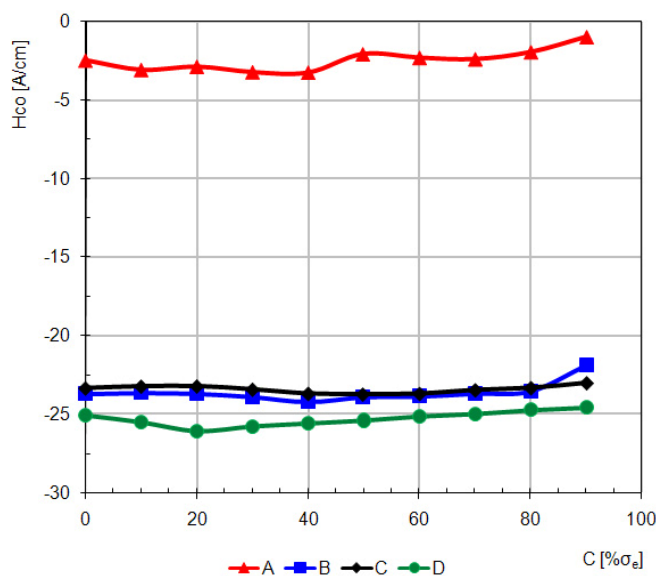


Figura 40: Variação de Hco em função do carregamento (AHCT).

A distorção harmônica apresentou grande sensibilidade à variação de carregamento, em concordância com o exposto na literatura.

Os resultados obtidos através da medida indireta da Coercitividade (Hco) apresentaram pouca dependência à variação de carregamento. Sendo que, os resultados obtidos para a configuração A, indicam a obtenção de curvas de Histerese estreitas, evidenciando a insuficiência desta configuração em magnetizar a amostra analisada.

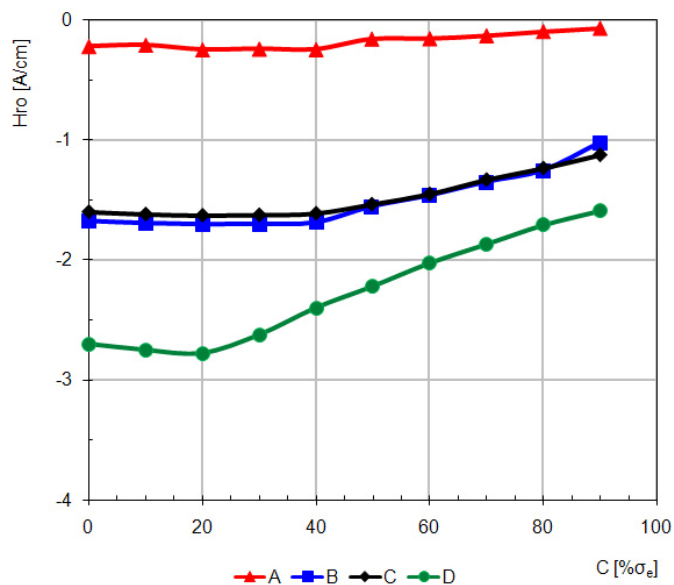


Figura 41: Variação de H_{ro} em função do carregamento (AHCT).

Como boa parte dos parâmetros analisados pela técnica de AHCT, a porção da onda harmônica no início do processo de magnetização (H_{ro}) apresentou uma boa dependência com a variação de carregamento, sendo a configuração D a que apresentou a maior sensibilidade.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos para a Análise Incremental da Permeabilidade Magnética, utilizando-se campos magnéticos de 15, 20 e 25 A/cm.

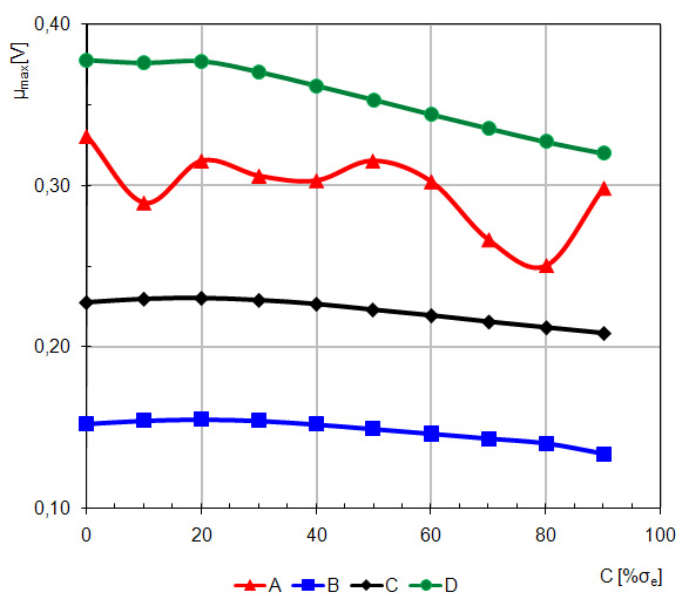


Figura 42: Variação de μ_{max} em função do carregamento (AIP).

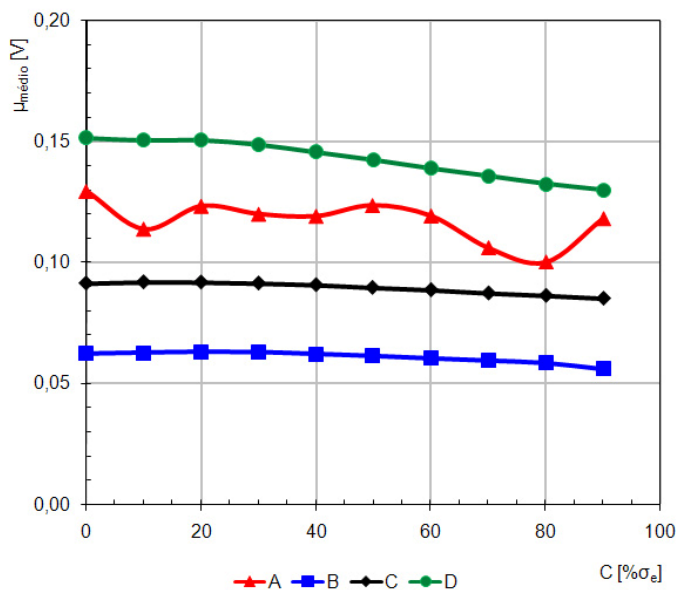


Figura 43: Variação de $\mu_{\text{médio}}$ em função do carregamento (AIP).

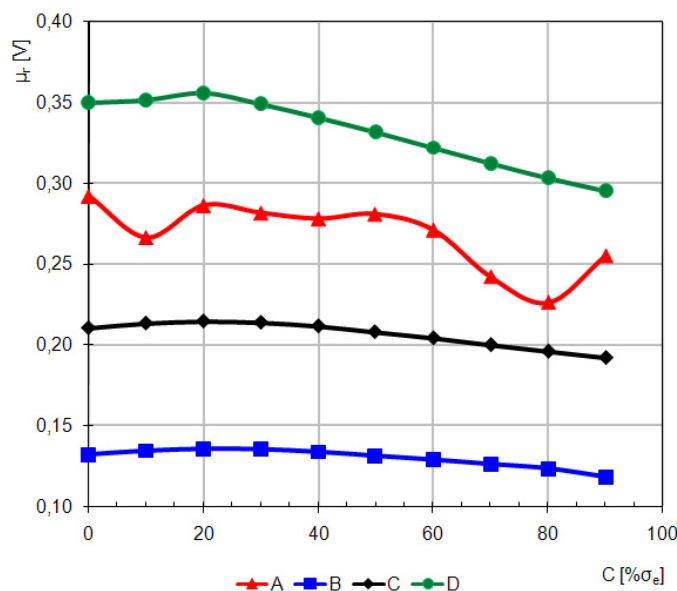


Figura 44: Variação de μ_r em função do carregamento (AIP).

Nota-se que o máximo da curva de permeabilidade (μ_{max}), a intensidade média do sinal para um dado número de ciclos ($\mu_{\text{médio}}$) e o valor da permeabilidade na origem da curva de histerese (μ_r) apresentaram variações suaves com o carregamento, especialmente a partir dos 20% de σ_e , valor a partir do qual são acentuados os movimentos de parede de domínio magnético. Para os três parâmetros analisados, a configuração D foi a que apresentou a sensibilidade mais pronunciada.

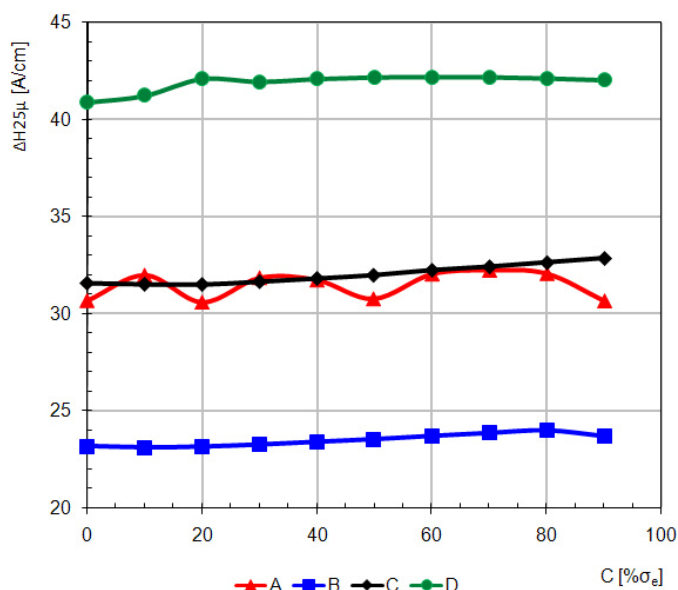


Figura 45: Variação de $\Delta H_{25\mu}$ em função do carregamento (AIP).

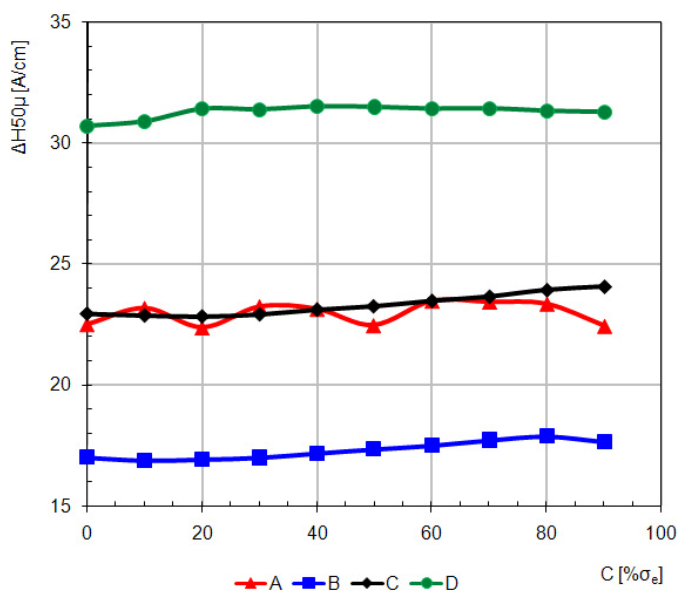


Figura 46: Variação de $\Delta H_{50\mu}$ em função do carregamento (AIP).

Os parâmetros referentes à posição do pico de permeabilidade ($H_{c\mu}$) e as diferentes larguras do mesmo ($\Delta H_{25\mu}$, $\Delta H_{50\mu}$, $\Delta H_{75\mu}$), apresentaram pouca sensibilidade às variações de carregamento. Sendo que a configuração D apresentou os valores mais intensos, referentes à picos mais intensos de variação da permeabilidade. Neste sentido, pode-se inferir que os valores mais intensos de magnetização resultaram num processo mais pronunciado de magnetização. Em todos os casos, esta técnica apresenta potencial aplicação para os casos de análise da variação do estado de tensões em componentes ferromagnéticos.

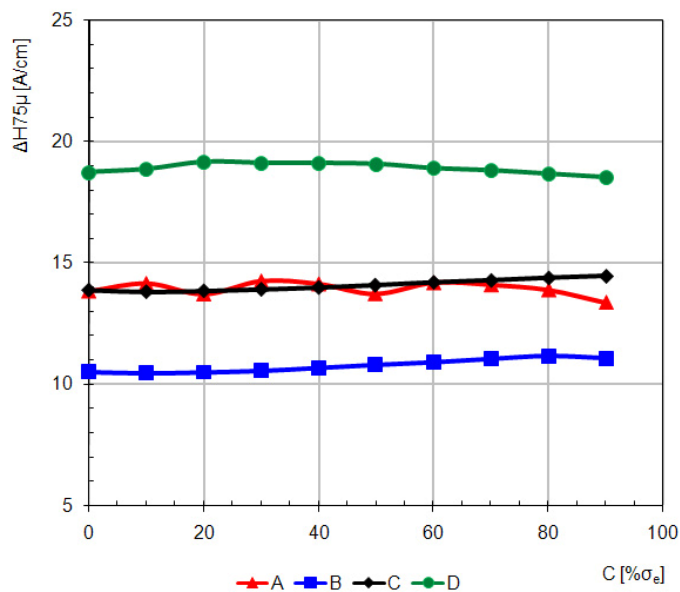


Figura 47: Variação de $\Delta H_{75\mu}$ em função do carregamento (AIP).

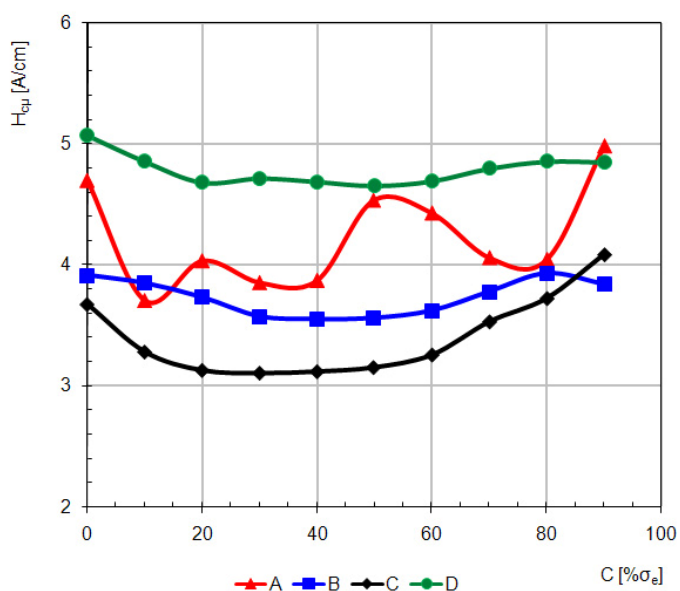


Figura 48: Variação de H_{cu} em função do carregamento (AIP).

As figuras 49 – 64 apresentam os resultados obtidos através da técnica de análise da impedância das correntes parasitas. Para este ensaio foram utilizadas quatro frequências de análise ($f_{A1} = 5$ kHz, $f_{A2} = 10$ kHz, $f_{A3} = 20$ kHz e $f_{A4} = 40$ kHz) a partir dos parâmetros de controle definidos nas configurações A, B, C e D.

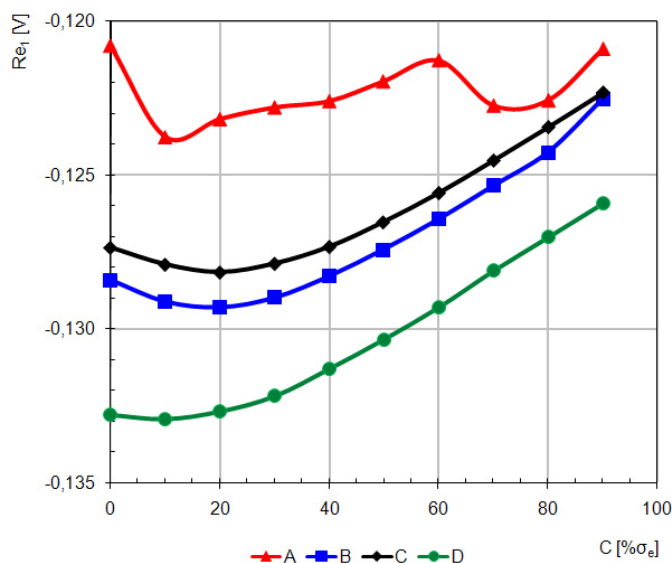


Figura 49: Variação de Re_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

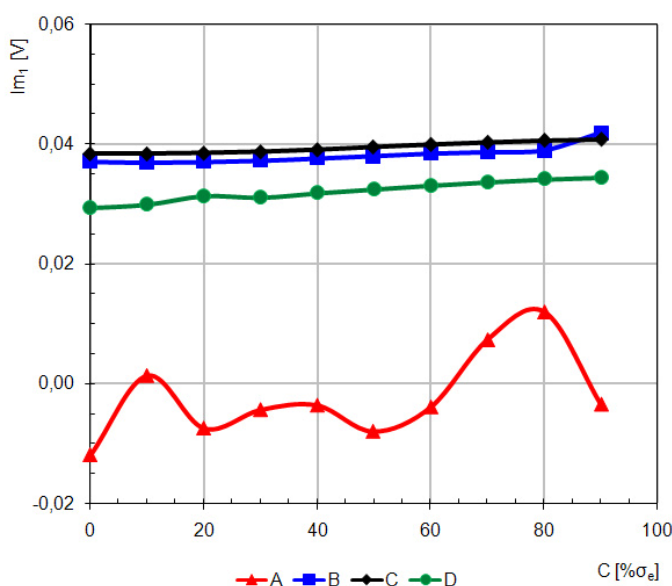


Figura 50: Variação de Im_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

A Figura 49 apresenta a boa sensibilidade da parte real da impedância das correntes parasitas em relação à variação de carregamentos para a banda de frequência de até 5 kHz. A Figura 50 mostra que a parte Imaginária apresenta uma variação pouco pronunciada. Apesar das diferenças nas magnitudes, a configuração D apresentou uma curva mais linearizada para estes parâmetros, justificando sua escolha para os ensaios posteriores. As Figuras 51 e 52 apresentam os resultados referentes à magnitude e do ângulo de fase da Impedância das correntes parasitas. Estes resultados referem-se à frequência de análise de 5 kHz.

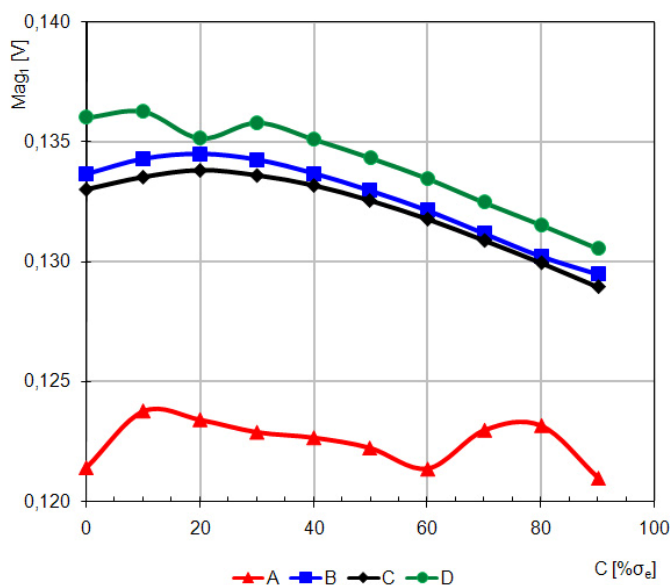


Figura 51: Variação de Mag_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

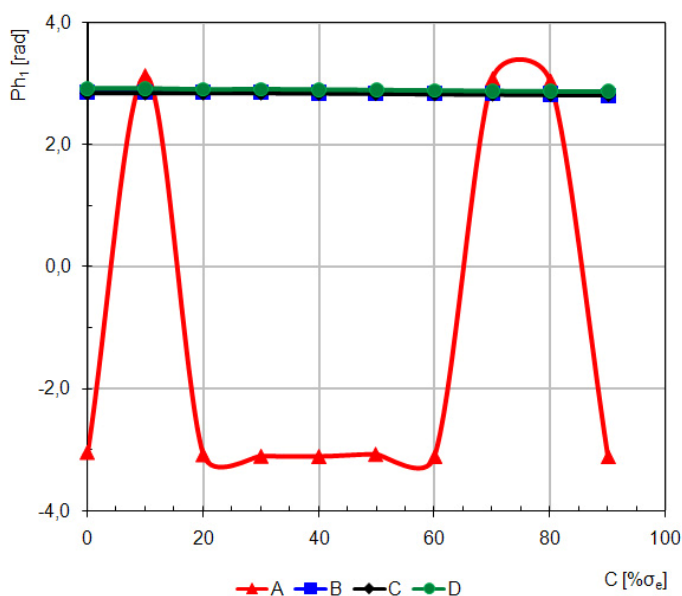


Figura 52: Variação de Ph_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

As figuras mostraram a variabilidade resultante da configuração A. A queda de sinal ocorrida para o valor de 20% de σ_e para a configuração D, pode ser entendida como erro de medida, causada pela mudança de posicionamento do sensor^{xiv}. Com tudo, os resultados para as demais configurações mostraram que este sinal tem pouca sensibilidade para a variação de carregamentos.

As figuras 53 a 56 referem-se à frequência de análise de 10 kHz.

^{xiv} Periodicamente, o sistema (3MA-II) solicita que o sensor seja afastado da superfície, a fim de calibrar a eletrônica do sensor em relação aos efeitos eletromagnéticos da amostra e o meio externo.

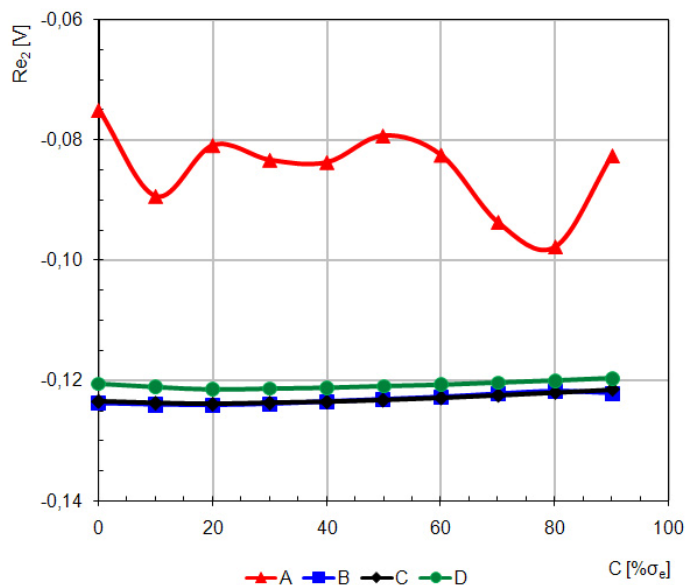


Figura 53: Variação de Re_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

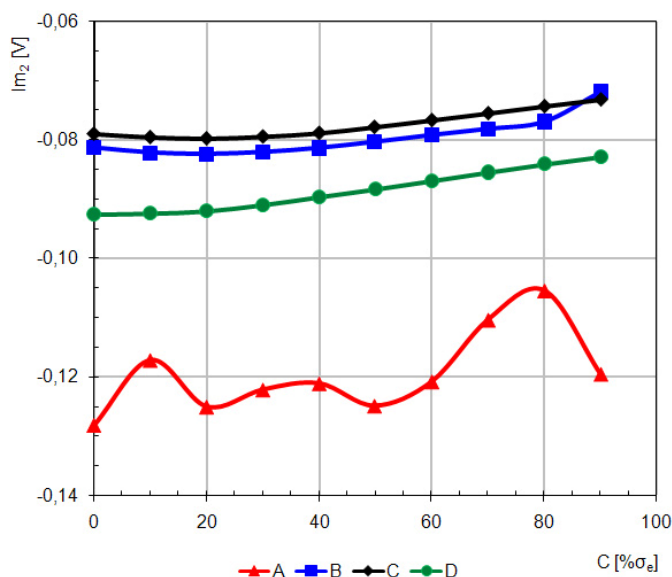


Figura 54: Variação de Im_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

Os resultados obtidos para a frequência de 10 kHz apresentaram pouca variação com o carregamento, especialmente, as porções real e imaginária da impedância das correntes parasitas. A magnitude da impedância (Mag_2) apresentou uma variação mais pronunciada, onde, mais uma vez, os melhores resultados foram obtidos através da configuração D.

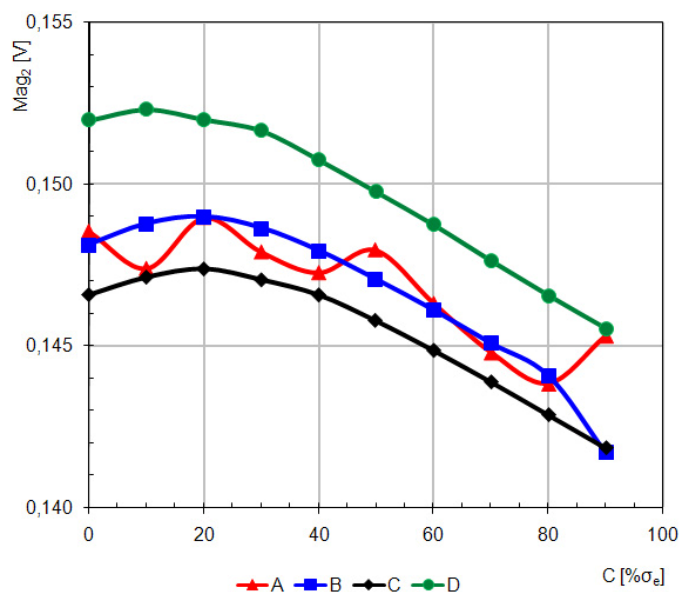


Figura 55: Variação de Mag_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

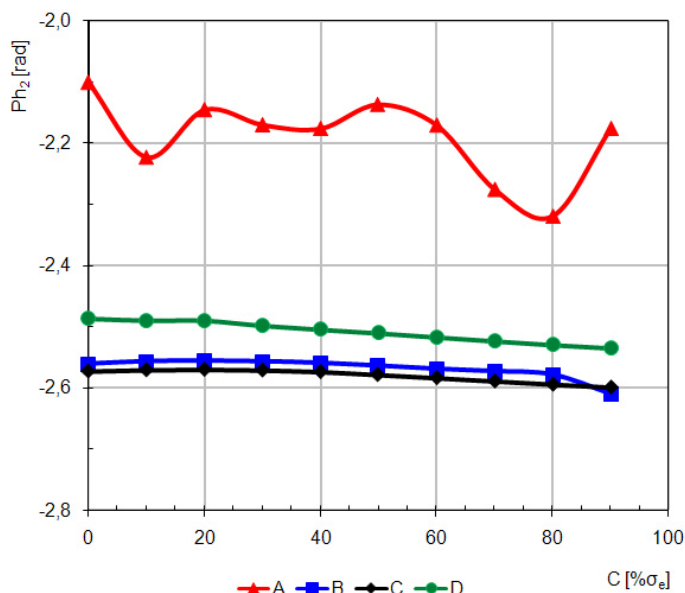


Figura 56: Variação de Ph_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

As figuras 57 a 60 apresentam os resultados obtidos utilizando uma frequência de análise de 20 kHz. Neste caso, percebe-se uma mudança de comportamento, onde a variação na parte imaginária das correntes parasitas foi mais pronunciada do que os demais parâmetros. É importante lembrar que, de acordo com o efeito skin (Equação 1) a frequência de análise influi diretamente na profundidade de origem do sinal analisado, sendo que os maiores valores referem-se às camadas mais superficiais.

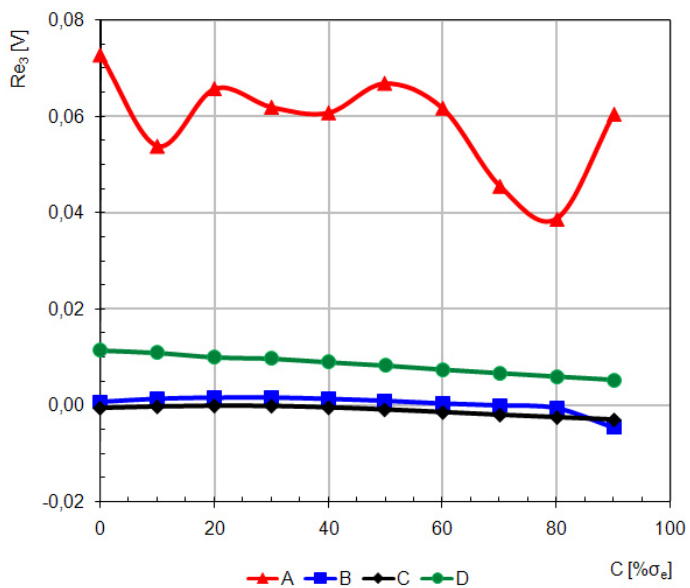


Figura 57: Variação de Re_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$.

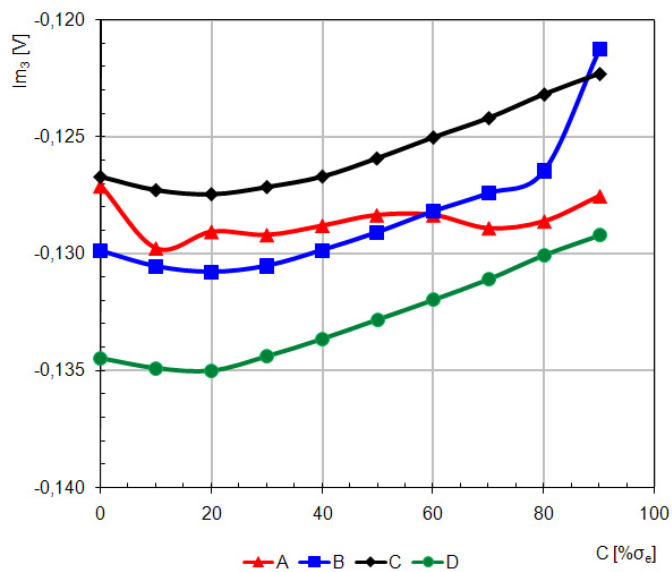


Figura 58: Variação de Im_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$.

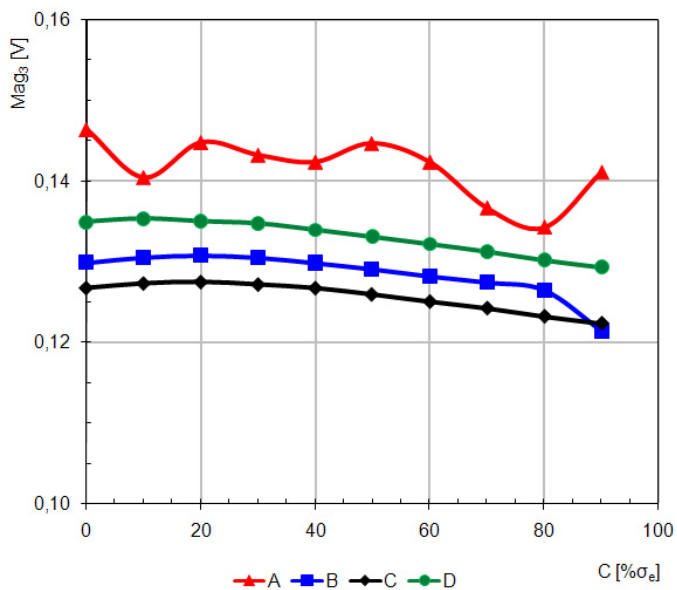


Figura 59: Variação de Mag_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$..

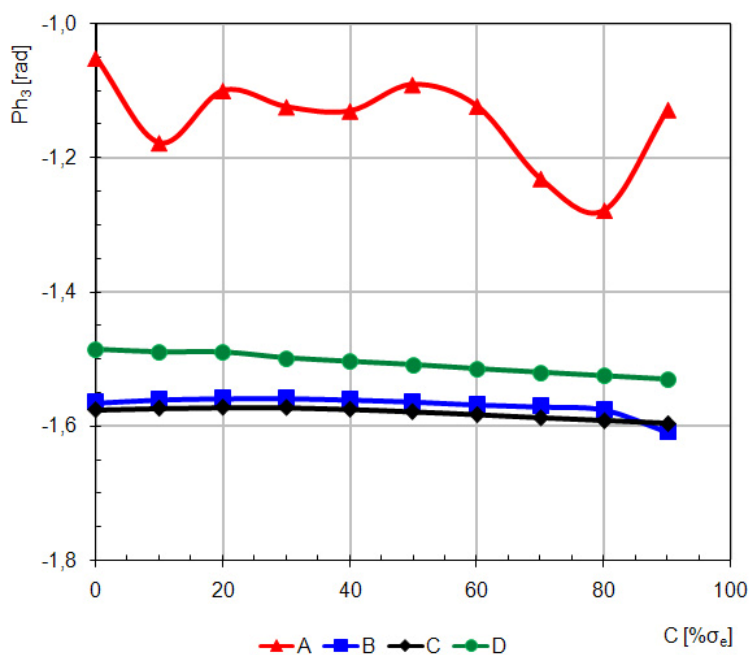


Figura 60: Variação de Ph_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$..

As figuras 61 a 64 apresentam os resultados obtidos utilizando uma frequência de análise de 40 kHz. Neste caso, percebe-se baixa sensibilidade dos parâmetros analisados em relação à variação de carregamento. Isto pode ser justificado pelo menor volume de material analisado (devido à alta frequência de análise utilizada) o que limita a intensidade dos sinais gerados durante o processo de magnetização da amostra.

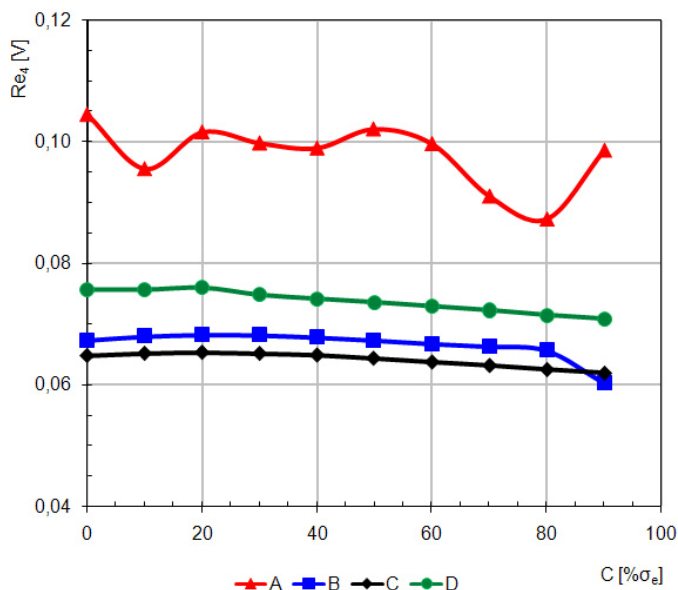


Figura 61: Variação de Re_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

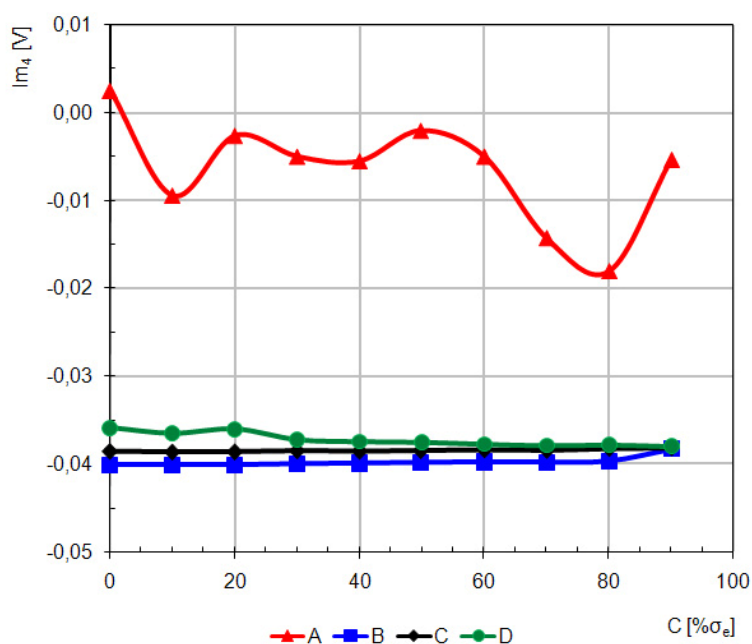


Figura 62: Variação de Im_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

Os resultados obtidos nesta etapa são de caráter qualitativo e visam demonstrar representatividade (através da melhor sensibilidade e do aumento do número de parâmetros sensíveis) alcançada com a utilização da configuração D. A fim de evidenciar quantitativamente esta melhoria, as tabelas 6 e 7 apresentam os resultados da análise estatística realizada a partir dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho. Para tal, os resultados representam a média das 40 análises, a correlação (r) e o coeficiente de determinação (r^2).

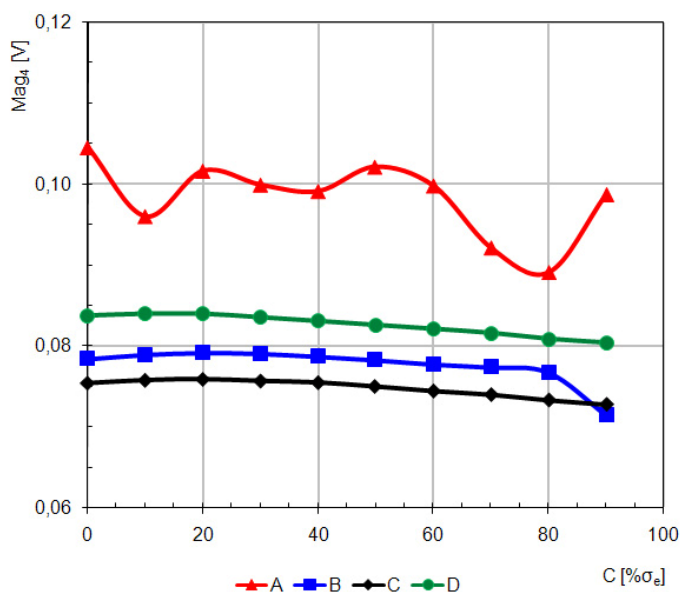


Figura 63: Variação de Mag_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

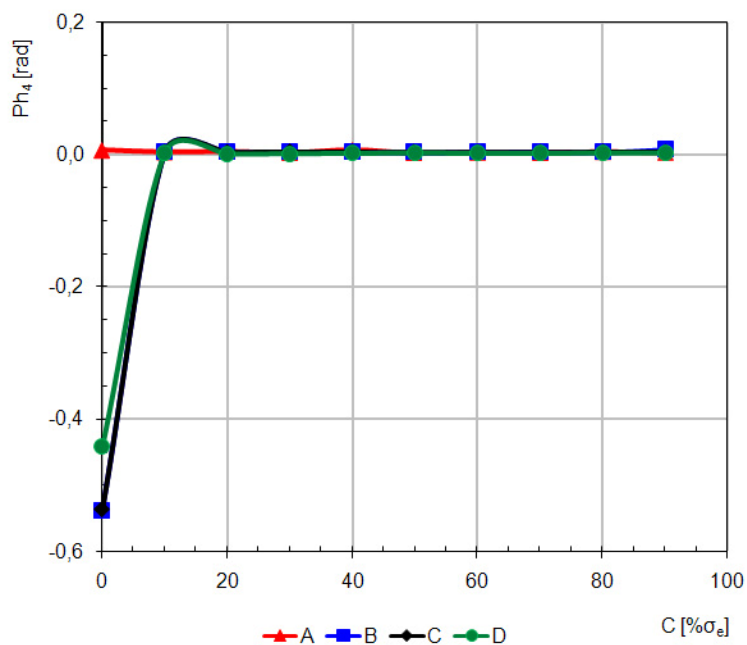


Figura 64: Variação de Ph_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

5.1.2 Análise Estatística

A Tabela 6 apresenta a análise estatística dos resultados obtidos para diferentes configurações de parâmetros através da análise micromagnética do efeito da variação de carregamentos para as amostras encruadas.

Tabela 6: Análise Estatística dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho.

| Análise Estatística | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|------------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------|------|-------|-------|-------|
| Parâmetro | | Média | | | | r | | | | r ² | | | | |
| Configuração | | A | B | C | D | A | B | C | D | A | B | C | D | |
| AHCT | V _{mag} | V | 0,15 | 0,27 | 0,26 | 0,32 | -0,46 | -0,89 | -0,90 | -0,98 | 0,22 | 0,80 | 0,81 | 0,96 |
| | A ₃ | A/cm | 0,33 | 1,81 | 1,74 | 2,94 | -0,80 | -0,90 | -0,90 | -0,97 | 0,65 | 0,80 | 0,80 | 0,95 |
| | A ₅ | A/cm | 0,05 | 0,45 | 0,43 | 0,73 | -0,43 | -0,91 | -0,93 | -0,98 | 0,19 | 0,82 | 0,86 | 0,96 |
| | A ₇ | A/cm | 0,03 | 0,10 | 0,10 | 0,18 | -0,71 | -0,88 | -0,88 | -0,98 | 0,51 | 0,77 | 0,77 | 0,95 |
| | P ₃ | rad | 0,45 | 2,00 | 1,99 | 2,15 | -0,73 | -0,83 | -0,82 | -0,96 | 0,53 | 0,69 | 0,68 | 0,92 |
| | P ₅ | rad | 2,94 | 2,69 | 2,70 | 2,93 | 0,04 | -0,90 | -0,88 | -0,94 | 0,00 | 0,82 | 0,77 | 0,89 |
| | P ₇ | rad | 1,03 | 2,86 | 2,79 | 2,25 | -0,80 | -0,90 | -0,89 | 0,97 | 0,64 | 0,82 | 0,79 | 0,94 |
| | SAH | A/cm | 0,42 | 2,41 | 2,31 | 3,96 | -0,77 | -0,90 | -0,90 | -0,98 | 0,59 | 0,81 | 0,82 | 0,95 |
| | K | % | 1,68 | 5,26 | 5,06 | 8,42 | -0,79 | -0,92 | -0,92 | -0,98 | 0,62 | 0,85 | 0,85 | 0,97 |
| | Hco | A/cm | -2,47 | -23,61 | -23,42 | -25,29 | 0,73 | 0,51 | 0,02 | 0,68 | 0,53 | 0,26 | 0,00 | 0,46 |
| | Hro | A/cm | -0,18 | -1,51 | -1,47 | -2,27 | 0,87 | 0,90 | 0,90 | 0,97 | 0,76 | 0,81 | 0,81 | 0,95 |
| AIP | μ _{max} | V | 0,30 | 0,15 | 0,22 | 0,35 | -0,62 | -0,91 | -0,93 | -0,98 | 0,38 | 0,83 | 0,87 | 0,96 |
| | μ _{médio} | V | 0,12 | 0,06 | 0,09 | 0,14 | -0,60 | -0,90 | -0,95 | -0,98 | 0,36 | 0,80 | 0,90 | 0,96 |
| | μ _r | V | 0,27 | 0,13 | 0,21 | 0,33 | -0,76 | -0,87 | -0,90 | -0,96 | 0,57 | 0,75 | 0,81 | 0,91 |
| | ΔH25μ | A/cm | 4,22 | 3,73 | 3,40 | 4,79 | 0,33 | 0,04 | 0,51 | -0,22 | 0,11 | 0,00 | 0,26 | 0,05 |
| | ΔH50μ | A/cm | 31,46 | 23,47 | 32,00 | 41,86 | 0,22 | 0,92 | 0,96 | 0,72 | 0,05 | 0,85 | 0,93 | 0,52 |
| | ΔH75μ | A/cm | 22,97 | 17,31 | 23,32 | 31,30 | 0,24 | 0,93 | 0,95 | 0,58 | 0,06 | 0,87 | 0,90 | 0,33 |
| | Hc _μ | A/cm | 13,94 | 10,77 | 14,08 | 18,90 | -0,32 | 0,96 | 0,97 | -0,49 | 0,10 | 0,93 | 0,93 | 0,24 |
| ACP | Re ₁ | V | -0,12 | -0,13 | -0,13 | -0,13 | 0,27 | 0,91 | 0,91 | 0,97 | 0,08 | 0,84 | 0,84 | 0,94 |
| | Im ₁ | V | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,56 | 0,86 | 0,98 | 0,99 | 0,32 | 0,74 | 0,96 | 0,98 |
| | Mag ₁ | V | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | -0,30 | -0,91 | -0,90 | -0,95 | 0,09 | 0,84 | 0,80 | 0,91 |
| | Ph ₁ | rad | -1,24 | 2,85 | 2,84 | 2,90 | 0,18 | -0,88 | -0,96 | -0,99 | 0,03 | 0,78 | 0,93 | 0,98 |
| | Re ₂ | V | -0,08 | -0,12 | -0,12 | -0,12 | -0,49 | 0,93 | 0,90 | 0,72 | 0,24 | 0,87 | 0,81 | 0,52 |
| | Im ₂ | V | -0,12 | -0,08 | -0,08 | -0,09 | 0,62 | 0,86 | 0,92 | 0,99 | 0,38 | 0,73 | 0,85 | 0,97 |
| | Mag ₂ | V | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | -0,85 | -0,91 | -0,92 | -0,97 | 0,72 | 0,82 | 0,84 | 0,93 |
| | Ph ₂ | rad | -2,19 | -2,57 | -2,58 | -2,51 | -0,55 | -0,81 | -0,93 | -0,99 | 0,30 | 0,65 | 0,86 | 0,98 |
| | Re ₃ | V | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | -0,56 | -0,73 | -0,90 | -1,00 | 0,31 | 0,53 | 0,81 | 1,00 |
| | Im ₃ | V | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,13 | 0,19 | 0,83 | 0,92 | 0,96 | 0,03 | 0,69 | 0,84 | 0,91 |
| | Mag ₃ | V | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | -0,65 | -0,83 | -0,92 | -0,96 | 0,42 | 0,69 | 0,85 | 0,93 |
| | Ph ₃ | rad | -1,14 | -1,57 | -1,58 | -1,51 | -0,54 | -0,72 | -0,90 | -0,99 | 0,30 | 0,52 | 0,81 | 0,99 |
| | Re ₄ | V | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | -0,56 | -0,73 | -0,91 | -0,98 | 0,32 | 0,53 | 0,83 | 0,96 |
| | Im ₄ | V | -0,01 | -0,04 | -0,04 | -0,04 | -0,57 | 0,73 | 0,90 | -0,92 | 0,32 | 0,53 | 0,81 | 0,84 |
| | Mag ₄ | V | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | -0,57 | -0,73 | -0,91 | -0,97 | 0,32 | 0,53 | 0,83 | 0,93 |
| | Ph ₄ | rad | 0,00 | -0,05 | -0,05 | -0,04 | -0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,27 | 0,28 | 0,27 | 0,27 |
| Max | | XXXXXXXXXX | | | | | | | | | 0,76 | 0,93 | 0,96 | 1,00 |
| Min | | XXXXXXXXXX | | | | | | | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 |
| Média | | XXXXXXXXXX | | | | | | | | | 0,33 | 0,70 | 0,78 | 0,82 |
| % PBC | | XXXXXXXXXX | | | | | | | | | 5,88 | 67,65 | 85,29 | 79,41 |

As correlações foram obtidas relacionando-se o parâmetro micromagnético com o carregamento externo. Os resultados evidenciam a representatividade da configuração D, para a qual foram obtidos os maiores valores de r², indicando uma forte linearidade entre o carregamento e os parâmetros micromagnéticos resultantes. %PBC corresponde ao percentual de parâmetros com boa correlação (r²>0,75).

5.1.3 Regressão Multi-Linear

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises estatísticas realizadas através da técnica de regressão multi-linear para os resultados micromagnéticos obtidos. Neste estudo, as técnicas foram analisadas de forma: individual e combinada. Este estudo buscou a regressão (r^2) que forneça a melhor relação e os menores valores da média quadrática do erro e sua raiz quadrada (MQE e RMQE, respectivamente).

Tabela 7: Resultados das Regressões multi-lineares obtidas para as diferentes configurações de parâmetros.

| | | Regressão Multi-Linear | | | | | |
|--------------|---------|------------------------|----|-----------|----------------|--------|-------|
| Configuração | Técnica | PT | PU | r^2 [%] | r^2_{aj} [%] | MQE | RMQE |
| A | AHCT | 11 | 5 | 99,74 | 99,73 | 2,923 | 1,710 |
| | AIP | 7 | 5 | 99,48 | 99,46 | 5,848 | 2,418 |
| | ACP | 16 | 9 | 99,91 | 99,90 | 1,063 | 1,031 |
| | Todos | 34 | 10 | 99,94 | 99,94 | 0,668 | 0,817 |
| B | AHCT | 11 | 6 | 99,72 | 99,71 | 3,139 | 1,177 |
| | AIP | 7 | 6 | 95,43 | 95,25 | 51,456 | 7,173 |
| | ACP | 16 | 5 | 99,43 | 99,40 | 6,443 | 2,538 |
| | Todos | 34 | 14 | 99,84 | 99,83 | 1,768 | 1,330 |
| C | AHCT | 11 | 6 | 99,82 | 99,81 | 2,071 | 1,439 |
| | AIP | 7 | 5 | 98,63 | 98,58 | 15,467 | 3,933 |
| | ACP | 16 | 5 | 99,07 | 99,04 | 10,424 | 3,229 |
| | Todos | 34 | 13 | 99,89 | 99,88 | 1,213 | 1,101 |
| D | AHCT | 11 | 8 | 99,99 | 99,99 | 0,060 | 0,244 |
| | AIP | 7 | 5 | 99,67 | 99,66 | 3,686 | 1,920 |
| | ACP | 16 | 7 | 99,89 | 99,89 | 1,203 | 1,097 |
| | Todos | 34 | 12 | 100,00 | 100,00 | 0,033 | 0,182 |

Na Tabela 7, PT refere-se ao número total de respostas fornecidas pela técnica e PU ao número de parâmetros de respostas utilizados na regressão linear para se obter a melhor correlação.

Os resultados indicaram que nem todos os parâmetros são necessários para se obter uma boa correlação, sendo que a pesar da pouca melhoria obtida para os valores de r^2 , o efeito da variação de configuração foi mais pronunciado na minimização da variância dos resultados (MQE). Para todas as configurações, os melhores resultados foram obtidos utilizando-se a combinação de técnicas.

As equações 2 – 17 indicam as relações entre os carregamentos e os parâmetros utilizados na regressão multi-linear para cada condição de parâmetros de controle. Estas se referem às regressões indicadas na Tabela 7.

A Figura 65 apresenta o resultado do teste de validação das regressões lineares obtidas a partir da combinação das três técnicas. Para este teste foram considerados na regressão linear apenas os resultados referentes aos valores de carregamento de 0, 30, 60 e 90% σ_e . A validação decorre da aplicação da equação de calibração no conjunto de dados, buscando verificar os desvios obtidos em relação ao carregamento aplicado.

Equação 2: Configuração – A, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = 308,94 + 1330,53A_3 - 35,23P_3 - 21,89P_5 - 340,88K + 17,09Hco$$

Equação 3: Configuração – A, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = 470,78 - 835,86\mu_{max} - 1501,37\mu_r + 15,31Hc\mu + 11,86\Delta H50\mu - 6,82\Delta H75\mu$$

Equação 4: Configuração – A, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = -48872,87 + 7791,37 Re_1 - 57867,29 Im_1 - 6636,28Ph_1 + 116019,7 Re_2 - 56710,56Mag_2 - 14604,83Ph_2 - 9970,04Mag_3 + 36033,21Im_4 - 4000,19Ph_4$$

Equação 5: Configuração – A, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 1588,46 + 1112,54V_{mag} - 4,25P_5 - 74,83SAH + 6,60Hco - 186,22\mu_r + 95741,69 Re_1 + 8013,16 Im_1 + 89736,8Mag_1 + 1054,27 Im_3$$

Equação 6: Configuração – B, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = 387,66 - 4779,35V_{mag} + 467,78A_3 + 232,34A_7 + 435,22P_3 - 247,10K - 330,26Hro$$

Equação 7: Configuração – B, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = -293,48 - 8380,19\mu_{max} + 6719,91\mu_r - 19,94Hc\mu + 40,52\Delta H25\mu - 28,29\Delta H50\mu + 29,40\Delta H75\mu$$

Equação 8: Configuração – B, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = -24266,55 - 4743,80Ph_1 + 1999988,06 Re_3 - 181006,56Mag_3 - 23749,38Ph_3 + 22815,36 Re_4$$

Equação 9: Configuração – B, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = -60,47 - 5779,66V_{mag} + 309,55A_3 + 591,66A_7 - 267,74P_3 + 59,33P_5 + 32,11P_7 - 347,83SAH - 41,96Hco - 171,87Hro + 1768,04\mu_{max} - 1496,5\mu_{medio} + 9459,06 Im_1 - 4714,93 Im_2 + 3124,01 Re_3$$

Equação 10: Configuração – C, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = 840,24 - 6077,54V_{mag} + 818,17A_3 - 186,58A_5 + 164,3P_5 - 250,69K - 12,52Hco$$

Equação 11: Configuração – C, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = -420,22 - 12203,25\mu_{max} - 4180,72\mu_{medio} + 11761,4\mu_r + 39,94\Delta H25\mu - 11,17\Delta H75\mu$$

Equação 12: Configuração – C, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = -76996,01 + 53263,98 Im_1 + 995,29Ph_2 + 409706,65 Re_3 - 49215,19Ph_3 - 5662,35 Im_4$$

Equação 13: Configuração – C, técnica – Todas.

$$\begin{aligned}\sigma_{3MA} = & -26215,97 - 4388,65V_{mag} + 675,07A_3 + 265,42P_3 - 248,39K - 79,65Hro \\ & - 1964,48\mu_{médio} + 1515,68\mu_r + 6,94\Delta H25\mu - 3,33\Delta H75\mu + 6368,27Im_1 \\ & + 135214,62Re_3 - 16713,06Ph_3 - 1092,26Im_4\end{aligned}$$

Equação 14: Configuração – D, técnica – AHCT.

$$\begin{aligned}\sigma_{3MA} = & 338,56 + 459,84V_{mag} + 200,28A_3 + 113,02A_7 - 293,55P_3 - 41,08SAH - 63,74K \\ & - 12,89Hco + 18,39Hro\end{aligned}$$

Equação 15: Configuração – D, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = -42,34 - 1535\mu_{max} + 337,477\mu_r + 10,03Hc\mu + 13,30\Delta H25\mu + 9,48\Delta H50\mu$$

Equação 16: Configuração – D, técnica – ACP.

$$\begin{aligned}\sigma_{3MA} = & -3566,65 - 1906,84Ph_1 - 153133,39Im_2 - 88003,76Mag_2 - 17898,57Ph_2 \\ & - 110536,65Im_4 - 54892,41Mag_4 + 7757,86Ph_4\end{aligned}$$

Equação 17: Configuração – D, técnica – Todas.

$$\begin{aligned}\sigma_{3MA} = & 1644,33 + 194,71A_3 + 34,53A_5 - 63,28P_3 - 5,4P_5 - 80,62K - 16235,86Im_1 + 2749,84Ph_1 \\ & - 17501,47Im_2 - 11036,58Mag_2 - 2167,44Ph_2\end{aligned}$$

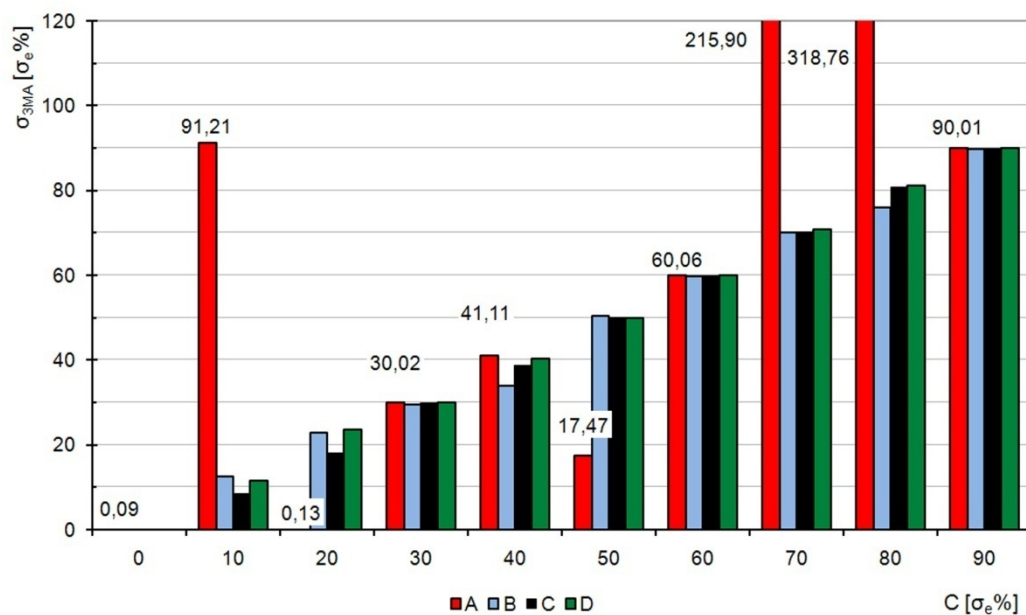


Figura 65: Resultados obtidos para o teste de validação das regressões lineares através da análise micromagnética do estado de tensões para diferentes configurações de parâmetros de controle.

A partir destes resultados, ficou evidente a aplicabilidade do método micromagnético para a determinação não destrutiva do estado de tensões em componentes ferromagnéticos de engenharia. Com exceção da configuração A, todas apresentaram bons resultados na faixa de carregamento analisada.

5.2 Análise da influência do Encruamento e da Microestrutura

Os resultados a seguir, referem-se às análises realizadas a partir da utilização configuração D. Nestes ensaios, foram variadas as microestruturas das amostras analisadas, a fim de se separar os efeitos do carregamento e da microestrutura nas análises micromagnéticas.

5.2.1 Apresentação dos Resultados

As figuras 66 a 76 apresentam os resultados obtidos através da técnica AHCT.

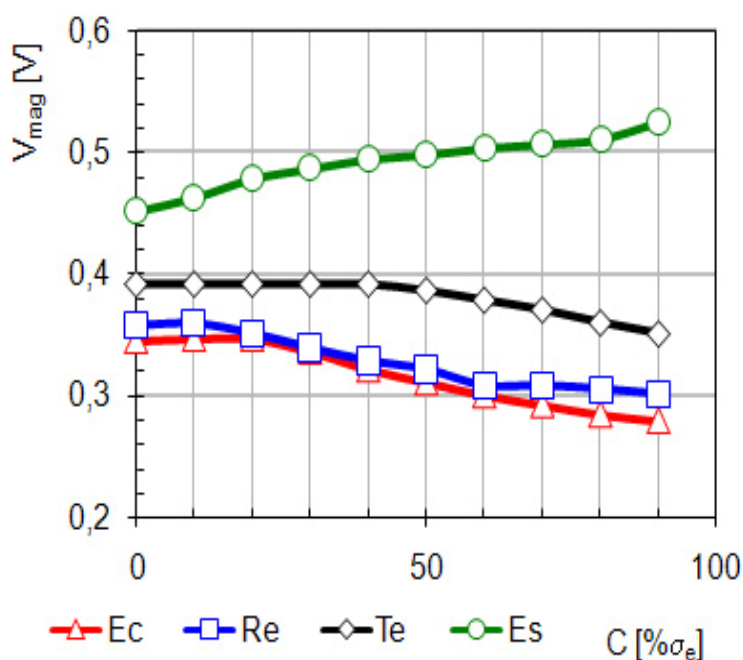


Figura 66: Variação de V_{mag} em função do carregamento (AHCT).

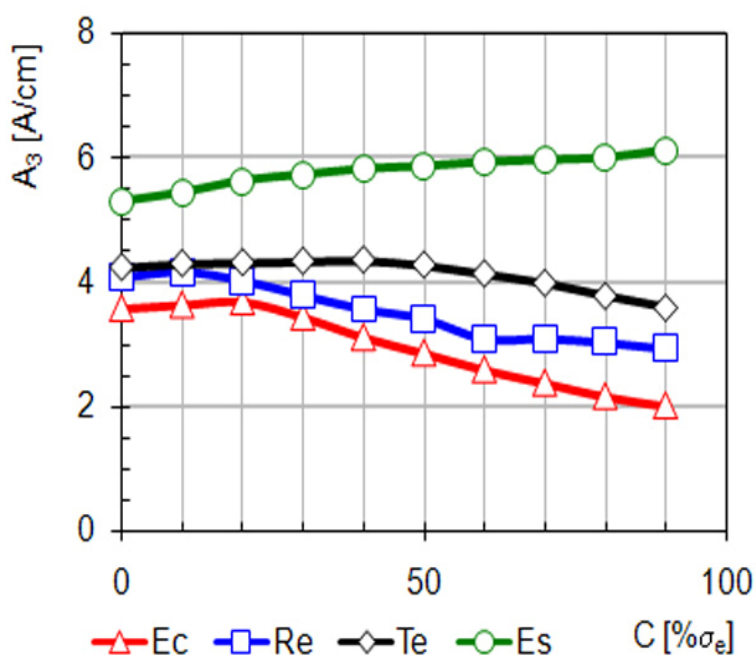


Figura 67: Variação de A_3 em função do carregamento (AHCT).

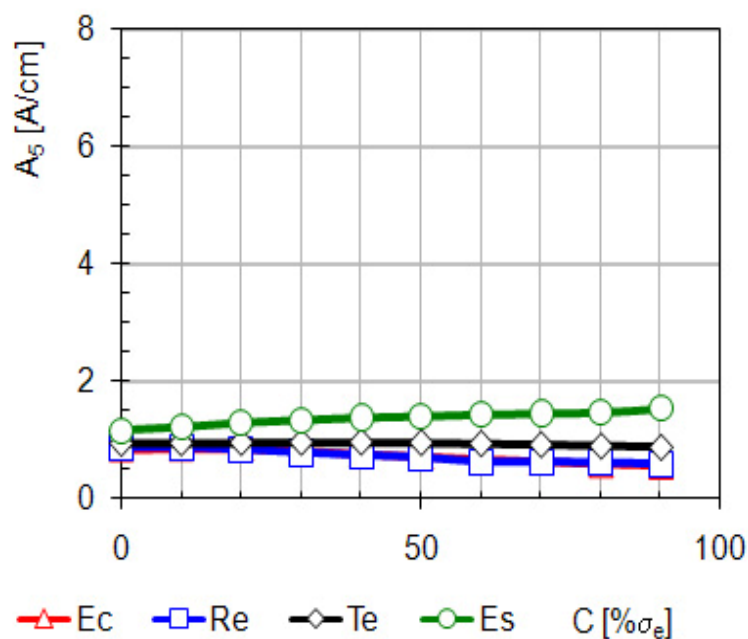


Figura 68: Variação de A_5 em função do carregamento (AHCT).

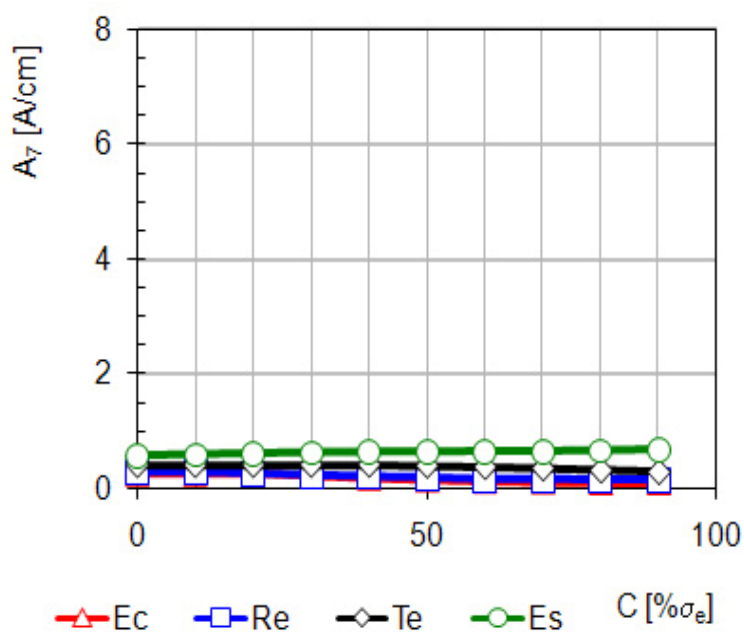


Figura 69: Variação de A_7 em função do carregamento (AHCT).

Em relação às amplitudes das harmônicas, em especial da 3ª harmônica, e à amplitude de voltagem de saída requerida para ajustar a intensidade do campo magnético, os resultados mostraram boa sensibilidade ao carregamento externo e à variação microestrutural. Sendo estes efeitos mais pronunciados para as amostras encruadas e recozidas. Inclusive, indicando que a constância nos resultados obtidos para o material encruado, em carregamentos inferiores aos 20% do limite de escoamento do material, esta relacionada ao efeito do encruamento nas

propriedades micromagnéticas, visto que este efeito é pouco pronunciado para o material recozido.

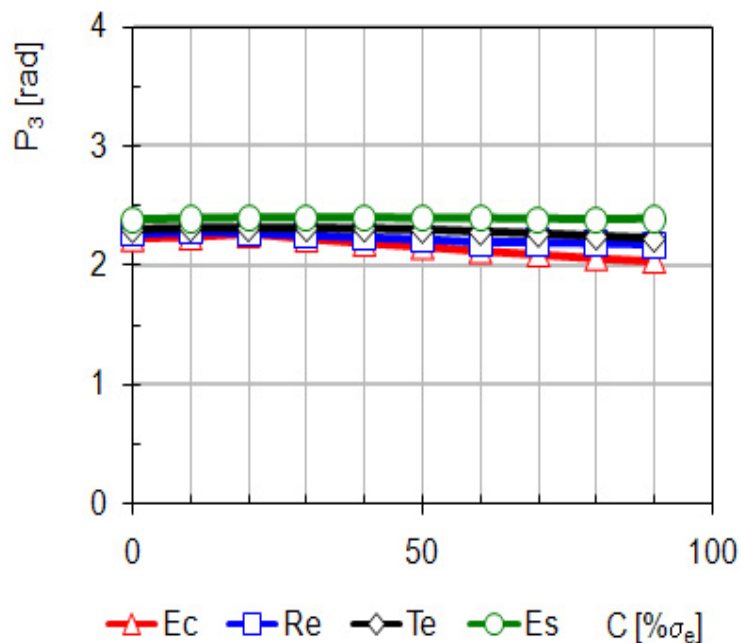


Figura 70: Variação de P_3 em função do carregamento (AHCT).

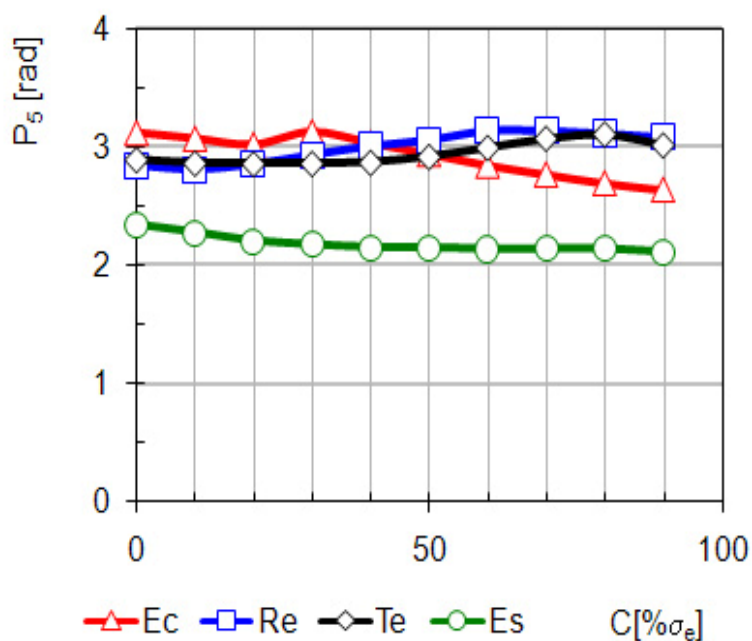


Figura 71: Variação de P_5 em função do carregamento (AHCT).

Em relação aos ângulos de fase, nota-se que para P_5 a menor intensidade dos sinais obtidos para as amostras esferoidizadas decorre da microestrutura predominantemente ferrítica deste material, onde o alinhamento dos domínios magnéticos (e conseqüente avanço do processo de magnetização) é favorecido através da aplicação do carregamento trativo.

Independente da intensidade do carregamento aplicado, este parâmetro poderia ser utilizado para separar materiais com diferentes estados microestruturais.

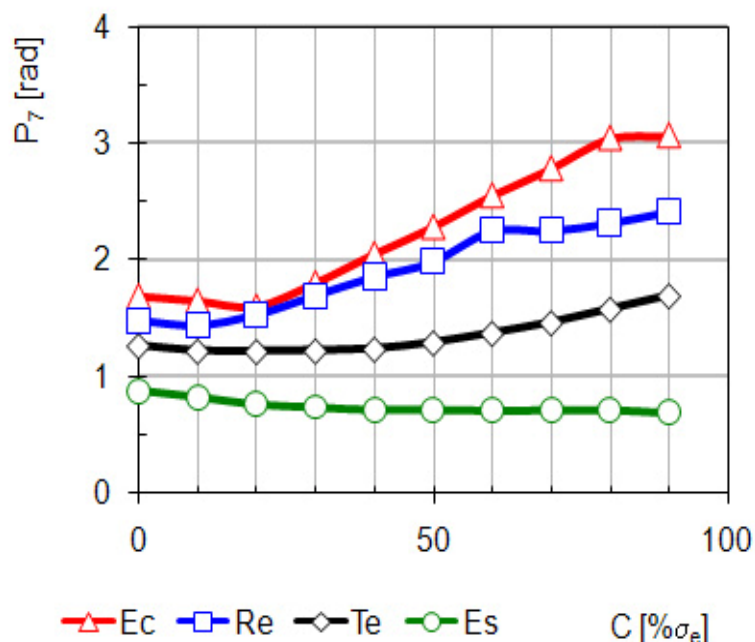


Figura 72: Variação de P_7 em função do carregamento (AHCT).

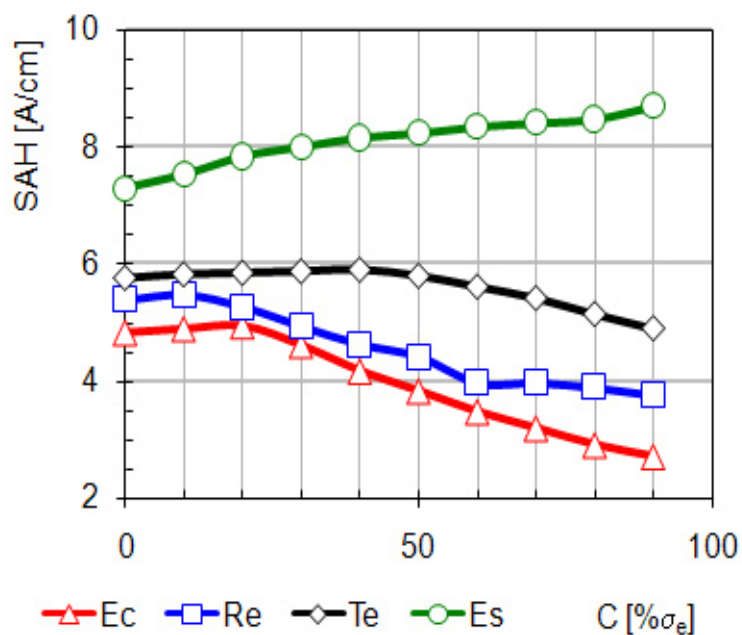


Figura 73: Variação de SAH em função do carregamento (AHCT).

Como indicado na literatura, os valores de coercitividade não apresentaram grande sensibilidade à variação de carregamento, contudo as variações apresentadas, comparando-se amostras com diferentes estados microestruturais, não foram tão significativas quanto os resultados obtidos através das curvas de histereses (Figura 25 e Tabela 5). Isto indica a necessidade de se otimizar os

parâmetros de controle para as diferentes microestruturas analisadas, porém tal otimização foge do escopo deste trabalho.

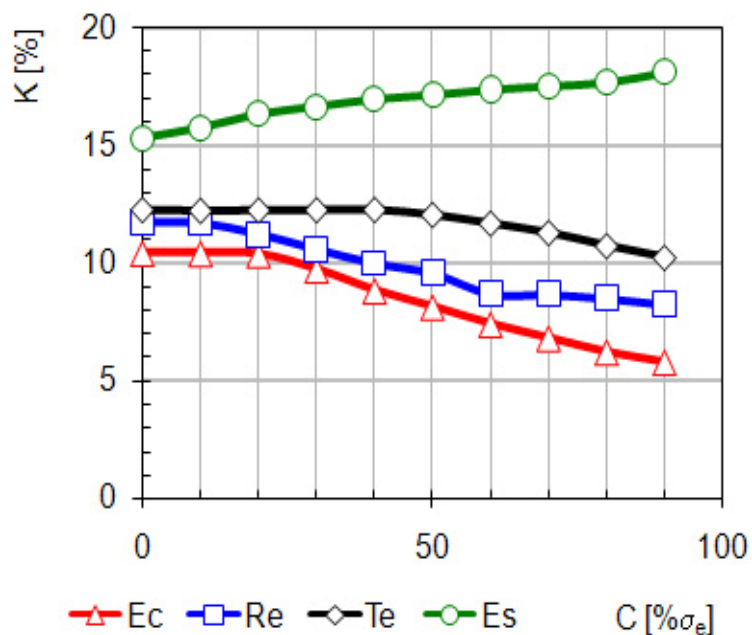


Figura 74: Variação de K em função do carregamento (AHCT).

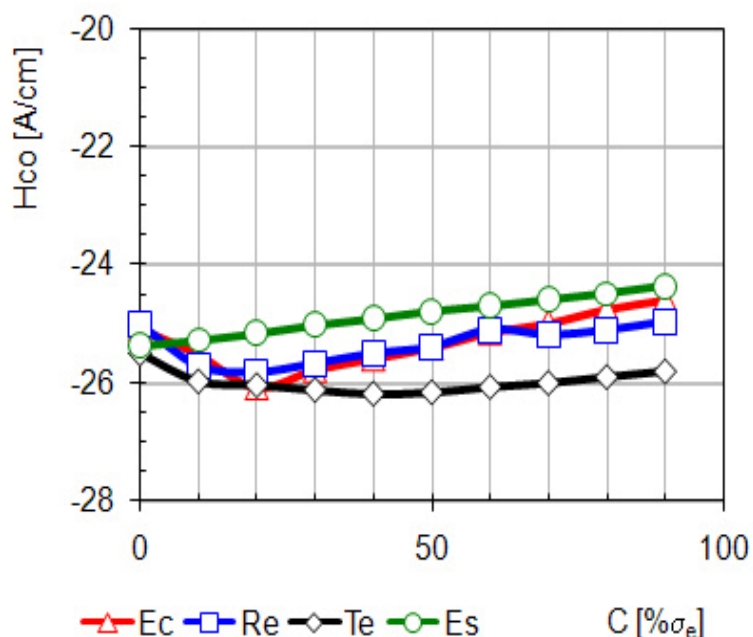


Figura 75: Variação de Hco em função do carregamento (AHCT).

Assim como os parâmetros anteriores, Hro, SAH e K apresentaram boa sensibilidade à variação microestrutural. Apresentando resultados distintos pra cada conjunto de amostras analisado. Em relação ao carregamento, nota-se que para as amostras recozidas, estes parâmetros perdem sensibilidade a partir do valor referente à 60% do limite de escoamento do material.

Para os demais materiais, a técnica de AHCT apresentou sensibilidade significativa em toda a faixa de carregamento analisada.

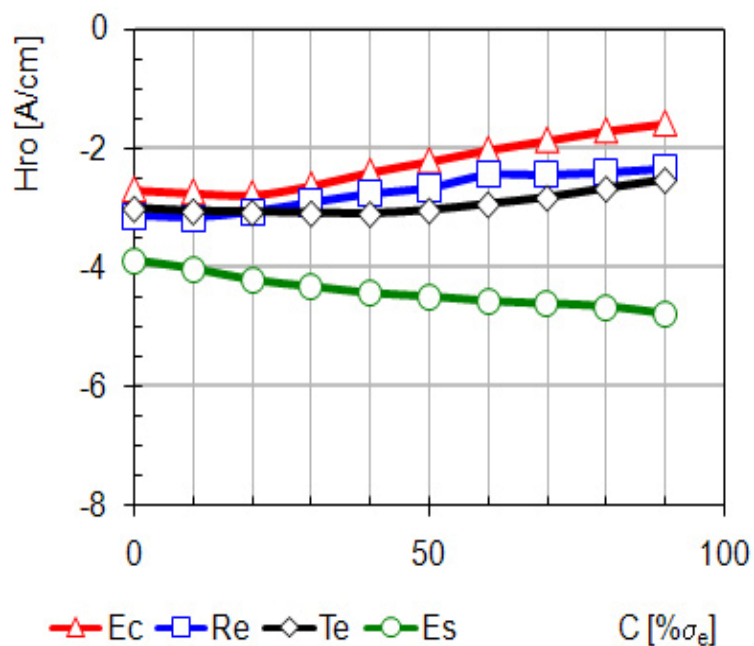


Figura 76: Variação do parâmetro micromagnético em função do carregamento.

As figuras 77 a 83 apresentam os resultados obtidos para a técnica AIP.

A Figura 77 mostra que a intensidade máxima da permeabilidade magnética apresenta maior sensibilidade ao efeito dos carregamentos quando se analisam amostras com alto grau de encruamento, apresentando dependência negativa na escala elástica (para o material esferoidizado, o efeito é inverso).

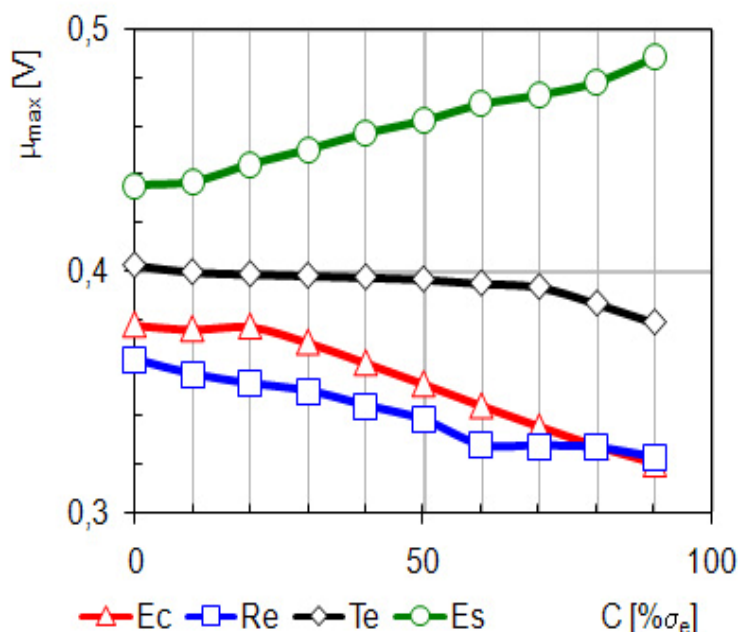


Figura 77: Variação de μ_{\max} em função do carregamento (AIP).

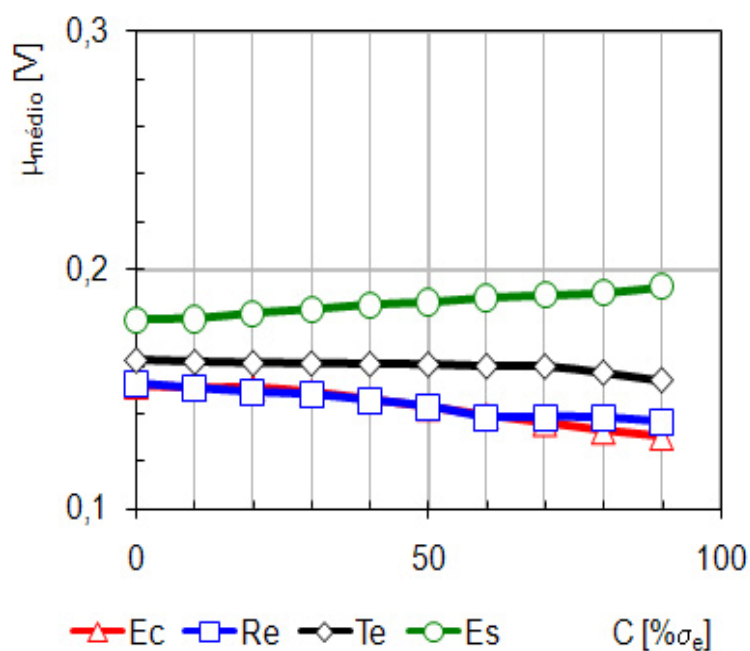


Figura 78: Variação de $\mu_{\text{médio}}$ em função do carregamento (AIP).

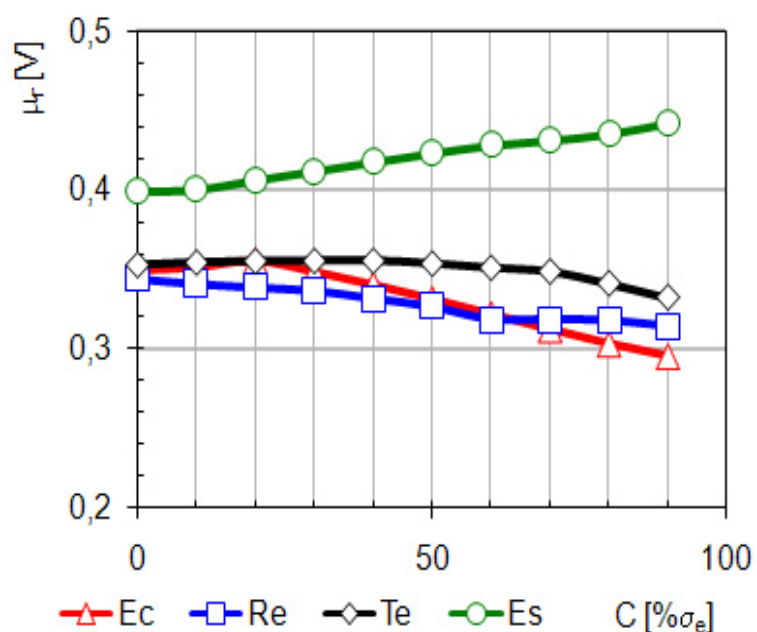


Figura 79: Variação de μ_r em função do carregamento (AIP).

Para os parâmetros analisados, $\mu_{\text{médio}}$ e μ_r apresentaram as menores variações. Porém, foram suficientes para separar os diferentes estados microestruturais e os efeitos do carregamento. Nota-se a grande semelhança entre os resultados obtidos para as amostras encruada e recozida, indicando a baixa sensibilidade aos efeitos do encruamento. Os resultados para a amostra temperada apresentaram pouca variação até o limite de 50% σ_e onde a partir do qual, as variações foram mais pronunciadas.

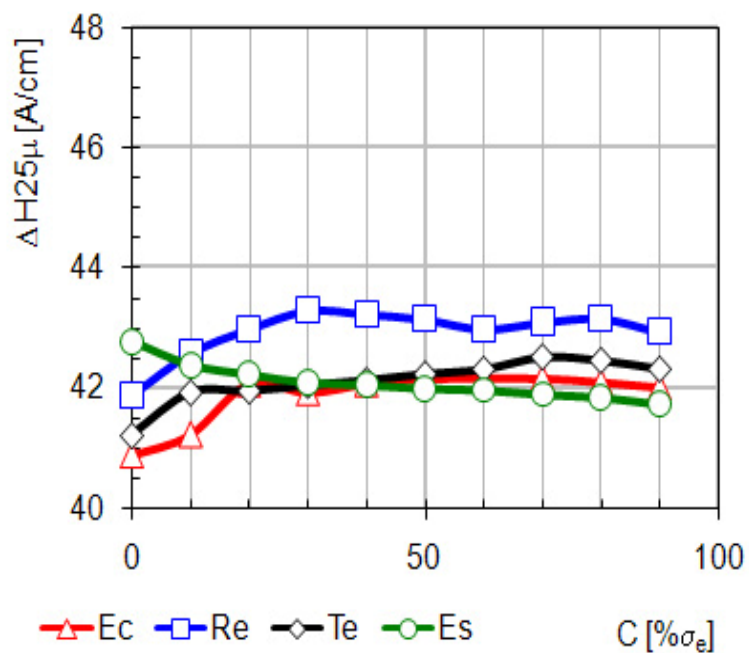


Figura 80: Variação de $\Delta H_{25\mu}$ em função do carregamento (AIP).

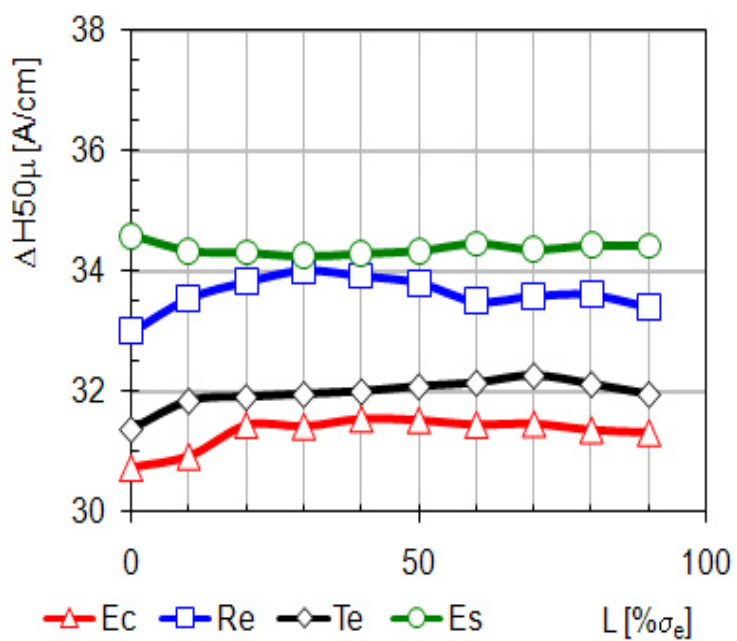


Figura 81: Variação de $\Delta H_{50\mu}$ em função do carregamento (AIP).

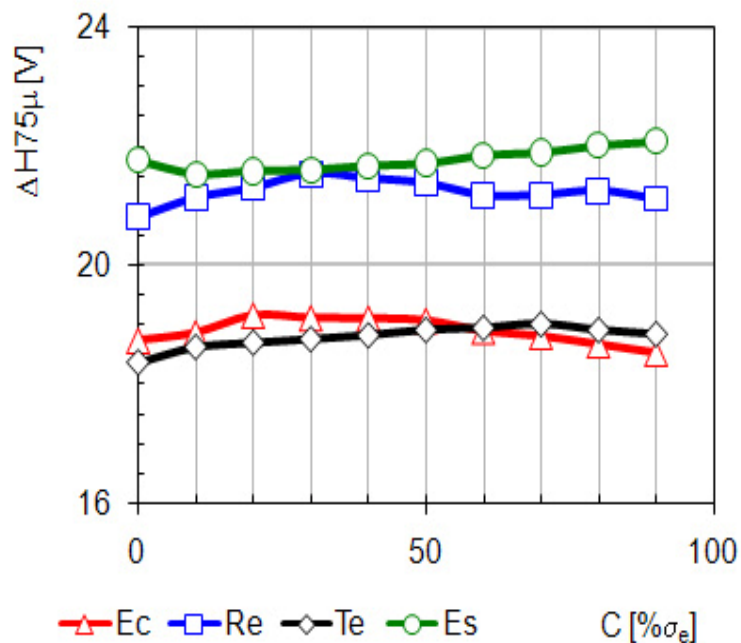


Figura 82: Variação de $\Delta H_{75\mu}$ em função do carregamento (AIP).

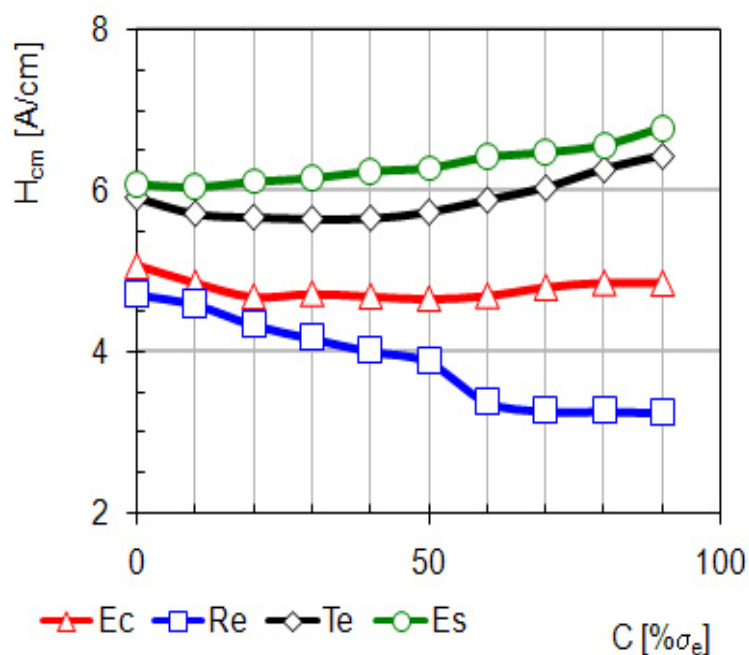


Figura 83: Variação de H_{cm} em função do carregamento (AIP).

As figuras 84 a 99 apresentam os resultados obtidos através da técnica de análise da impedância das correntes parasitas. Para este ensaio foram utilizadas quatro frequências de análise ($f_{A1} = 5$ kHz, $f_{A2} = 10$ kHz, $f_{A3} = 20$ kHz e $f_{A4} = 40$ kHz) a partir dos parâmetros de controle definidos na configuração D. Os resultados referem-se a comparação das variações da resposta micromagnética em função do carregamento e do estado microestrutural.

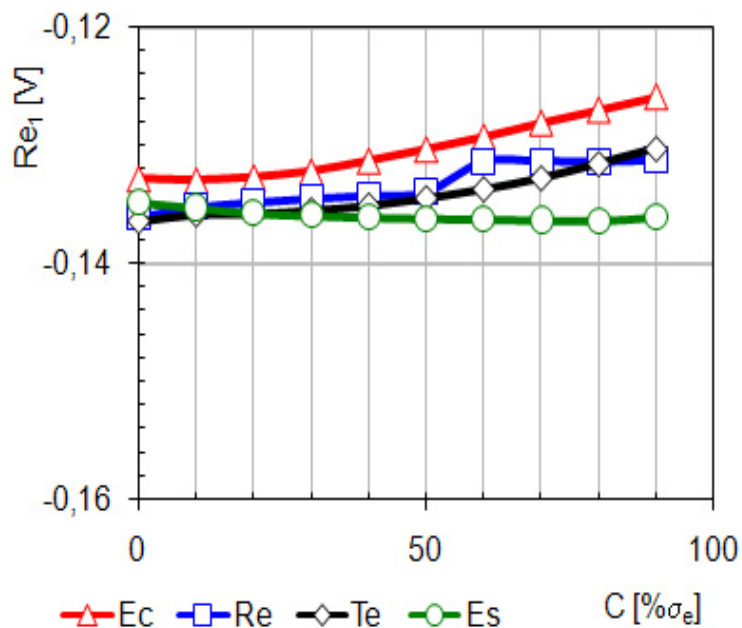


Figura 84: Variação de Re_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

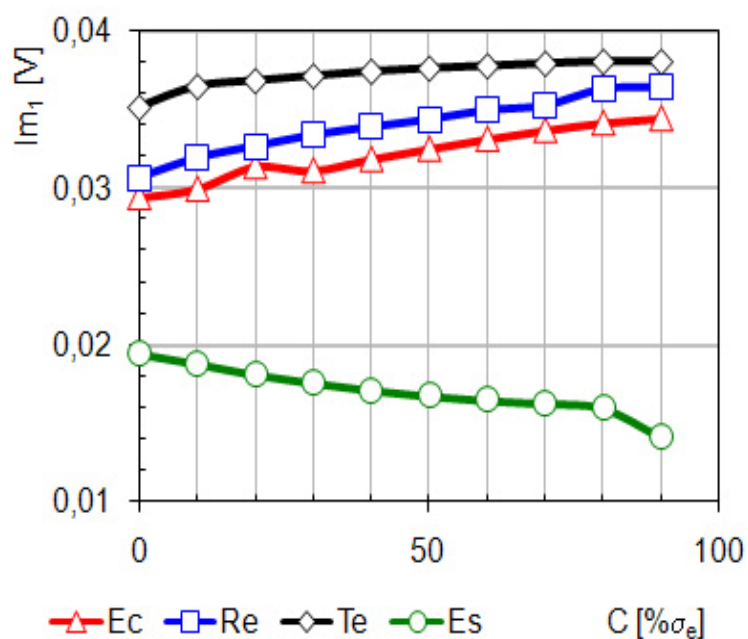


Figura 85: Variação de Im_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

Nota-se que os efeitos da variação microestrutural são mais pronunciados na porção imaginária da impedância das correntes parasitas, visto que a principal diferença entre o estado esferoidizado dos demais é a presença de carbonetos globalizados, facilitando assim a condutividade elétrica do material, como mostra a Tabela 5.

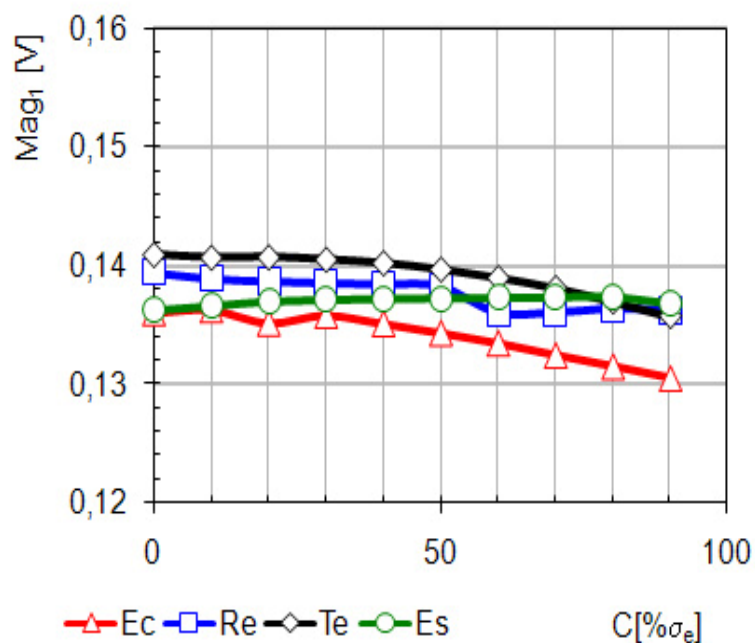


Figura 86: Variação de Mag_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

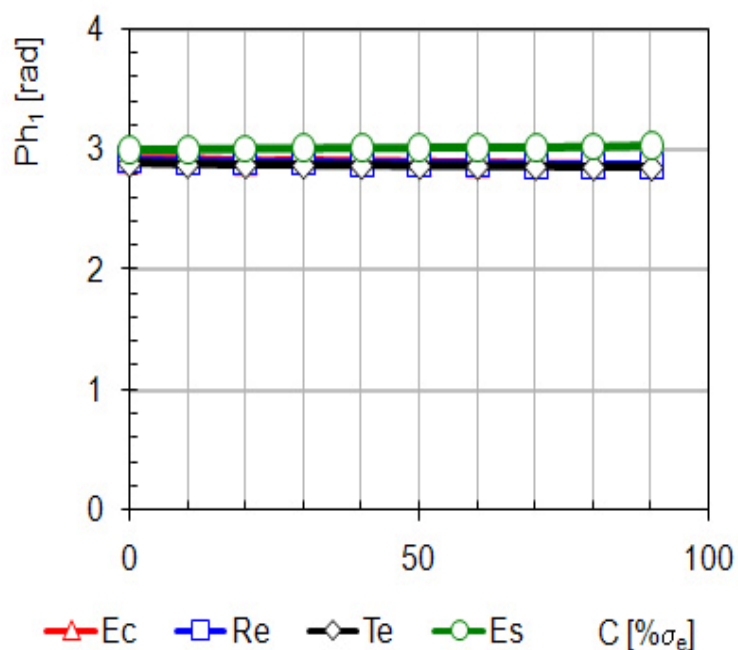


Figura 87: Variação de Ph_1 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 5\text{kHz}$.

Em relação à Magnitude das correntes parasitas para a frequência de 5 kHz, nota-se que o carregamento exerce efeito mais significativo a partir de 50% do limite de escoamento dos materiais. Isto pode ser explicado pelo maior alinhamento dos domínios magnéticos na direção de carregamento para este estado de tensões. Em contrapartida, o ângulo de fase não apresentou sensibilidade aos carregamentos e também às variações microestruturais.

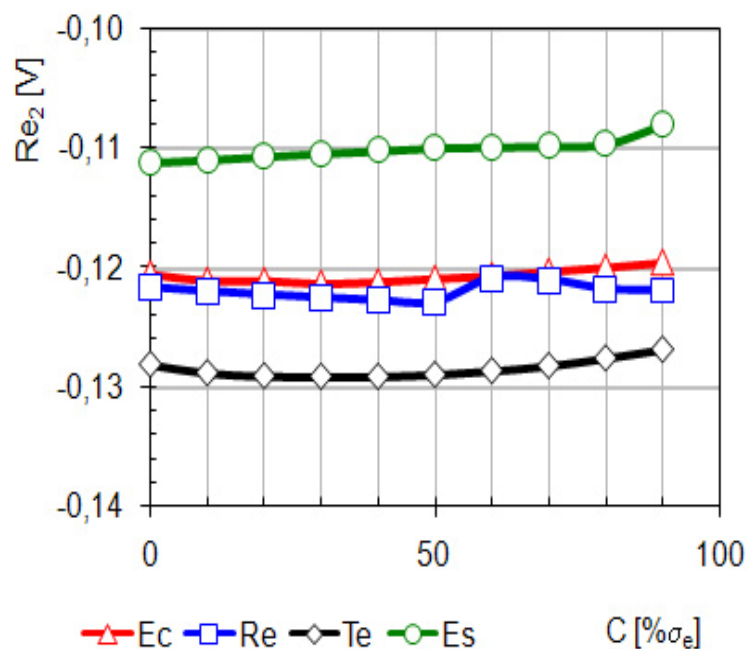


Figura 88: Variação de Re_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

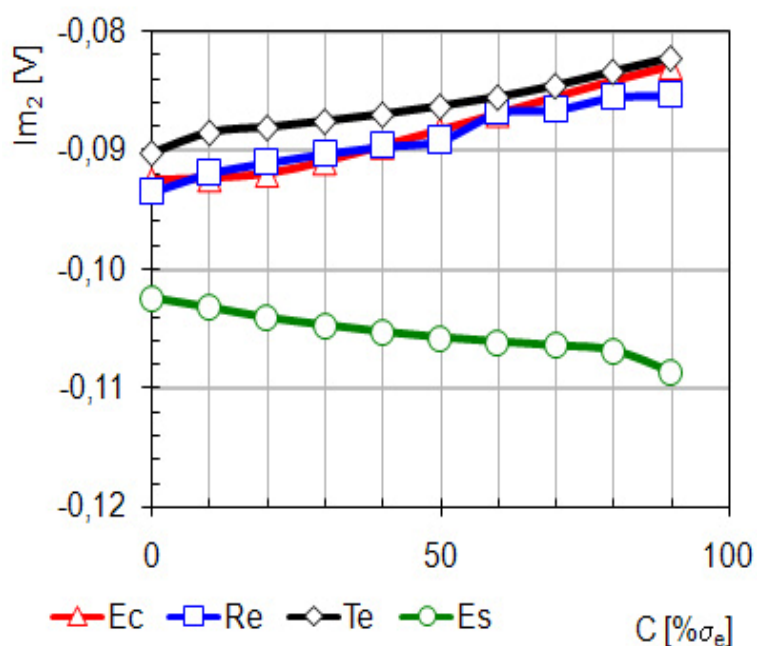


Figura 89: Variação de Im_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

Para a frequência de 10kHz temos um efeito microestrutural mais pronunciado, visto que os resultados se apresentam em faixas de magnitude bem definidas, em concordância com a Tabela 5. Em relação aos carregamentos, as variações foram pouco pronunciadas na escala utilizada, principalmente na parte real da impedância das correntes parasitas.

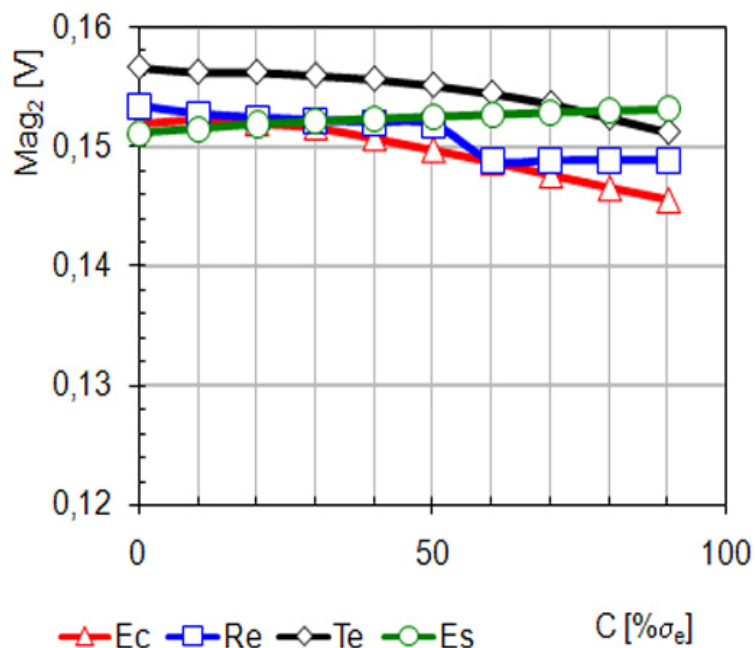


Figura 90: Variação de Mag_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

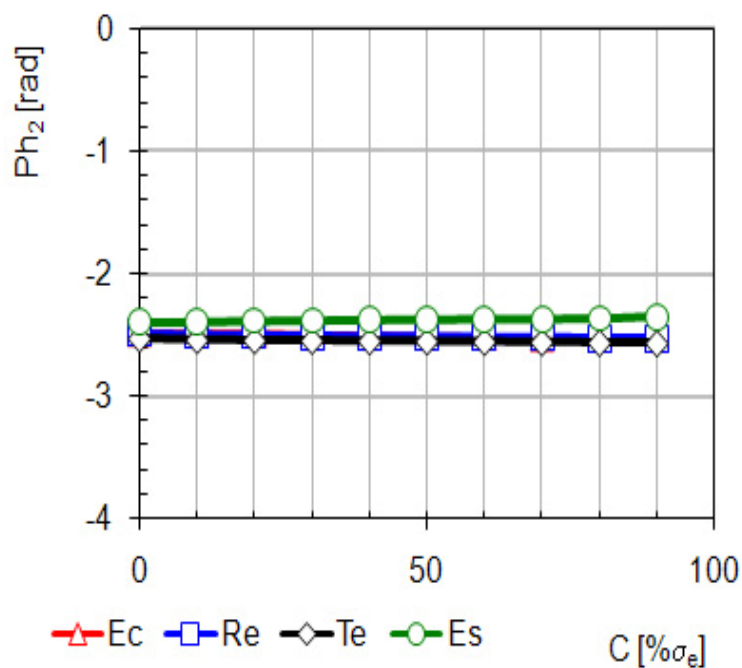


Figura 91: Variação de Ph_2 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 10\text{kHz}$.

Assim como para a frequência de análise anterior, o ângulo de fase não indicou variação significativa com os carregamentos. O parâmetro Mag_2 apresentou variação suave na escala analisada, sendo esta mais significativa para o material encruado, especialmente a partir de 30% do limite de escoamento do material.

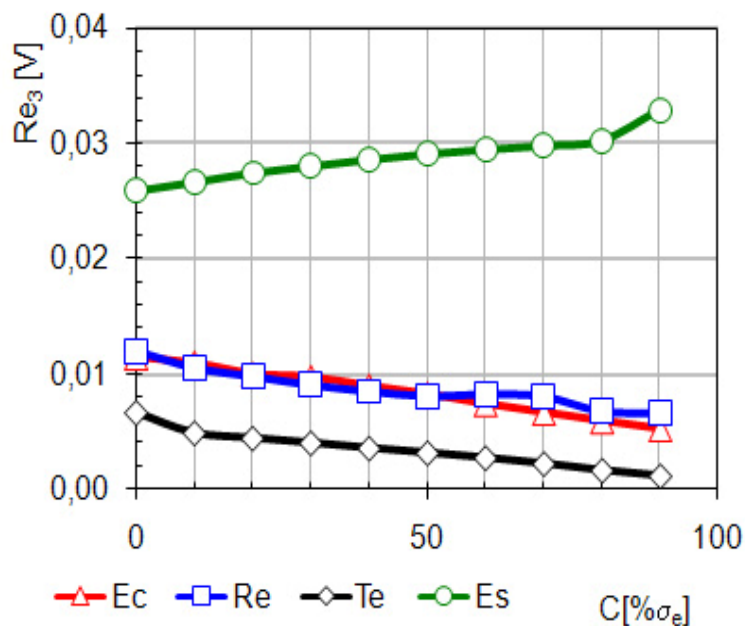


Figura 92: Variação de Re_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$.

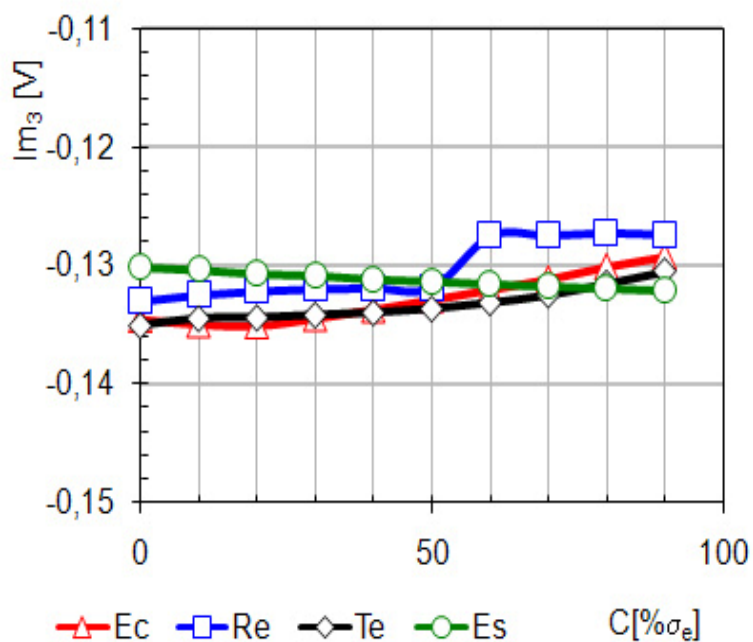


Figura 93: Variação de Im_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$.

Percebe-se que na medida em que se aumentam as frequências de análise também se aumentam os efeitos microestruturais nestas medidas, sendo estes evidenciados pela análise de Re_3 (Figura 92). Esses resultados indicam a potencialidade da técnica para testar a confiabilidade de processos de tratamentos térmicos ou de alteração microestrutural.

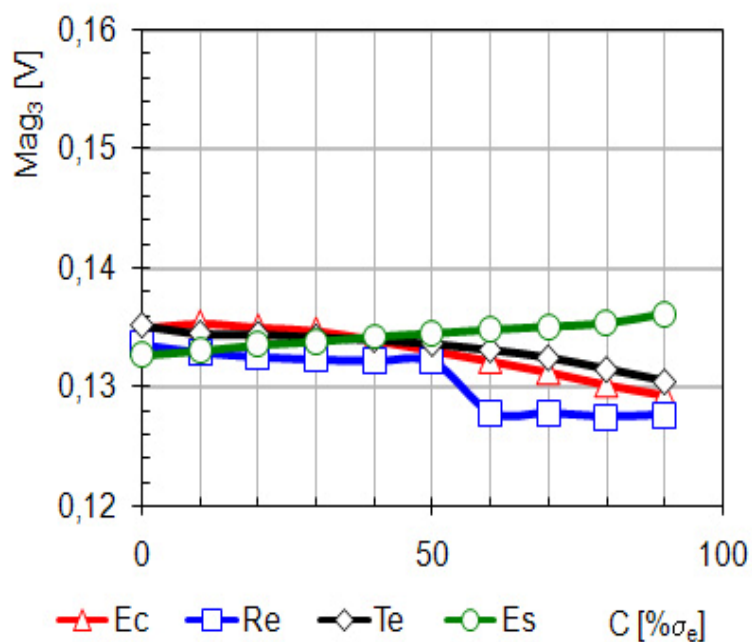


Figura 94: Variação de Mag_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$.

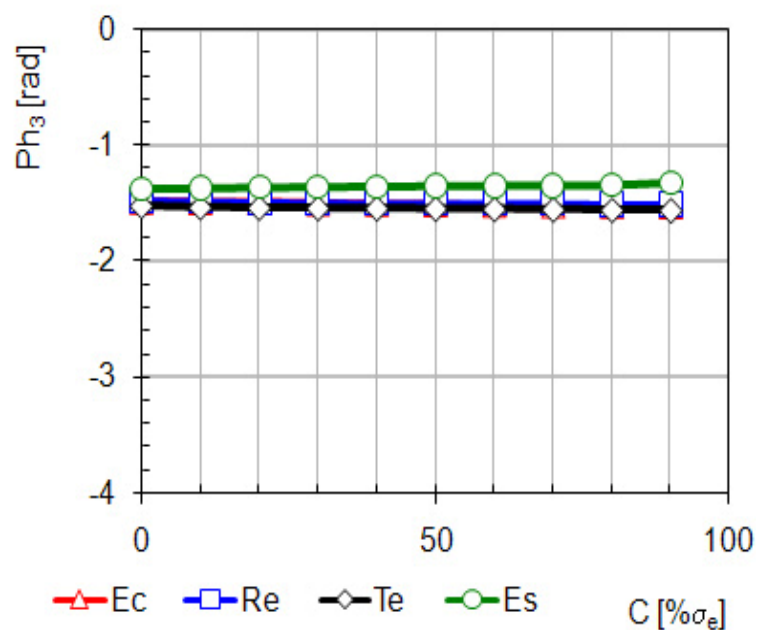


Figura 95: Variação de Ph_3 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 20\text{kHz}$.

As figuras 96 a 99 apresentam os resultados obtidos utilizando uma frequência de análise de 40 kHz.

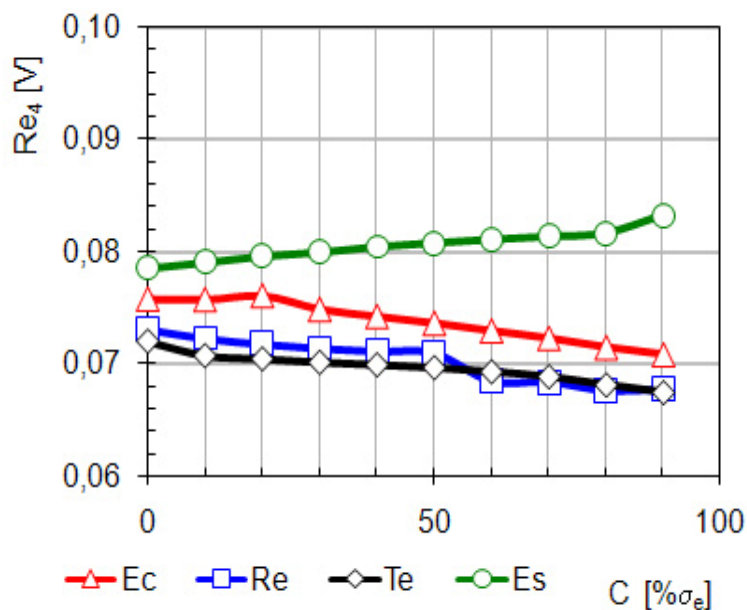


Figura 96: Variação de Re_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

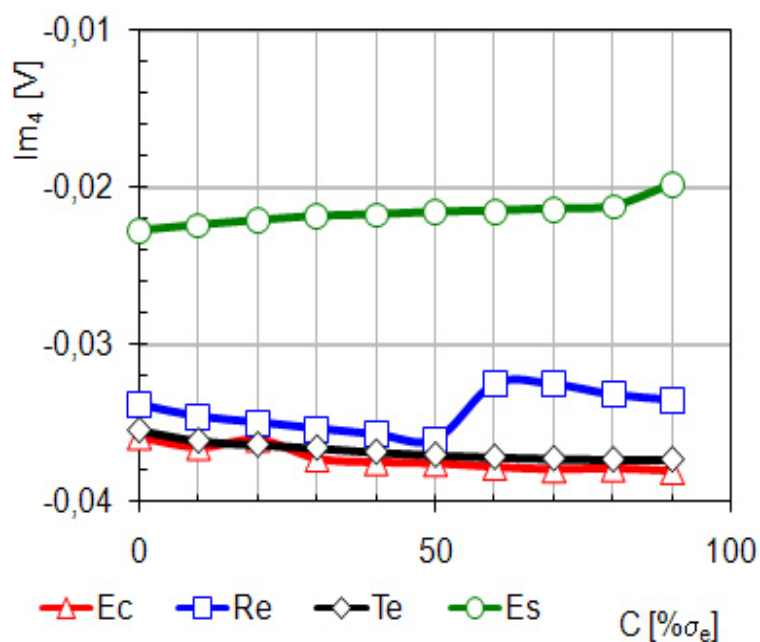


Figura 97: Variação de Im_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

Os resultados obtidos para a frequência de 40 kHz, referente às camadas mais superficiais dos materiais, apresentaram variação mais suave com o carregamento. Porém, os resultados apresentaram boa sensibilidade em relação à variação microestrutural, separando em especial, o material esferoidizado dos demais.

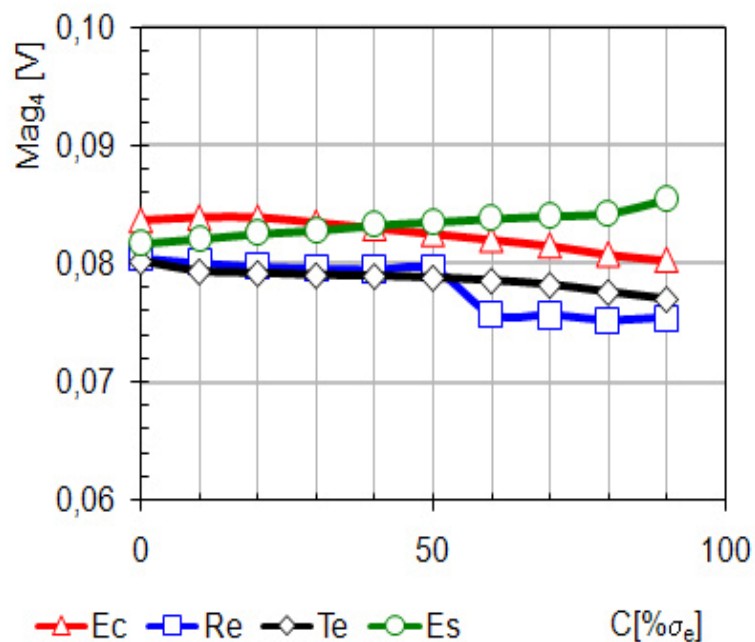


Figura 98: Variação de Mag_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

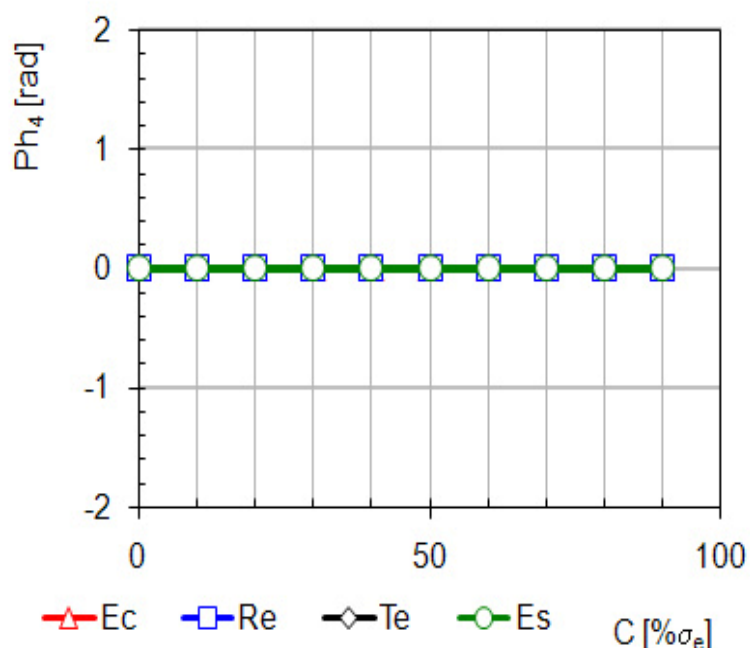


Figura 99: Variação de Ph_4 em função do carregamento (ACP) – $f_A = 40\text{kHz}$.

As tabelas 8 e 9 apresentam os resultados das análises estatísticas obtidas a partir dos resultados apresentados anteriormente. Neste caso, além das médias e dos coeficientes de determinação (r^2) também foram analisadas as variações de intensidade do sinal em relação à amostra encruada (amostra padrão de tira da armadura de tração de Risers Flexíveis).

5.2.2 Análise Estatística

A Tabela 8 apresenta a análise estatística dos resultados obtidos para diferentes microestruturas.

Tabela 8: Análise Estatística dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho.

| Análise Estatística | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|--------------|--------|--------|--------|---------------------|-------------------|-----|-----|----------------|-------|-------|-------|------|
| Parâmetro | | Média | | | | Intensidade% (X/Ec) | | | | r ² | | | | |
| Configuração | | Ec | Re | Te | Es | Ec | Re | Te | Es | Ec | Re | Te | Es | |
| AHCT | V _{mag} | V | 0,32 | 0,33 | 0,38 | 0,49 | 100 | 104 | 120 | 156 | 0,96 | 0,95 | 0,80 | 0,95 |
| | A ₃ | A/cm | 2,94 | 3,50 | 4,12 | 5,77 | 100 | 119 | 140 | 196 | 0,95 | 0,95 | 0,68 | 0,94 |
| | A ₅ | A/cm | 0,73 | 0,73 | 0,94 | 1,38 | 100 | 100 | 128 | 188 | 0,96 | 0,96 | 0,60 | 0,96 |
| | A ₇ | A/cm | 0,18 | 0,22 | 0,39 | 0,64 | 100 | 119 | 212 | 349 | 0,95 | 0,94 | 0,77 | 0,94 |
| | P ₃ | rad | 2,15 | 2,22 | 2,28 | 2,39 | XXXX | | | | 0,92 | 0,93 | 0,77 | 0,03 |
| | P ₅ | rad | 2,93 | 2,99 | 2,94 | 2,19 | | | | | 0,89 | 0,83 | 0,71 | 0,77 |
| | P ₇ | rad | 2,25 | 1,92 | 1,36 | 0,75 | | | | | 0,94 | 0,96 | 0,77 | 0,73 |
| | SAH | A/cm | 3,96 | 4,57 | 5,60 | 8,09 | 100 | 115 | 141 | 204 | 0,95 | 0,95 | 0,68 | 0,94 |
| | K | % | 8,42 | 9,89 | 11,76 | 16,89 | 100 | 117 | 140 | 201 | 0,97 | 0,96 | 0,78 | 0,96 |
| | Hco | A/cm | -25,29 | -25,35 | -25,98 | -24,87 | 100 | 100 | 103 | 98 | 0,46 | 0,31 | 0,03 | 1,00 |
| | Hro | A/cm | -2,27 | -2,74 | -2,94 | -4,41 | 100 | 121 | 130 | 195 | 0,95 | 0,95 | 0,67 | 0,95 |
| AIP | μ _{max} | V | 0,35 | 0,34 | 0,39 | 0,46 | 100 | 96 | 111 | 130 | 0,96 | 0,97 | 0,79 | 0,99 |
| | μ _{médio} | V | 0,14 | 0,14 | 0,16 | 0,19 | 100 | 101 | 112 | 130 | 0,96 | 0,97 | 0,75 | 0,99 |
| | μ _r | V | 0,33 | 0,33 | 0,35 | 0,42 | 100 | 99 | 106 | 127 | 0,91 | 0,96 | 0,61 | 0,99 |
| | ΔH _{25μ} | A/cm | 4,79 | 3,88 | 5,89 | 6,31 | 100 | 81 | 123 | 132 | 0,05 | 0,96 | 0,56 | 0,93 |
| | ΔH _{50μ} | A/cm | 41,86 | 42,93 | 42,11 | 42,09 | 100 | 103 | 101 | 101 | 0,52 | 0,33 | 0,73 | 0,85 |
| | ΔH _{75μ} | A/cm | 31,30 | 33,61 | 31,97 | 34,37 | 100 | 107 | 102 | 110 | 0,33 | 0,01 | 0,53 | 0,00 |
| | Hc _μ | A/cm | 18,90 | 21,24 | 18,79 | 21,78 | 100 | 112 | 99 | 115 | 0,24 | 0,03 | 0,68 | 0,71 |
| ACP | Re ₁ | V | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,14 | 100 | 102 | 103 | 104 | 0,94 | 0,91 | 0,92 | 0,70 |
| | Im ₁ | V | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 100 | 106 | 116 | 53 | 0,98 | 0,98 | 0,82 | 0,94 |
| | Mag ₁ | V | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 100 | 103 | 104 | 102 | 0,91 | 0,83 | 0,87 | 0,41 |
| | Ph ₁ | rad | 2,90 | 2,89 | 2,87 | 3,02 | X XXXXXXXXXXXXXXX | | | | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 0,94 |
| | Re ₂ | V | -0,12 | -0,12 | -0,13 | -0,11 | 100 | 101 | 106 | 91 | 0,52 | 0,08 | 0,39 | 0,82 |
| | Im ₂ | V | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,11 | 100 | 101 | 98 | 119 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,96 |
| | Mag ₂ | V | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 100 | 101 | 103 | 102 | 0,93 | 0,86 | 0,90 | 0,97 |
| | Ph ₂ | rad | -2,51 | -2,51 | -2,55 | -2,38 | X XXXXXXXXXXXXXXX | | | | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 0,93 |
| | Re ₃ | V | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 100 | 103 | 41 | 341 | 1,00 | 0,92 | 0,96 | 0,92 |
| | Im ₃ | V | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,13 | 100 | 98 | 100 | 99 | 0,91 | 0,82 | 0,90 | 0,99 |
| | Mag ₃ | V | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 100 | 98 | 100 | 101 | 0,93 | 0,84 | 0,91 | 0,99 |
| | Ph ₃ | rad | -1,51 | -1,50 | -1,55 | -1,35 | X XXXXXXXXXXXXXXX | | | | 0,99 | 0,89 | 0,96 | 0,91 |
| | Re ₄ | V | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 100 | 95 | 94 | 109 | 0,96 | 0,93 | 0,95 | 0,95 |
| | Im ₄ | V | -0,04 | -0,03 | -0,04 | -0,02 | 100 | 92 | 99 | 58 | 0,84 | 0,22 | 0,89 | 0,84 |
| | Mag ₄ | V | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 100 | 95 | 95 | 101 | 0,93 | 0,82 | 0,92 | 0,96 |
| Ph ₄ | rad | -0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | X XXXXXXXXXXXXXXX | | | | 0,27 | 0,23 | 0,33 | 0,02 | |
| Max | | XXXXXXXXXXXX | | | | | | | | 1,00 | 0,98 | 0,98 | 1,00 | |
| Min | | XXXXXXXXXXXX | | | | | | | | 0,05 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | |
| Média | | XXXXXXXXXXXX | | | | | | | | 0,82 | 0,77 | 0,75 | 0,82 | |
| % PBC | | XXXXXXXXXXXX | | | | | | | | 79,41 | 79,41 | 70,59 | 88,24 | |

Neste caso, percebe-se que as variações de intensidade mais significativas ocorrem para o material esferoidizado. Outro fator considerável é o %PBC que indica o percentual de fatores com uma boa correlação com os carregamentos ($r^2 > 0,75$). Este fator indica a potencialidade da técnica em ser associada aos modelos de regressão linear para a determinação das propriedades mecânicas de componentes de engenharia.

5.2.3 Regressão Multi-Linear

A Tabela 9 apresenta os resultados das análises por regressão multi-linear. Neste caso, também foram testadas combinações de técnicas, buscando-se desenvolver a melhor metodologia de caracterização do estado de tensões das tiras da armadura de tração de Risers flexíveis.

Tabela 9: Resultados das Regressões multi-lineares obtidas para as diferentes microestruturas.

| Microestrutura | Técnica | Regressão Multi-Linear | | | | | |
|----------------|------------|------------------------|----|-----------|----------------|--------|-------|
| | | PT | PU | r^2 [%] | r^2_{aj} [%] | MQE | RMQE |
| Ec | AHCT | 11 | 8 | 99,99 | 99,99 | 0,060 | 0,244 |
| | AIP | 7 | 5 | 99,67 | 99,66 | 3,686 | 1,920 |
| | ACP | 16 | 7 | 99,89 | 99,89 | 1,203 | 1,097 |
| | AHCT + AIP | 18 | 9 | 100,00 | 100,00 | 0,048 | 0,220 |
| | AHCT + ACP | 27 | 12 | 100,00 | 100,00 | 0,033 | 0,182 |
| | AIP + ACP | 23 | 9 | 99,97 | 99,96 | 0,383 | 0,619 |
| | Todos | 34 | 10 | 100,00 | 100,00 | 0,033 | 0,182 |
| Re | AHCT | 11 | 5 | 99,97 | 99,96 | 0,393 | 0,627 |
| | AIP | 7 | 2 | 95,28 | 95,22 | 53,045 | 7,283 |
| | ACP | 16 | 8 | 99,90 | 99,90 | 1,111 | 1,054 |
| | AHCT + AIP | 18 | 8 | 99,97 | 99,97 | 0,322 | 0,568 |
| | AHCT + ACP | 27 | 8 | 99,97 | 99,97 | 0,305 | 0,553 |
| | AIP + ACP | 23 | 5 | 99,84 | 99,83 | 1,830 | 1,353 |
| | Todos | 34 | 11 | 99,98 | 99,97 | 0,264 | 0,513 |
| Te | AHCT | 11 | 6 | 99,99 | 99,99 | 0,144 | 0,380 |
| | AIP | 7 | 6 | 99,12 | 99,09 | 9,861 | 3,140 |
| | ACP | 16 | 8 | 99,88 | 99,87 | 1,349 | 1,161 |
| | AHCT + AIP | 18 | 10 | 99,99 | 99,99 | 0,117 | 0,342 |
| | AHCT + ACP | 27 | 9 | 99,98 | 99,98 | 0,228 | 0,477 |
| | AIP + ACP | 23 | 9 | 99,91 | 99,91 | 0,968 | 0,984 |
| | Todos | 34 | 7 | 99,97 | 99,96 | 0,385 | 0,621 |
| Es | AHCT | 11 | 5 | 99,97 | 99,97 | 0,283 | 0,532 |
| | AIP | 7 | 4 | 99,87 | 99,87 | 1,449 | 1,204 |
| | ACP | 16 | 8 | 99,41 | 99,37 | 6,689 | 2,586 |
| | AHCT + AIP | 18 | 10 | 99,98 | 99,98 | 0,258 | 0,508 |
| | AHCT + ACP | 27 | 6 | 99,98 | 99,98 | 0,219 | 0,468 |
| | AIP + ACP | 23 | 5 | 99,92 | 99,92 | 0,923 | 0,961 |
| | Todos | 34 | 10 | 99,98 | 99,98 | 0,172 | 0,414 |

Neste sentido, os melhores resultados foram obtidos considerando-se os resultados das técnicas de AHCT e ACP para o material no estado encruado. Para as amostras recozidas e esferoidizadas a combinação de técnicas apresentou maior representatividade. Para amostra Temperada a técnica AHCT apresentou os resultados estatísticos mais expressivos. Em todos os casos, as variâncias (MQE) apresentaram valores baixos, indicando a boa confiabilidade da técnica.

As equações a seguir indicam as relações entre os carregamentos e os parâmetros utilizados na regressão multi-linear para cada condição microestrutural.

Equação 18: Microestrutura – Ec, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = 338,56 + 459,84V_{mag} + 200,28A_3 + 113,02A_7 - 293,55P_3 - 41,08SAH - 63,74K - 12,89Hco + 18,39Hro$$

Equação 19: Microestrutura – Ec, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = -42,34 - 1535\mu_{max} + 337,477\mu_r + 10,03Hc\mu + 13,30\Delta H 25\mu + 9,48\Delta H 50\mu$$

Equação 20: Microestrutura – Ec, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = -3566,65 - 1906,84Ph_1 - 153133,39Im_2 - 88003,76Mag_2 - 17898,57Ph_2 - 110536,65Im_4 - 54892,41Mag_4 + 7757,86Ph_4$$

Equação 21: Microestrutura – Ec, técnica – AHCT + AIP.

$$\sigma_{3MA} = 478,39 + 405,94V_{mag} + 209,59A_3 - 154,98P_3 + 20,28SAH - 88,56K + 24,21Hco - 489,98\mu_{max} + 481,63\mu_{medio} - 53,73\mu_r$$

Equação 22: Microestrutura – Ec, técnica – AHCT + ACP.

$$\sigma_{3MA} = -1644,33 + 194,71A_3 + 34,53A_5 + 33,1A_7 - 63,28P_3 - 5,4P_5 - 80,61K - 16235,86Im_1 + 2749,84Mag_1 - 2260,14Ph_1 - 17501,47Im_2 - 11036,58Mag_2 - 2167,44Ph_2$$

Equação 23: Microestrutura – Ec, técnica – AIP + ACP.

$$\sigma_{3MA} = 22270,533 + 1095,18\mu_{max} - 2421,53\mu_{medio} + 14,49\Delta H 25\mu + 3,60\Delta H 50\mu - 51865,53Im_1 + 7072,02Mag_1 - 7669,7Ph_1 + 1178,69Mag_3 - 2533,58Re_4$$

Equação 24: Microestrutura – Ec, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 1644,33 + 194,71A_3 + 34,53A_5 - 63,28P_3 - 5,4P_5 - 80,62K - 16235,86Im_1 + 2749,84Ph_1 - 17501,47Im_2 - 11036,58Mag_2 - 2167,44Ph_2$$

Equação 25: Microestrutura – Re, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = 928,33 + 57,96A_3 + 107,77A_7 - 196,28P_5 + 20,18P_7 - 56,93K$$

Equação 26: Microestrutura – Re, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = 703,97 - 3383,63\mu_{\max} + 3439,97\mu_{\text{médio}}$$

Equação 27: Microestrutura – Re, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 28395,04 + 65097,77 \text{Re}_1 - 109179,01 \text{Im}_1 + 97543,41 \text{Mag}_1 - 13996,75 \text{Ph}_1 + 57874,29 \text{Re}_3 + 8833,58 \text{Im}_3 - 7752,5 \text{Ph}_3 - 173,33 \text{Ph}_4$$

Equação 28: Microestrutura – Re, técnica – AHCT + AIP.

$$\sigma_{3MA} = 1174,58 - 652,44V_{\text{mag}} + 108,32A_3 + 118,66A_7 - 195,51P_5 + 22,57P_7 - 63,49K - 2,39\Delta H 25\mu - 2,37\Delta H 75\mu$$

Equação 29: Microestrutura – Re, técnica – AHCT + ACP.

$$\sigma_{3MA} = -25,8 - 44,79A_3 - 157,04P_5 + 15,73P_7 - 37,35K - 360,61\text{Ph}_1 - 43165,06 \text{Re}_2 - 56974,04 \text{Im}_2 - 11042,67 \text{Ph}_2$$

Equação 30: Microestrutura – Re, técnica – AIP + ACP.

$$\sigma_{3MA} = -1994,84 + 762,28\mu_{\text{médio}} - 8,74\Delta H 25\mu - 7,35\Delta H 50\mu + 13519,67 \text{Im}_1 - 833,48 \text{Ph}_2$$

Equação 31: Microestrutura – Re, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 220669,16 - 80,42A_5 - 154,86P_5 + 19,79P_7 + 62,45SAH - 46,39K - 147,0357\mu_{\text{médio}} + 1,76\Delta H 75\mu - 1888,96 \text{Im}_1 + 32934,94 \text{Re}_2 - 43991,77 \text{Im}_2 - 8547,84 \text{Ph}_2$$

Equação 32: Microestrutura – Te, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = -1286,37 + 1628,27\mu_{\max} - 1440,1\mu_{\text{médio}} - 5,88\Delta H 25\mu + 3795,67 \text{Mag}_1 + 4296,63 \text{Mag}_3$$

Equação 33: Microestrutura – Te, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = -1809,36 + 1269,73\mu_{\max} - 3654,41\mu_{\text{médio}} - 1024,18\mu_r + 25,13Hc\mu + 46,05\Delta H 25\mu + 11,15\Delta H 75\mu$$

Equação 34: Microestrutura – Te, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 32,717 + 33098,49 \text{Re}_1 + 85161,77 \text{Im}_1 + 11087,88 \text{Ph}_1 - 87019,72 \text{Re}_2 + 135193,06 \text{Im}_2 + 24562,23 \text{Ph}_2 - 12928,97 \text{Im}_4 + 1194,96 \text{Ph}_4$$

Equação 35: Microestrutura – Te, técnica – AHCT + AIP.

$$\sigma_{3MA} = 766,26 - 1958,29V_{\text{mag}} + 388,47A_3 + 135,01A_5 + 61,63P_5 + 26,22SAH - 147,13K + 13,04Hco + 399,12\mu_{\max} - 265,81\mu_{\text{médio}} - 1,84\Delta H 25\mu$$

Equação 36: Microestrutura – Te, técnica – AHCT + ACP.

$$\sigma_{3MA} = 21509,32 - 402,1P_3 + 64,51P_5 + 26,62P_7 - 35,84Hco - 478,77 \text{Ph}_1 - 55740,11 \text{Re}_2 + 25363,68 \text{Im}_2 - 33269,84 \text{Mag}_2 + 7901,18 \text{Ph}_2$$

Equação 37: Microestrutura – Te, técnica – AIP + ACP.

$$\sigma_{3MA} = 21509,32 - 402,1P_3 + 64,51P_5 + 26,62P_7 - 35,84Hco - 478,77Ph_1 - 55740,11Re_2 + 25363,68Im_2 - 33269,84Mag_2 + 7901,18Ph_2$$

Equação 38: Microestrutura – Te, técnica – Todos.

$$\sigma_{3MA} = 26236,46 + 74,07P_5 - 397,57\mu_{\max} + 6,57\Delta H25\mu - 1043,46Ph_1 - 29942,86Re_2 + 51779,79Im_2 + 8983,64Ph_2$$

Equação 39: Microestrutura – Es, técnica – AHCT.

$$\sigma_{3MA} = 744,98 + 39,47A_3 - 98,88A_5 - 749,23P_3 + 112,94P_5 + 44,43K$$

Equação 40: Microestrutura – Es, técnica – AIP.

$$\sigma_{3MA} = -132,67 + 1770,93\mu_{\max} - 706,36\mu_{\text{médio}} - 8,34Hc\mu - 10,775\Delta H25\mu$$

Equação 41: Microestrutura – Es, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 19,68 + 57850,64Re_1 + 47522,61Mag_1 - 23576,03Im_2 - 23638,42Ph_2 - 117123,59Re_3 - 140178,04Im_3 - 100155,01Mag_3 + 20631,5Ph_3$$

Equação 42: Microestrutura – Es, técnica – AHCT + AIP.

$$\sigma_{3MA} = -62,86 + 144,41A_3 - 32,17A_5 - 545,61P_3 + 180,16P_5 + 14,39Hco - 1,59\Delta H25\mu - 17847,95Re_1 - 15885,59Mag_1 - 123,98Ph_2 + 1345,94Mag_4$$

Equação 43: Microestrutura – Es, técnica – AHCT + ACP.

$$\sigma_{3MA} = 488,77 + 62,65A_3 - 63,51A_5 - 717,35P_3 + 113,59P_5 + 30,97K - 1663,72Mag_3$$

Equação 44: Microestrutura – Es, técnica – AIP + ACP.

$$\sigma_{3MA} = -1286,37 + 1628,27\mu_{\max} - 1440,1\mu_{\text{médio}} - 5,88\Delta H25\mu + 3795,67Mag_1 + 4296,63Mag_3$$

Equação 45: Microestrutura – Es, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = -62,86 + 144,41A_3 - 32,17A_5 - 545,61P_3 + 180,16P_5 + 14,39Hco - 1,59\Delta H25\mu - 17847,95Re_1 - 15885,59Mag_1 - 123,98Ph_2 + 1345,94Mag_4$$

A confiabilidade das técnicas foi testada, através da aplicação das equações que apresentaram os melhores resultados estatísticos, nos dados micromagnéticos obtidos na etapa anterior. Neste sentido, assim como para o teste das configurações, foram utilizados para as regressões lineares os dados provenientes dos carregamentos de 0, 30, 60 e 90% do limite de escoamento do material. Assim, aplicando-se as equações aos demais resultados (10, 20, 40, 50, 70 e 80% σ_e), pode-se verificar os desvios do modelo desenvolvido em relação aos resultados

reais. Os resultados estão apresentados na Figura 100, onde percebe-se que os desvios mais pronunciados foram apresentados pelo material no estado recozido.

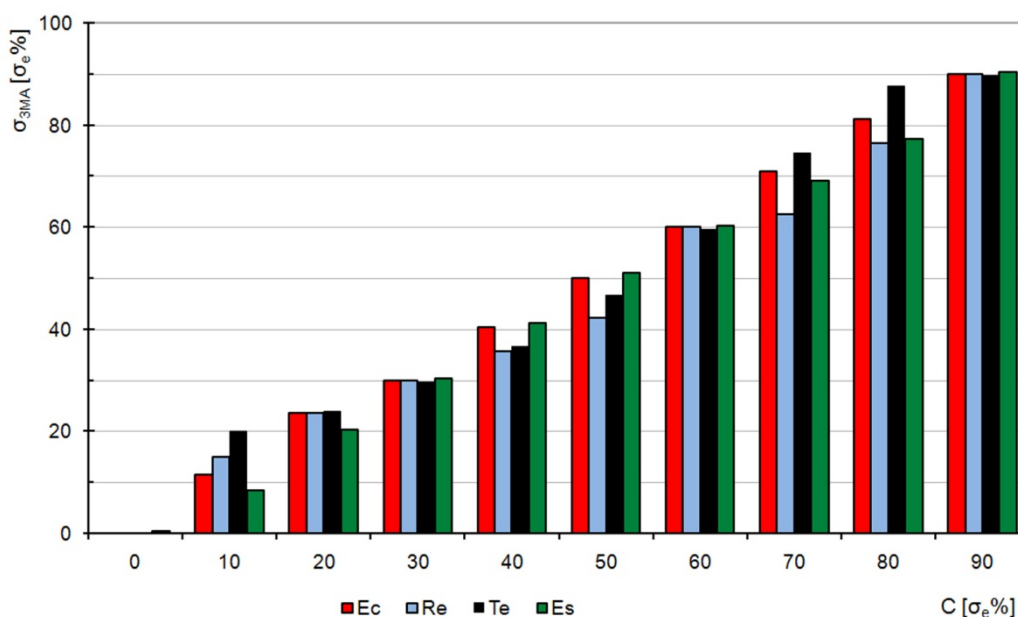


Figura 100: Resultado obtido para o teste de validação das regressões lineares.

5.3 Análise da influência do Lift off

Seguindo a seqüência indicada na metodologia experimental, primeiramente foram analisadas diferentes configurações de parâmetros para aplicação da técnica micromagnética. A seguir, estes parâmetros foram testados para diferentes condições microestruturais, a fim de verificar a influência da microestrutura (combinada com a variação de carregamento) nas respostas magnéticas obtidas através das técnicas de análise harmônica do campo magnético tangencial (AHCT), análise incremental da permeabilidade magnética (AIP) e análise multi – frequência das correntes parasitas (ACP). Os resultados mostraram os avanços na otimização dos parâmetros e a aplicabilidade de cada técnica para a determinação do estado de tensões em arames da armadura de tração de Risers flexíveis. Porém, as metodologias são poucos aplicáveis às situações reais, onde a armadura de tração esta revestida por uma camada protetora polimérica. Deste modo, esta etapa do trabalho visou avaliar o efeito exercido por esta camada polimérica nas medidas micromagnéticas. Este estudo foi conduzido através da utilização de padrões poliméricos especialmente desenvolvidos, os quais simularam diferentes condições de Lift off (espessura da camada de polímero).

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos, referentes à variação da intensidade dos sinais micromagnéticos em relação à condição sem Lif off. Os estudos foram conduzidos para o material encruado, utilizado na configuração original dos Risers flexíveis.

5.3.1 Apresentação dos Resultados

Na Figura 101 estão apresentados os resultados para a técnica de análise harmônica do campo magnético tangencial (AHCT). Percebe-se uma grande atenuação da intensidade dos sinais, contudo, a coercitividade não apresentou variação significativa. Em termos de sensibilidade ao estado de tensões, este parâmetro se mostrou pouco dependente (Figura 73). Contudo a não atenuação de Hco atua como um indicador da eficiência do processo de magnetização do material, tornando o efeito do Lift off um problema de detecção dos sinais micromagnéticos.

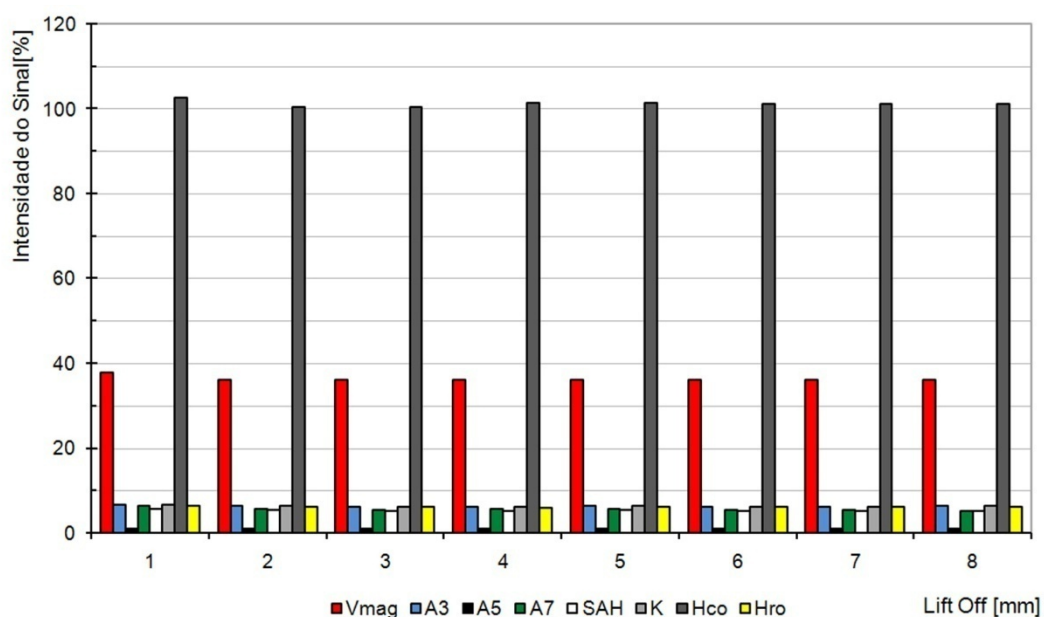


Figura 101: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (AHCT).

A Figura 102 apresenta os resultados obtidos para a análise Incremental da permeabilidade (AIP). Da mesma forma, percebe-se a grande atenuação dos parâmetros que apresentaram maior sensibilidade à variação dos estados de carregamentos durante os ensaios conduzidos sem a presença do Lift off.

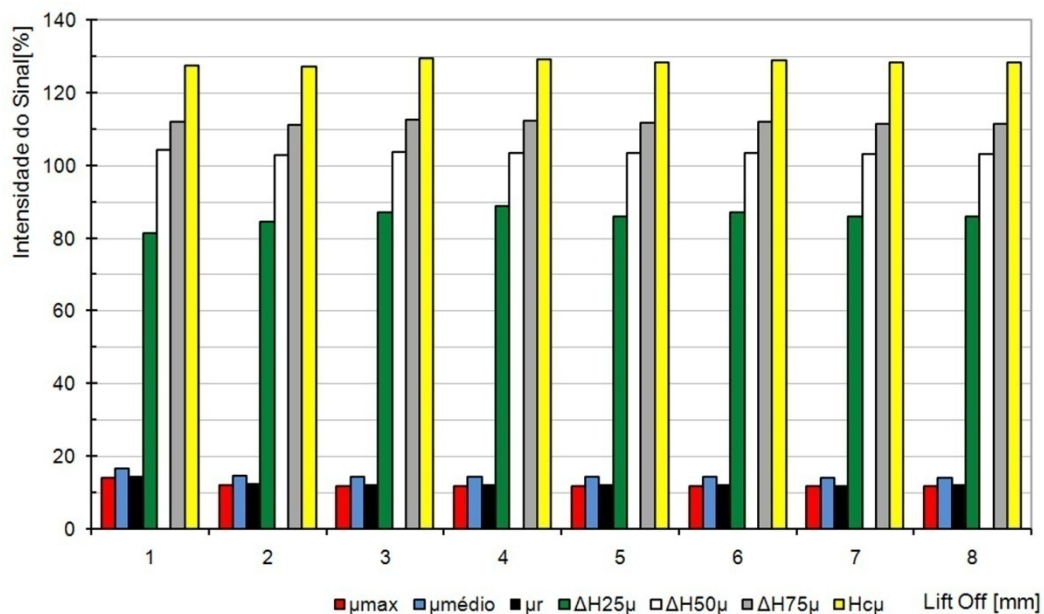


Figura 102: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (AIP).

As Figuras 103 e 104 apresentam as atenuações dos sinais referentes à técnica de análise multi – frequência das correntes parasitas.

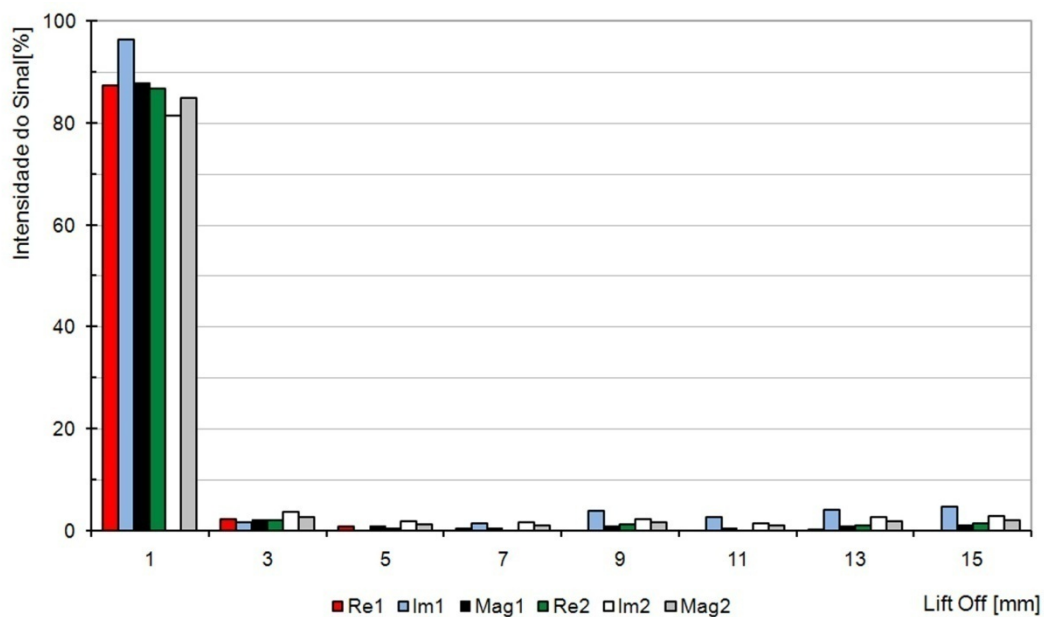


Figura 103: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (ACP).

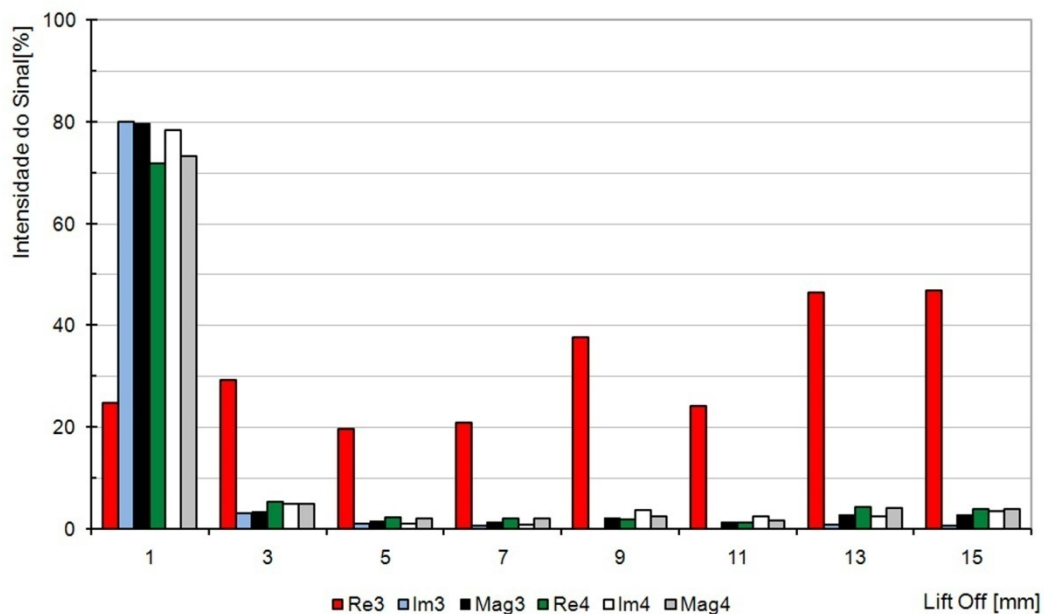


Figura 104: Variação da intensidade dos sinais micromagnéticos devido às diferentes condições de Lift off (ACP).

Neste caso, percebe-se que as variações são mais significativas a partir de afastamentos superiores a 1 mm. Este efeito foi mais pronunciado para as medidas realizadas com baixas frequências de análise (Figura 103).

A fim de verificar a aplicabilidade do método para a condição real de aplicação dos Risers flexíveis, a Tabela 10 apresenta a análise estatística dos resultados obtidos nesta etapa. Percebe-se que a atenuação dos sinais é acompanhada pela perda de correlação com a variação de carregamentos. Estes efeitos foram mais pronunciados para as técnicas AHCT e AIP, onde as correlações foram muito fracas após a aplicação do Lift off.

Nesta etapa, os resultados mais significativos foram obtidos a partir da análise das correntes parasitas, a qual apresentou os maiores valores de correlação para cada condição de Lift off. É evidente que a correlação apresenta relação inversa com o Lift off, contudo a ocorrência de bons valores de r^2 para alguns parâmetros é um bom indicio da aplicabilidade desta técnica – uma vez que seus parâmetros iniciais de controle sejam otimizados. A Tabela 11 apresenta os resultados das regressões lineares obtidas a partir destes dados, comprovando o que foi dito anteriormente.

5.3.2 Análise Estatística

A Tabela 10 apresenta a análise estatística dos resultados anteriores.

Tabela 10: Análise Estatística dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho.

| | | | Correlação com o carregamento (Lift Off) | | | | | | | | |
|---------------|--------------------|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Lift Off [mm] | | | 0 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 |
| AHCT | V _{mag} | V | 0,96 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | A ₃ | A/cm | 0,95 | 0,09 | 0,08 | 0,00 | 0,73 | 0,19 | 0,12 | 0,00 | 0,12 |
| | A ₅ | A/cm | 0,96 | 0,22 | 0,09 | 0,09 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,26 | 0,26 |
| | A ₇ | A/cm | 0,95 | 0,25 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,04 |
| | P ₃ | rad | 0,92 | 0,59 | 0,01 | 0,03 | 0,29 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,10 |
| | P ₅ | rad | 0,90 | 0,51 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,01 | 0,17 | 0,00 |
| | P ₇ | rad | 0,94 | 0,02 | 0,10 | 0,03 | 0,02 | 0,33 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| | SAH | A/cm | 0,95 | 0,32 | 0,18 | 0,25 | 0,82 | 0,06 | 0,13 | 0,07 | 0,22 |
| | K | % | 0,97 | 0,11 | 0,07 | 0,01 | 0,74 | 0,19 | 0,23 | 0,00 | 0,14 |
| | Hco | A/cm | 0,46 | 0,56 | 0,00 | 0,04 | 0,12 | 0,08 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Hro | A/cm | 0,95 | 0,48 | 0,01 | 0,07 | 0,05 | 0,08 | 0,02 | 0,03 | 0,09 |
| AIP | μ _{max} | V | 0,96 | 0,66 | 0,05 | 0,45 | 0,19 | 0,36 | 0,67 | 0,48 | 0,29 |
| | μ _{médio} | V | 0,96 | 0,58 | 0,06 | 0,33 | 0,37 | 0,08 | 0,61 | 0,57 | 0,18 |
| | μ _r | V | 0,91 | 0,73 | 0,01 | 0,50 | 0,09 | 0,29 | 0,71 | 0,05 | 0,04 |
| | ΔH25μ | A/cm | 0,05 | 0,28 | 0,47 | 0,25 | 0,43 | 0,00 | 0,40 | 0,39 | 0,04 |
| | ΔH50μ | A/cm | 0,52 | 0,00 | 0,19 | 0,87 | 0,63 | 0,38 | 0,82 | 0,66 | 0,16 |
| | ΔH75μ | A/cm | 0,33 | 0,00 | 0,18 | 0,77 | 0,04 | 0,34 | 0,77 | 0,63 | 0,03 |
| | Hcμ | A/cm | 0,24 | 0,01 | 0,18 | 0,73 | 0,11 | 0,22 | 0,91 | 0,31 | 0,09 |
| ACP | Re ₁ | V | 0,94 | 0,96 | 0,09 | 0,36 | 0,81 | 0,92 | 0,00 | 0,71 | 0,54 |
| | Im ₁ | V | 0,98 | 0,73 | 0,93 | 0,84 | 0,59 | 0,88 | 0,04 | 0,81 | 0,11 |
| | Mag ₁ | V | 0,91 | 0,93 | 0,75 | 0,21 | 0,50 | 0,88 | 0,04 | 0,80 | 0,11 |
| | Ph ₁ | rad | 0,99 | 0,82 | 0,93 | 0,71 | 0,63 | 0,94 | 0,01 | 0,65 | 0,39 |
| | Re ₂ | V | 0,51 | 0,00 | 0,92 | 0,80 | 0,65 | 0,95 | 0,03 | 0,90 | 0,15 |
| | Im ₂ | V | 0,93 | 0,87 | 0,94 | 0,55 | 0,46 | 0,85 | 0,09 | 0,77 | 0,05 |
| | Mag ₂ | V | 0,87 | 0,93 | 0,90 | 0,20 | 0,48 | 0,90 | 0,01 | 0,79 | 0,08 |
| | Ph ₂ | rad | 0,96 | 0,81 | 0,94 | 0,83 | 0,68 | 0,77 | 0,80 | 0,71 | 0,36 |
| | Re ₃ | V | 0,94 | 0,70 | 0,94 | 0,87 | 0,51 | 0,93 | 0,01 | 0,79 | 0,06 |
| | Im ₃ | V | 0,51 | 0,91 | 0,78 | 0,25 | 0,88 | 0,36 | 0,79 | 0,72 | 0,58 |
| | Mag ₃ | V | 0,54 | 0,91 | 0,94 | 0,05 | 0,37 | 0,92 | 0,01 | 0,78 | 0,04 |
| | Ph ₃ | rad | 0,96 | 0,69 | 0,93 | 0,69 | 0,70 | 0,44 | 0,74 | 0,69 | 0,31 |
| | Re ₄ | V | 0,36 | 0,87 | 0,94 | 0,03 | 0,00 | 0,71 | 0,11 | 0,75 | 0,54 |
| | Im ₄ | V | 0,54 | 0,86 | 0,86 | 0,63 | 0,61 | 0,93 | 0,46 | 0,04 | 0,02 |
| | Mag ₄ | V | 0,12 | 0,91 | 0,94 | 0,01 | 0,11 | 0,92 | 0,06 | 0,76 | 0,18 |
| | Ph ₄ | rad | 0,06 | 0,40 | 0,30 | 0,00 | 0,20 | 0,85 | 0,24 | 0,80 | 0,53 |
| Max | | | 0,99 | 0,96 | 0,94 | 0,87 | 0,88 | 0,95 | 0,91 | 0,90 | 0,58 |
| Min | | | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Média | | | 0,74 | 0,52 | 0,44 | 0,34 | 0,38 | 0,47 | 0,26 | 0,44 | 0,17 |
| % PBC | | | 66,67 | 42,42 | 42,42 | 21,21 | 15,15 | 42,42 | 21,21 | 39,39 | 0 |

5.3.3 Regressão Multi-Linear

A Tabela 11 apresenta os resultados das análises estatísticas realizadas através da técnica de regressão multi-linear para os resultados micromagnéticos obtidos na análise da influência do Lift off.

Tabela 11: Resultados das Regressões multi-lineares obtidas para as diferentes microestruturas

| Lift Off | Técnica | Regressão Multi-Linear | | | | | |
|----------|---------|------------------------|----|--------------------|-----------------------|----------|--------|
| | | PI | PU | r ² [%] | r ² aj [%] | MQE | RMQE |
| 0 mm | AHCT | 11 | 8 | 99,99 | 99,99 | 0,060 | 0,244 |
| | AIP | 7 | 5 | 99,67 | 99,66 | 3,686 | 1,920 |
| | ACP | 16 | 7 | 99,89 | 99,89 | 1,203 | 1,097 |
| | Todos | 34 | 12 | 100,00 | 100,00 | 0,033 | 0,182 |
| 1 mm | AHCT | 11 | - | 2,67 | 2,05 | 1095,002 | 33,091 |
| | AIP | 7 | - | 52,42 | 50,55 | 535,331 | 23,137 |
| | ACP | 16 | 7 | 94,20 | 93,89 | 65,302 | 8,081 |
| | Todos | 34 | 9 | 94,48 | 94,14 | 62,146 | 7,883 |
| 3 mm | AHCT | 11 | - | 0,00 | 0,00 | 1125,000 | 33,541 |
| | AIP | 7 | - | 37,73 | 35,29 | 700,563 | 26,468 |
| | ACP | 16 | 6 | 93,57 | 93,32 | 72,344 | 8,506 |
| | Todos | 34 | 6 | 93,35 | 93,09 | 74,808 | 8,649 |
| 5 mm | AHCT | 11 | - | - | - | - | - |
| | AIP | 7 | - | 27,01 | 26,08 | 821,131 | 28,655 |
| | ACP | 16 | 7 | 87,83 | 87,27 | 136,940 | 11,702 |
| | Todos | 34 | 8 | 90,15 | 89,62 | 110,868 | 10,529 |
| 7 mm | AHCT | 11 | - | - | - | - | - |
| | AIP | 7 | - | - | - | - | - |
| | ACP | 16 | 7 | 93,13 | 92,81 | 70,145 | 8,375 |
| | Todos | 34 | 8 | 93,76 | 93,43 | 70,145 | 8,375 |
| 9 mm | AHCT | 11 | - | - | - | - | - |
| | AIP | 7 | - | - | - | - | - |
| | ACP | 16 | 5 | 97,76 | 97,69 | 25,209 | 5,021 |
| | Todos | 34 | 8 | 97,92 | 97,81 | 23,390 | 4,836 |
| 11 mm | AHCT | 11 | - | - | - | - | - |
| | AIP | 7 | - | - | - | - | - |
| | ACP | 16 | 3 | 37,67 | 36,48 | 701,160 | 26,479 |
| | Todos | 34 | 6 | 57,56 | 55,90 | 477,430 | 21,850 |
| 13 mm | AHCT | 11 | - | - | - | - | - |
| | AIP | 7 | - | - | - | - | - |
| | ACP | 16 | 2 | 85,98 | 85,80 | 157,729 | 12,559 |
| | Todos | 34 | 6 | 88,45 | 87,99 | 129,984 | 11,401 |
| 15 mm | AHCT | 11 | - | - | - | - | - |
| | AIP | 7 | - | - | - | - | - |
| | ACP | 16 | 4 | 72,17 | 71,45 | 313,136 | 17,696 |
| | Todos | 34 | 4 | 72,17 | 71,45 | 313,136 | 17,696 |

Neste caso, percebe-se que a técnica ACP foi a que apresentou os melhores resultados. As equações a seguir indicam as relações entre os carregamentos e os parâmetros utilizados na regressão linear para cada condição Lift off. Os melhores resultados para o teste de validação estão apresentados nas figuras 105 e 106.

Equação 46: Lift off – 1 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 172008,38 + 383461,55 \text{Re}_1 - 479278,35 \text{Mag}_1 - 23407,03 \text{Re}_2 + 276841,04 \text{Im}_2 \\ - 631383,55 \text{Mag}_2 - 956784,01 \text{Re}_3 - 97560,6 \text{Ph}_3$$

Equação 47: Lift off – 1 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 154209,91 + 13,92 \Delta H 75 \mu + 398547,73 \text{Re}_1 - 488337,94 \text{Mag}_1 - 23859,07 \text{Ph}_1 \\ + 479018,02 \text{Re}_2 + 287211,97 \text{Im}_2 - 655493,22 \text{Mag}_2 - 859102,03 \text{Re}_3 - 86738,62 \text{Ph}_3$$

Equação 48: Lift off – 3 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 15110,02 - 309601,83 \text{Re}_1 - 1553571,93 \text{Im}_1 - 5097,18 \text{Ph}_1 - 108,1 \text{Ph}_2 \\ - 72934,33 \text{Re}_4 - 104,16 \text{Ph}_4$$

Equação 49: Lift off – 3 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 298,4 + 227,99 \text{Hro} - 15118,15 \mu_{\text{médio}} + 59323,56 \text{Im}_1 - 139,89 \text{Ph}_2 \\ - 62765,13 \text{Re}_4 - 84,07 \text{Ph}_4$$

Equação 50: Lift off – 5 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = -839,40 - 101440,84 \text{Im}_1 - 754061,07 \text{Im}_2 - 619402,85 \text{Mag}_2 - 396,65 \text{Ph}_2 \\ + 29421,5 \text{Re}_3 - 41868,56 \text{Re}_4 - 34,66 \text{Ph}_4$$

Equação 51: Lift off – 5 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = -2868,9 + 35713,59 \mu_{\text{max}} - 30766,1 \mu_{\text{médio}} - 83455,1 \text{Im}_1 + 362829,49 \text{Re}_2 \\ - 744940,09 \text{Im}_2 - 533149,66 \text{Mag}_2 - 1006,39 \text{Ph}_2 + 31489,1 \text{Re}_3$$

Equação 52: Lift off – 7 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 1695,18 - 164332,58 \text{Re}_1 + 493727,67 \text{Im}_1 + 202148,55 \text{Mag}_1 + 483,63 \text{Ph}_1 \\ - 125493,51 \text{Re}_2 + 279,45 \text{Ph}_2 - 20166,62 \text{Re}_3$$

Equação 53: Lift off – 7 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 1683,86 - 15,37 \Delta H 75 \mu + 79,97 \text{Ph}_1 - 461632,98 \text{Re}_2 + 276612,64 \text{Im}_2 \\ + 328560,06 \text{Mag}_2 + 695,51 \text{Ph}_2 - 26474,6 \text{Re}_4 - 9269,92 \text{Im}_4$$

Equação 54: Lift off – 9 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 625,02 - 307362,14 \text{Re}_1 + 459,24 \text{Ph}_1 - 45089,73 \text{Im}_2 + 15468,94 \text{Re}_3 + 17281,56 \text{Re}_4$$

Equação 55: Lift off – 9 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = -627,73 + 21352,49 \mu_{\text{max}} - 20902,02 \mu_{\text{médio}} - 157810,07 \text{Re}_1 - 1295894,58 \text{Im}_1 \\ - 1260771,63 \text{Mag}_1 - 27493,5 \text{Re}_2 + 63848,6 \text{Mag}_2 + 15513,45 \text{Mag}_3$$

Equação 56: Lift off – 11 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = -240,93 - 327,67 \text{Ph}_2 + 76911,14 \text{Mag}_3 - 106046,54 \text{Mag}_4$$

Equação 57: Lift off – 11 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = -5472,64 + 35754,26 \mu_r + 84,48 \Delta H 50 \mu + 36,45 \Delta H 75 \mu 69869,22 \text{Im}_1 \\ - 288,99 \text{Ph}_2 - 57395,41 \text{Mag}_4$$

Equação 58: Lift off – 13 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 116,64 - 97720,04Im_1 + 119,81Ph_1$$

Equação 59: Lift off – 13 mm, técnica – Todas.

$$\sigma_{3MA} = 131,48 + 14498,86\mu_r - 21,39\Delta H50\mu - 111206,12Im_1 - 25125,21Im_3 + 302,2Ph_3 - 79,24Ph_4$$

Equação 60: Lift off – 15 mm, técnica – ACP.

$$\sigma_{3MA} = 1473,59 + 214245,44Re_1 + 73313,97Re_2 - 156641,84Re_4 - 151,06Ph_4$$

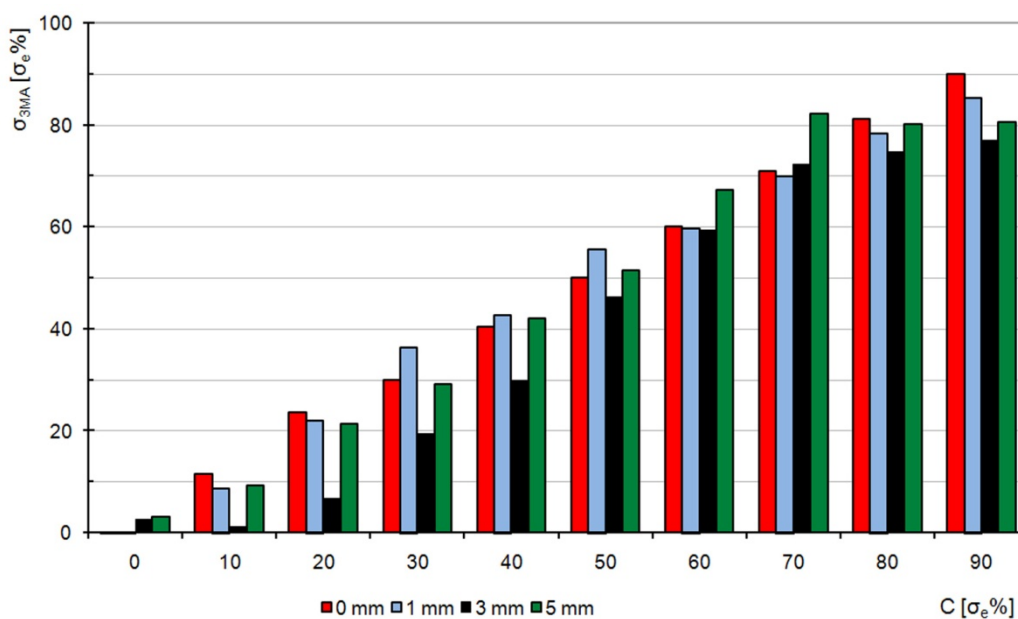


Figura 105: Resultado obtido para o teste de validação das regressões lineares.

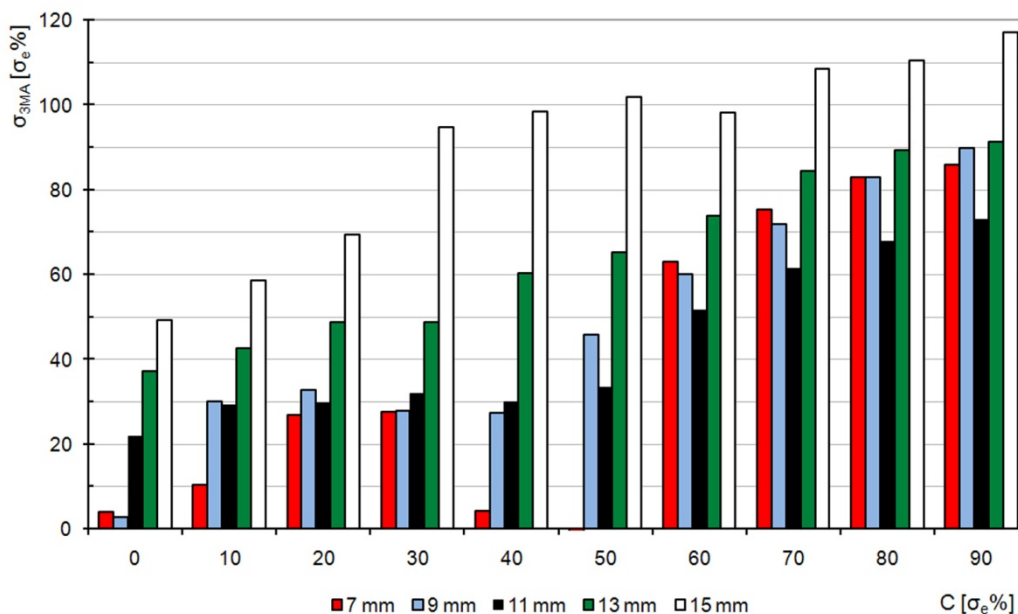


Figura 106: Resultado obtido para o teste de validação das regressões lineares.

6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostraram a grande potencialidade das técnicas micromagnéticas para a caracterização não destrutiva do estado de tensões em componentes de engenharia. Nas figuras 105 e 106, foi mostrado que mesmo na presença de camadas não magnéticas espessas, os métodos micromagnéticos apresentaram uma considerável sensibilidade aos efeitos das variações de carregamento. Para pequenos afastamentos (Lift off menores que 3 mm - Figura 105) os resultados apresentaram pequenos desvios, em relação aos valores esperados. O aumento do Lift off resultou numa queda significativa na precisão dos resultados obtidos, contudo, qualitativamente, foi possível separar os estados de carregamento na faixa de aplicação dos Risers flexíveis (de 30 a 50% do limite de escoamento do material) até um afastamento de 9 mm.

É importante salientar que estes resultados foram obtidos a partir de análises realizadas com um sensor de pequena escala (com distância entre os pólos magnéticos inferior a 5 mm), onde os resultados mostraram boas condições de serem otimizados, através da seleção adequada para a geometria do sensor. Isto pode ser compreendido com base nas Figura 21, as quais indicam que serão registrados apenas os sinais magnéticos gerados na posição central da unidade sensora. Uma vez otimizada a geometria do ensaio, a queda de intensidade dos sinais tende a ser menos significativa, tornando esta técnica uma ferramenta confiável para o monitoramento do estado de tensões de Risers flexíveis.

Em relação ao monitoramento da integridade estrutural de Risers flexíveis, a Figura 4 mostra a difícil aplicabilidade dos métodos micromagnéticos para a inspeção dos arames situados no interior da região de conexão. Especialmente devido ao fato de o conector estar revestido por uma camada ferromagnética. Contudo, a literatura consultada, em especial os trabalhos de Out et al⁸ e Carneval et al¹¹ mostraram que, entre as técnicas analisadas, apenas a radiografia apresentou potencialidade de aplicação para a inspeção dos arames na região de conexão. Alves e Costa^{13,14} mostraram que, em geral, a falha catastrófica de dutos flexíveis é acompanhada pela ruptura progressiva dos arames da armadura de tração em regiões adjacentes à conexão. Os autores mostraram que para reduções do número de tiras superiores a 5% a ruptura progressiva dos arames na região do dano passa a ser o modo de falha predominante.

Deste modo, os resultados aqui apresentados e os dispostos na literatura, visam apresentar a potencialidade das técnicas micromagnéticas para o monitoramento e inspeção do estado de tensões em na armadura de tração de Risers flexíveis. Neste sentido, torna-se importante distinguir as duas aplicações onde o monitoramento pode ser limitado a uma resposta qualitativa e a inspeção centrada numa resposta quantitativa do estado de tensões. Esta distinção definirá a sensibilidade da técnica e os custos associados para cada aplicação.

Através do método 3MA, pode-se combinar até 41 parâmetros micromagnéticos não destrutivos. Elevando assim a gama de aplicação do método.

Dobmann et al^{36,42,46,51} mostraram as diferentes situações onde estas técnicas podem ser empregadas, em concordância com os trabalhos de Martins et al^{29,54}, Titto⁴⁵ e Maru e Padovese⁵⁵. Estes autores apresentaram resultados expressivos, mas todos centrados na análise do ruído Barkhausen. A inovação adquirida com este trabalho reside na comprovação da aplicabilidade de técnicas como a Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial, a Análise Incremental da Permeabilidade Magnética e Análise multi-freqüência das Correntes Parasitas, para as quais a literatura é restrita e limitada.

Uma característica evidente sobre os métodos micromagnéticos é a sensibilidade que estes apresentam aos parâmetros de controle. Além da intensidade do campo magnético, da freqüência de magnetização e da freqüência de análise, as características (geométricas e magnéticas) dos sensores determinam a reprodutibilidade da técnica. Ou seja, uma vez alteradas as características dos sensores será necessária uma alteração nos parâmetros de controle. Por este motivo, o trabalho foi conduzido utilizando-se apenas um sensor magnético.

O sensor magnético utilizado neste trabalho foi desenvolvido e construído no Fraunhofer Institut (Alemanha). Durante este processo, foi solicitado o envio de uma amostra do objeto de interesse, para a calibração e otimização do equipamento. Juntamente com o equipamento, foi fornecida pelo fabricante uma configuração padrão de parâmetros, indicada para a análise do estado de tensões em amostras de arames da armadura de tração de Risers flexíveis de 6". Uma vez que os primeiros resultados obtidos mostraram-se pouco satisfatórios, foram testadas diferentes configurações de parâmetros, a fim de elevar a capacidade de detecção da técnica (ANEXO 2). Os resultados apresentados neste trabalho (5.1, pg. 48) mostraram os avanços alcançados através desta etapa de otimização.

Este estudo foi conduzido com base na interação entre as diferentes etapas do processo de magnetização (Figura 12) e as técnicas empregadas. Neste sentido, conclui-se que as técnicas de AIP e ACP podem ser consideradas reversíveis, ou seja, voltadas para a detecção dos movimentos das paredes de domínio magnético que separam domínios não paralelos (PD2), pois estas mostraram melhores resultados quando foram utilizados campos magnéticos inferiores à coercitividade do material. Do mesmo modo, a técnica AHCT pode ser classificada como uma técnica micromagnética irreversível focada para a detecção dos movimentos das paredes de domínio do tipo PD1. Esta distinção justifica os melhores resultados apresentados pela AHCT para as medidas realizadas sem a consideração do Lift off. Para este caso, grande parte dos parâmetros de resposta da AHCT apresentou uma alta correlação com o carregamento externo. Em especial, a terceira harmônica, além de boa correlação, apresentou uma alta variação de intensidade acima dos 20% do limite de escoamento (Figura 32, configuração D). Variações semelhantes, porém menos acentuadas, foram apresentadas pelas 5ª e 7ª harmônicas. Estes resultados, associados aos resultados obtidos para os parâmetros SAH e K, justificam a utilização desta técnica de simples aplicação para o monitoramento das propriedades estruturais de componentes de Engenharia. Adicionalmente, a técnica permite a medida não destrutiva da permeabilidade magnética do material (H_{co}), parâmetro passível de aplicação em avaliações de controle de qualidade.

Bons resultados também foram apresentados pelas técnicas de AIP e ACP, indicando a aplicabilidade individual para a caracterização das propriedades de materiais de engenharia. Esta constatação indica a utilização de sistemas simplificados para boa parte das aplicações. A simplificação certamente restringe a confiabilidade do método, porém reduz o custo de equipamentos e sistemas de medição – fato este almejado para as aplicações de monitoramento (em larga escala).

Através dos resultados apresentados (5.2, pg. 69) foi possível verificar a influência do encruamento nas propriedades micromagnéticas dos materiais analisados. Foram observados pequenos desvios nos resultados obtidos para as amostras encruadas e recozidas, as quais possuem um estado microestrutural semelhante. Para a AHCT, de maneira geral, pode-se dizer que o encruamento afeta o alinhamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização, reduzindo assim a intensidade dos sinais obtidos. Este efeito é inverso para a AIP,

especialmente para parâmetros como a μ_{\max} e $\mu_{\text{média}}$. Neste caso, o alinhamento favorece os movimentos das paredes de domínio do tipo PD2, que separam domínios com direções de magnetização não paralelas.

A técnica de ACP esta mais relacionada aos fatores elétricos do que magnéticos resultantes da aproximação do material e um campo magnético externo. Neste sentido, através da análise multi-freqüência foi possível distinguir o comportamento de materiais com diferentes condições microestruturais. Parâmetros como Im_1 , Re_2 e Re_3 , além da sensibilidade as variações de carregamentos, apresentaram boa distinção dos estados microestruturais, apresentados curvas em faixas bem distintas de intensidade de sinal. Não faz parte dos objetivos deste trabalho o detalhamento de cada parâmetro micromagnético, contudo, estas explicações visam comprovar a potencialidade da técnica, através das sensibilidades apresentadas pelos diferentes conjuntos de parâmetros.

A sensibilidade do método micromagnético ficou evidenciada na Tabela 9, onde foram apresentados os resultados estatísticos obtidos para as técnicas individuais e combinadas. Para o material encruado, todas as técnicas apresentaram correlação superior à 99%. Isto indica uma forte relação entre os carregamentos e os parâmetros micromagnéticos efetivamente utilizados para a regressão (Equações 19 a 45). O r^2 mede a força da relação, mas uma estatística adicional (o r^2_{aj} - R-quadrado ajustado) é calculada para contar a tendência que induziria o crescimento do r^2 a medida que novos regressores são adicionados. É importante lembrar que nem todos os parâmetros utilizados na regressão apresentaram as melhores correlações individuais com o carregamento. Isto decorre da natureza do processo de regressão multi-linear com seleção progressiva de regressores (utilizado pelo software MMS) onde é escolhido o parâmetro que apresente a maior correlação com a variável dependente e, a seguir, são adicionados os demais parâmetros individualmente, visando sempre o aumento do r^2 e a minimização do erro (MQE). Deste modo, um parâmetro que apresenta uma boa correlação individual, pode não ser favorável à correlação final, quando combinado aos demais parâmetros.

De maneira geral, os resultados mostraram a boa aplicabilidade das técnicas micromagnéticas para a determinação das propriedades mecânicas em componentes de engenharia. Porém, este trabalho objetivou o desenvolvimento de

uma metodologia de análise do estado de tensões da armadura de tração de Risers flexíveis. Para tal, as medidas precisam ser conduzidas com a presença do Lift off.

Neste sentido, os resultados apresentados nas figuras 101 a 106, mostram os avanços obtidos na aplicação da metodologia 3MA (em escala reduzida) para um problema real. Como indicado nos trabalhos de Silva Jr⁵⁷ e Tian⁷⁰ era esperada uma atenuação dos sinais devido a presença do Lift off. Isto foi evidenciado através das figuras 101 a 104. Porém, não eram esperadas perdas tão significativas das correlações entre os parâmetros micromagnéticos e as variações de carregamento externo como as apresentadas na Tabela 10. Estes resultados, aparentemente, inviabilizam a aplicabilidade dos métodos micromagnéticos para as aplicações com a presença de Lift off. Contudo, uma análise mais detalhada destes resultados, fornece uma resposta mais otimista para o problema dos Risers. Primeiramente a Figura 101, além da acentuada atenuação da maioria dos sinais, mostrou que a coercitividade magnética do material (H_{co}) não é afetada pela presença do Lift off. Mesmo não apresentando uma boa relação com a variação de carregamentos, este parâmetro nos diz que o material está sendo magnetizado. Neste sentido, podemos inferir que as respostas à magnetização é que estão sendo afetadas pelo Lift off, em concordância com a White⁵⁸ o qual afirma que o Lift off altera as propriedades do sistema, mas não as propriedades da amostra analisada. Apesar da grande atenuação, bons resultados foram apresentados na Tabela 11, especialmente utilizando-se a técnica de Análise Multi-freqüência das correntes parasitas. Estes resultados não excluem a aplicabilidade das demais técnicas, apenas indicam a boa potencialidade da ACP, para a qual, mesmo utilizando um sensor de escala reduzida, boas correlações foram encontradas entre os resultados e a variação de carregamentos.

As Figuras 105 e 106 apresentam o produto final deste trabalho, onde foi comprovada a aplicabilidade do método 3MA para o monitoramento do estado de tensões de arames da armadura de tração de Risers flexíveis, mesmo com a presença do Lift off.

A pesar das dificuldades encontradas durante a condução do trabalho, os resultados obtidos comprovaram a hipótese básica – apresentando a possibilidade de aplicação dos métodos micromagnéticos para a caracterização do estado de tensões em Risers flexíveis.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram a grande potencialidade das técnicas micromagnéticas para a caracterização não destrutiva do estado de tensões em componentes de engenharia.

Na ausência do Lift off, resultados significativos foram obtidos para as três técnicas utilizadas (Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial, Análise Incremental da Permeabilidade Magnética e Análise Multi-freqüência da Impedância das Correntes Parasitas).

Os resultados mostraram a sensibilidade do método 3MA, onde correlações da ordem de 99% foram alcançadas.

A presença do Lift off resultou numa queda significativa na precisão dos resultados obtidos, contudo, qualitativamente, foi possível separar os estados de carregamento na faixa de aplicação dos Risers flexíveis (de 30 a 50% do limite de escoamento do material) até um afastamento de 7 mm.

Apesar da grande atenuação, bons resultados foram apresentados utilizando-se a técnica de Análise Multi-freqüência da Impedância das correntes parasitas. Estes resultados não excluem a aplicabilidade das demais técnicas, apenas indicam a boa potencialidade da ACP, para a qual, mesmo utilizando um sensor de escala reduzida, boas correlações foram encontradas entre os resultados e a variação de carregamentos.

É possível otimizar o sistema para o problema relativo à falha das armaduras de tração de Risers flexíveis. Deste modo, a queda de intensidade dos sinais tende a ser menos significativa, tornando esta técnica uma ferramenta confiável para os programas de monitoramento e inspeção de componentes em aplicações Offshore.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Das várias perspectivas de continuidade deste trabalho, podem ser destacadas:

- Desenvolvimento de novos sensores, com geometria otimizada para o problema relacionado ao Lift off;
- Desenvolvimento de sistemas robóticos de automação de ensaios, visando a movimentação de sensores e o acesso em áreas restritas;
- Desenvolvimento de novas metodologias de realização do ensaio (inclusive, considerando a aplicação da técnica de análise do Ruído Barkhausen) visando o aumento da confiabilidade das medidas;
- Desenvolvimento de novas metodologias de análise dos resultados (aplicando-se outros modelos de regressão ou modelos de redes neurais) visando o maior aproveitamento das informações obtidas através destas análises;
- Desenvolvimento de tecnologias e equipamentos nacionais e simplificados, especificamente desenvolvidos para estas aplicações – visando suprir a demanda da Petrobras S/A e fortalecer o mercado tecnológico brasileiro;
- Aplicação das técnicas micromagnéticas para a caracterização metal-mecânica de componentes de engenharia.

9 REFERÊNCIAS

- 1) Marinho, M. G., Santos, J. M., Carneval, R. O., “Integrity Assessment and Repair of Flexible Risers”, Proceedings of OMAE2006 – 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburgo, Alemanha, 2006.
- 2) Neto, J. B. O., e Dalla Costa, A. J., “A Petrobras e a exploração de petróleo Off shore no Brasil: um approach evolucionário”, Revista Brasileira de Economia, Vol. 61, N^o. 1, RJ, Jan/Mar. 2007.
- 3) “A importância da Produção em águas profundas”, Extraído de: <http://www.coopetroleo.com.br/pagua01.htm>, Em setembro de 2007.
- 4) Camerini, C., “Inspeção e Monitoração de Dutos Flexíveis”, I Workshop sobre Tecnologias de Ensaios Não Destrutivos”, UFRGS, Porto Alegre, 2006
- 5) Marinho, M. G., et all, “Surface Monitoring Techniques for a Continuous Flexible Riser Integrity Assessment”, Offshore Technology Conference - USA – 2007, OTC - 18946-PP.
- 6) Lemos, Carlos Alberto Duarte de, “Análise de Fadiga em Risers Flexíveis”, Tese de Doutorado, UFRJ, RJ, 2005, 248 p.
- 7) Banke, L., “Flexible Pipe and End Fitting”, Departament of Naval Architecture and OffShore Engineering - Technical University of Denmark - PhD Thesis – 2000, 200 p.
- 8) Out, J. M. M., et all, “The integrity of Flexible pipe: Search for an inspection strategy”, Engineering Structures, Vol.17 N^o. 4, 1996, pp 305 – 314.
- 9) PETROBRAS N-2409 “Flexible Pipe Specification”, Norma Técnica, CONTEC – 1994.
- 10) Rubin, A., Gudme, J., “Qualification of Steel Wire for Flexible Pipes”, 61ST ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION – CORROSION, NACEpo2006, 2006, paper N^o. 06149.
- 11) Carneval, R.O., Marinho, M. G., Santos, J. M., “Flexible Line Inspection”, ECNDT-Poster 106, 9th European NDT Conference (ECNDT), Berlin, Alemanha, 2006.
- 12) Extraída de: http://www.tnpetroleo.com.br/sala_de_aula/tipos_de_plataforma, em setembro de 2008.

-
- 13) Alves, T. M. J., Costa, L. C. S., “Resistência Residual de Linhas Flexíveis com Defeitos Naturais”, 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador - Bahia – BR, 2002.
 - 14) Alves, T. M. J., Costa, L. C. S., “Resistência Residual de Linhas Flexíveis com Defeitos Naturais”, Bol.Téc. PETROBRAS, RJ, 44(1/4): 60-74, jan./dez., 2001.
 - 15) Veith, E., et all, “Inspection of offshore flexible riser with electromagnetic and radiographic techniques”, 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, 2000.
 - 16) Berg, A., Nielsen, N., “Integrity Monitoring of Flexible Risers by Optical Fibres”, OMAE2002-28088, Proceedings of 21st International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Noruega, 2002.
 - 17) Santos, J. M. C., et all, “Desenvolvimento de Ferramentas de Inspeção e Monitoramento para Risers Flexíveis”, II Seminário de Engenharia Submarina, Petrobras, Brasil, 2006.
 - 18) Pipa, D.R. e Pires, G. P., Monitoramento da Torção em Risers Fléxíveis através de Processamento de Imagens, CONAEND&IEV–053, XXVI *Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção*, São Paulo/BR, 2008.
 - 19) API RP 17B, "Recommended Practice for Flexible Pipe", 1988.
 - 20) Hauk, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods” ELSEVIER, 1997.
 - 21) Lu, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses“. SEM, Inc. 1996.
 - 22) Cullity, B.D. “Introduction to Magnetic Materials”, Londres: Addison-Wesley Publishing Company, 1972. 666p.
 - 23) “3MA – II System – User Manual”, Fraunhofer - Institut Nondestructive testing (IZFP), 2007.
 - 24) Gauthier, J., et al “Measurement of Residual Stress in Steel Using the Magnetic Barkhausen Noise Technique”, NDT & International, Vol, 31 (1), 1998, p. 23–31.
 - 25) Jiles, D. “Introduction to Magnetism and Magnetic Materials”, Chapman & Hall, 1996, 403p.
 - 26) Yardley, V.A., “Magnetic Detection of Microstructural Change in Power Plant Steels”, Tese de Doutorado, Universidade de Cambridge, Inglaterra, 2003, 308p.

-
- 27) Carara, M.A., “Dinâmica de Paredes de Domínios Magnéticos: Um Estudo Através da Impedanciometria”, Tese de Doutorado, UFRGS, 2001, 119p.
- 28) Silva Jr., “Determinação de Tensões Residuais em Materiais Ferromagnéticos pelo Efeito Barkhausen”, Dissertação de Mestrado, UFMG, Brasil, 1998, 160p.
- 29) Martins, C. O. D., “Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis para Rolamentos”, Dissertação de Mestrado, PPGEM–UFRGS, 2004, 131p.
- 30) Hauk, V., Höller, P., Macherauch, E., “Measuring Techniques of Residual Stresses–Present Situation and Future Aims” ICRS5, p. 231–242.
- 31) Theiner, W., Kern, R., Stroh, M., “Process – Integrated Nondestructive Testing of Ground and Case Hardened Parts’, PINT NDT – ECNDT, Barcelona, 2002, 5p.
- 32) Kroning, M., “Quantitative NDT with Multiparameter approach - 3MA”, Fraunhofer - Institut Nondestructive testing (IZFP), 2006.
- 33) Buttle, D. J., Thayer, P. J., “Online Stress Measurement in Rolled Strip and Plate by Magnetoelastic Method”, Instrumentation to Innovation - Applications and Developments in Metals Production and Use - Institute of Materials, London, UK (2002).
- 34) Atpeter, I, et all, “Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation”, Inverse Problems, 18 (2002), p. 1907 – 1921.
- 35) Dobmann, G., Meyendorf, N., Schneider, E., “Nondestructive characterization of materials A growing demand for describing damage and service-life-relevant aging processes in plant components”, Nuclear Engineering and Design 171 (1997), p. 95 – 112.
- 36) Dobmann, G., et all, “Industrial Applications of 3MA – Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis”, 5th Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007), Romania, 2007.
- 37) Krause, T.W., et all, “Correlation between magnetic flux leakage and magnetic Barkhausen noise: Stress dependence in pipeline steel”, Journal of magnetism and magnetic materials, vol. 169, 1997, p. 207-219.
- 38) Campos, M. A., Sanchez, J. C., Padovese, L. R., “Ensaio não Destrutivo em Aços Carbono: Análise Harmônica Não Linear e Ruído Magnético Barkhausen”,

CONAEND&IEV-045, XXVI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo/BR, 2008.

39) Saquet, O., “Le bruit Barkhausen: technique d'évaluation non destructive - Barkhausen noise: non destructive evaluation technique”, Techniques de l'ingénieur. Mesures et controle, 1998, vol.RD1, p.1404.1-1404.8.

40) Kwun, H., Burkhardt, G. L., “Electromagnetic Techniques for Residual Stress Measurements Methods of Nondestructive Evaluation”, Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, pp 159 – 162.

41) Willcox, M., Mysak, T., “An Introduction to Barkhausen Noise and Its Applications”, Insight NDT Limited 2000 – 2004, Inglaterra, 2004.

42) Dobmann, G., “Eddy Current and Micro Magnetic On-Line Prediction of Mechanical Properties”, Association of Iron and Steel Engineers: Process Sensors for the Steel Producing Industry. AISE Specialty Conference, USA, 2001, p 12.

43) Blaow, M., Evans, J. T., Shaw, B. A., “Magnetic Barkhausen Noise: The influence of microstructure and deformation in bending”, Acta Materialia 53 (2005), p 279 – 287.

44) Grimberg, R., et all, “Magnetic sensor used for the determination of fatigue state in ferromagnetic steels”, Sensors and Actuators 81, 2000, p 371 – 373.

45) Titto, K., “Use of Barkhausen Effect in Testing for Residual Stresses and Materials Defects”, Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, p. 27–35.

46) Dobmann, G., et all, “Barkhausen Noise Measurements and Related Measurements in Ferromagnetic Materials”, Sensing for Materials Characterization, Processing, and Manufacturing - Volume 1 - Topics on Nondestructive Evaluations Series, 1998, pp 233 – 251.

47) Baldev, R., Jayakumar, T., Vaidyabnathan, S., “Magnetic Barkhausen Emission Analysis for Assessment of Microstructures and Damage”, Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation - Hyderabad – Indian, 2006.

48) Silva Jr. S. F., Alencar, D. A., Neto, M. M., “Variáveis que influenciam os resultados do ensaio de materiais ferromagnéticos pela análise do Ruído Magnético Barkhausen”, COTEQ – 204, 9a COTEQ - Salvador - Bahia – BR, 2007.

-
- 49) Gresta, R. M., Silva Jr., S. F., “Desenvolvimento de um software para otimização de um sistema de ensaio baseado na análise do Ruído Magnético Barkhausen”, COTEQ – 205, 9ª COTEQ – Salvador – Bahia – BR – 2007.
- 50) Magnabosco, R., Grijalba, F. A. F., Padovese, L. R., “Caracterização de Anisotropia de Chapas de Aço Através do Ruído Magnético de Barkhausen”, COTEQ – 157, 9ª COTEQ – Salvador – Bahia – BR – 2007.
- 51) Dobmann, G., Kern, R., “Micro-Magnetic, Multiple - Parameter, Microstructure and Stress Analysis - 3MA – For Non – Destructive Material Properties Determination and Ageing Prediction”, AMES-NDT-Workshop, 1999, Salzburg: Austrian Research Centers, 2000, p. 10.
- 52) Pirlog, M., et all, “Quantitative Non-Destructive Detection of Residual Stresses of the 2nd and 3rd Order by Using Micro Magnetic Methods”, 9th European NDT Conference (ECNDT) Berlin, Alemanha, 2006, p. 9.
- 53) Tönshoff, H.K, Karpuschewski, B., Regent, C., “Process Monitoring in Gridding Using Micromagnetic Techniques”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, p. 694 – 698.
- 54) Martins, C. O. D., Strohaecker, T. R., Rocha, A. S., Hirsch, T. K., “Application of X-ray Diffraction, Micromagnetic and Hole Drilling Methods for Residual Stress Determination in a Ball Bearing Steel Ring”, Journal of Experimental Mechanics, Vol. 45, N°. 4, August 2005, pp 344- 350.
- 55) Maru, M. M., Padovese, L. R., “Inovação em Inspeção de Materiais via Medição do Ruído Magnético de Barkhausen”, XXIV CONAEND&IEV, 2006, SP, Brasil.
- 56) Pérez-Benitez, J.A., Capo-Sanchez, J., Padovese, L.R., “Characterization of angular dependence of macroscopic magnetic properties in ASTM 36 steel using magnetic Barkhausen noise”, NDT&E International 40, 2007, p. 284–288.
- 57) Silva Jr. S. F., Alencar, D. A., Neto, M. M., “Variáveis que influenciam os resultados do ensaio de materiais ferromagnéticos pela análise do ruído magnético Barkhausen”, COTEQ – 204, 9ª COTEQ – Salvador – Bahia – BR – 2007.
- 58) White, S., Krause, T., Clapham, L., “Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements”, Measurement Science and Technology, 18, 2007, p. 3501 – 3510.

-
- 59) Hansen, J., "The eddy current inspection method: Part 1. History and electrical theory", Insight Vol 46 N° 5 May 2004.
- 60) Hansen, J., "The eddy current inspection method: Part 2. The impedance plane and probe", Insight Vol 46 N° 6 June 2004.
- 61) Hansen, J., "The eddy current inspection method: Part 3. Instrumentation and applications", Insight Vol 46 N° 7 July 2004.
- 62) Hansen, J., "The eddy current inspection method: Part 4. Applications, practical testing and advanced concepts", Insight Vol 46 N° 8 August 2004.
- 63) Zergoug, M., Kamel, G., Boucherou, N., "Mechanical Stress Analysis by Eddy Current Method", 9th European NDT Conference (ECNDT), Berlin, Germany, 2006.
- 64) Dybiec, C., Wlodarczyk, S. and Dybiec, M., "Measurement of Own Stress Using the Eddy Current Method", ECNDT, Vol. 3, 1998.
- 65) Zergoug, M., Kamel, G., Boucherou, N., "Mechanical Stress Analysis by Eddy Current Method", The Journal of American Science, 4(4), 2008.
- 66) Extraída de: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/>, em: 06/2008.
- 67) Mook, G., Hesse, O., Uchanin, V., "Deep Penetrating Eddy Currents and Probes", 9th European NDT Conference (ECNDT), Berlin, Germany, 2006.
- 68) Robert, R., "Efeito Pelicular", Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, N° 2, 2000.
- 69) Yashan, A., Becker, R., Dobmann, G., "Non-Destructive Testing and Evaluation of Materials Using Magnetic Sensors: Defect Detection", NDT in Progress, Prague, 2003, p. 297 – 305.
- 70) Tian, G. Y., Sophian, A., "Reduction of Lift off effects for pulsed eddy current NDT", NDT & International 38 (2005), p 319 – 324.
- 71) Abu-Nabah, B. A., Nagy, P. B., "Iterative inversion method for eddy current profiling of near-surface residual stress in surface-treated metals", NDT&E International, 39, 2006, p. 641 – 651.
- 72) Dobmann, G., "Residual Stress Measurement of Components by NDT", Journal of Non Destructive Evaluation, Vol. 21, N° 1, 2001, p. 29 – 37.

10 ANEXO 1 – O MUNDO SEM PETRÓLEO

O mundo sem petróleo

Esta década marca o início do declínio da era do petróleo. Não porque ele vá acabar amanhã, mas porque outras fontes de energia, mais limpas e mais baratas, vão tomar o seu lugar.

Por Flávio Dieguez

Durante praticamente 10 000 anos, desde o início da civilização, a humanidade se contentou em viver consumindo, em média, míseros 20 watts de energia por pessoa – o equivalente, hoje, a manter acesa 24 horas por dia uma lampadinha de árvore de Natal.

Esse estado de contrição só se alterou em 1859 com a perfuração do primeiro poço de petróleo pelo aventureiro americano Edwin Drake, na cidade de Titusville, Estado da Pensilvânia, Estados Unidos. De lá para cá, o mundo passou a esbanjar energia e o consumo per capita cresceu de maneira explosiva. Em poucas décadas, havia alcançado um patamar dezenas de vezes maior que o dos séculos anteriores até atingir a marca atual, de 2 000 watts por pessoa.

O petróleo nos deu isso. Só que, daqui para a frente, vamos ter que nos virar sem ele. Não porque ele vá acabar no futuro próximo – os especialistas garantem que as reservas mundiais são mais do que suficientes para satisfazer as necessidades do planeta por até 75 anos. Mas porque continuar usando o combustível que move a economia mundial com essa voracidade faz mal à saúde da Terra.

"Temos gasolina para queimar à vontade ao longo de todo o século XXI", diz o escritor e pesquisador americano Mark Hertsgaard, da Universidade Johns Hopkins. "Mas, se fizermos isso, também vamos queimar o planeta." Ele se refere, naturalmente, ao aquecimento global provocado pelo gás carbônico e por outros gases lançados na atmosfera pela combustão de derivados de petróleo. "Hoje, o país que mais contribui para o aquecimento global são os Estados Unidos, justamente os mais desenvolvidos", afirma Hertsgaard.

Até as empresas que teriam mais dificuldade para se adaptar a um mundo sem petróleo estão mudando de postura. Há poucos anos, por exemplo,

a indústria automobilística tenderia a descartar a análise de Hertsgaard. Não mais, diz o cientista político americano John Holdren, da Universidade Harvard. "O desafio é imenso, mas há um consenso crescente de que é preciso diminuir a nossa dependência em relação ao petróleo."

A mudança no mundo empresarial tornou-se pública apenas no ano passado, quando duas gigantes do setor, a British Petroleum e a Shell, declararam que estão se preparando para enfrentar os problemas ambientais causados pelo petróleo. E não são as únicas – de acordo com a revista inglesa *The Economist*, empresas como a Exxon "continuam, de público, a ridicularizar o aquecimento global, mas, na surdina, estão investindo pesado em novas tecnologias".

E quais são as alternativas? Tudo indica, atualmente, que o grande sucessor do petróleo é o hidrogênio, o mais simples de todos os elementos químicos e, de longe, o mais abundante no ambiente. Ele poderia ser extraído da água do mar, entre outras possibilidades, para substituir o petróleo com vantagens imensas. Primeiro, por ser uma fonte inesgotável de energia. Segundo, porque "queimar", no dicionário da química, é sinônimo de "combinar com oxigênio". O que gera, de novo, água – único resíduo deixado pela queima do hidrogênio. A energia liberada nesse processo é transformada em eletricidade dentro de um gerador desenvolvido especialmente para esse fim, batizado de célula de combustível. A eletricidade, por sua vez, coloca, por exemplo, um carro em funcionamento. "Acredito que as células de combustível vão, afinal, acabar com o reinado de 100 anos do motor a explosão", afirmou no ano passado o presidente da Ford, Bill Ford.

Atualmente, todos os grandes nomes da indústria automobilística têm protótipos de carros movidos a hidrogênio em estágio avançado de testes. As pioneiras foram a DaimlerChrysler e a Ford. Os investimentos somados das duas, em seus projetos, já estão na casa do bilhão de dólares e o plano é gastar outro tanto para lançar os novos modelos até 2004. E é bom os engenheiros cumprirem o cronograma porque as fabricantes japonesas, apesar de terem largado um pouco atrás nessa corrida, prometem apertar o passo na reta final. Seus carros movidos a hidrogênio podem muito bem chegar às revendedoras antes de 2004.

A Toyota, por exemplo, fez sucesso nas feiras do ano passado exibindo o Prius, que ainda é apenas um híbrido capaz de tirar potência de duas fontes ao mesmo tempo, a gasolina e o hidrogênio. Poucos especialistas acreditam que os híbridos tenham chance de entrar no mercado para valer, no futuro. Apesar disso, o Prius confirma as expectativas positivas criadas anteriormente pelo Necar, nome do carro experimental da DaimlerChrysler. "Uma boa parcela dos 60 milhões de carros que a indústria pretende colocar nas ruas em 2010 funcionará com hidrogênio", diz o analista de inovações tecnológicas americano Robert Winters, da consultoria Bear Sterns.

Dois fatores contribuíram para a ascensão espetacular do hidrogênio como combustível. O mais importante, do ponto de vista tecnológico, foi a possibilidade de comprimir grandes quantidades do elemento dentro de tanques relativamente compactos, que não roubam espaço dos passageiros. É o que acontece, atualmente, com os carros elétricos tradicionais, movidos a bateria. Um sonho, desde o século XIX, eles não conseguem superar o problema do espaço e do peso das baterias, assim como o da demora para recarregar e dar a partida.

Já nos carros a hidrogênio, a ignição é rápida e a célula de combustível alcançou, há dois anos, o tamanho usual dos tanques de gasolina. Para o historiador americano Robert Casey, do Museu Henry Ford, nos Estados Unidos, "as baterias do carro elétrico dificilmente poderão competir, em tamanho, com a célula de combustível". Outro trunfo do hidrogênio é que, embora o motor a explosão tenha passado por uma evolução extraordinária nas últimas três décadas – hoje ele emite 20 vezes menos poluentes do que nos anos 70 –, está ficando difícil aprimorá-lo ainda mais. Isso não significa que o hidrogênio já tenha superado todos os obstáculos: resta, acima de tudo, resolver o desafio da sua produção – não adianta nada encher o tanque dos carros com um combustível perfeitamente limpo se, para produzi-lo, for preciso queimar gasolina ou carvão mineral.

Por enquanto, o hidrogênio empregado nos carros experimentais tem sido obtido de substâncias como o álcool, por meio de reações químicas não muito eficientes. É um meio de empurrar o problema para o futuro, quando se espera descobrir a fórmula ideal – que é extrair o hidrogênio diretamente da água, de preferência com a ajuda de energia solar. Não há pressa, dizem os

especialistas. Até porque o petróleo não sairá de cena tão cedo e haverá tempo e idéias de sobra para pensar num meio simples e eficiente de gerar hidrogênio.

Nesse meio tempo, o petróleo perderia gradualmente terreno – como já vem fazendo há tempos em relação ao gás natural. Trata-se também de um composto de carbono, como o petróleo, e também é extraído do subsolo. A queima do gás natural, porém, gera dez vezes menos poluentes. Assim, desde os anos 70 a parcela do petróleo no consumo global de energia caiu de 60% para 40% enquanto a do gás natural subiu de 10% para 20%.

"Essa parcela tende a crescer outro tanto nos próximos dez ou 15 anos", afirma o geofísico francês Jean Laherrère, consultor de empresas independente. Essa ampliação reduzirá a fatia do petróleo – talvez em até 5%, segundo Laherrère – e a do carvão mineral, que hoje responde por 23% do consumo mundial de energia. É possível que o gás natural também fique com alguns pontos dos 7% que as centrais nucleares detêm atualmente. Aos poucos, as 437 usinas existentes serão desativadas, nos próximos anos, por segurança. O átomo parece ser indomável. Talvez no futuro os tecnólogos aprendam a colocar rédea nesse manancial imenso de potência e força.

Em compensação, o passado ressurge rejuvenescido na forma dos moinhos de vento – agora dotados de imensas hélices metálicas, desenhados de acordo com todos os requintes da aerodinâmica e controlados por computador para maximizar a captação da força do vento. Os moinhos saíram praticamente do zero, em 1970, e têm agora 1,5% do consumo mundial de energia. Não é pouco, se levarmos em conta que sua demanda vem crescendo à taxa de 30% ao ano. Também é preciso considerar que o vento é uma fonte de força instável, que oscila de maneira imprevisível, mesmo onde tem potência suficiente para justificar a instalação de geradores eólicos. Por conseguirem superar todas essas desvantagens e considerando o fato de serem ecologicamente limpíssimos, tudo indica que os moinhos de vento terão muita importância no futuro.

Outra promessa é a energia solar. Com uma fração minúscula no bolo energético (menos de 0,5%), ela também tende a crescer. Apesar de ser muito inconstante e de não ter força ainda para mover carros, o Sol poderá ser usado ao lado das hidrelétricas e termelétricas para gerar eletricidade. Prova disso é o

"satélite-usina" que o Japão pretende lançar ao espaço com o objetivo de coletar luz do Sol e enviá-la para baixo na forma de eletricidade.

Dito isso, só os príncipes árabes – donos de 40% das reservas de petróleo do mundo – duvidam que estamos assistindo ao declínio do ouro negro. Claro, ele não sairá de cena sem que se faça uma complicadíssima reforma econômica. A energia é, sem comparação, a indústria mais importante do planeta, não só porque movimenta perto de 1/5 do Produto Interno Bruto mundial (avaliado em cerca de 40 trilhões de dólares), mas também porque funciona sob controle rigoroso do Estado, seja qual for o país.

Que essa agenda não será fácil de cumprir vê-se pela confusão em que se meteu o Estado americano da Califórnia, justamente onde a transição para as energias limpas está mais avançada, tanto do ponto de vista tecnológico quanto do econômico. Lá, metade da energia elétrica é gerada por gás natural em termelétricas e sua produção foi entregue à iniciativa privada a partir do final dos anos 80. Mas as mudanças foram feitas de maneira apressada. Não se levou em conta, por exemplo, que, por estar em um período de transição, a oferta e a demanda de energia poderiam oscilar de maneira imprevisível.

Como resultado, o Estado foi surpreendido, desde meados do ano passado, por altas repentinas no preço da eletricidade e teve que racionar o consumo para não estourar as contas públicas. Mesmo assim, não pôde evitar uma série de blecaute no início deste ano. A sinuca ficou ainda mais apertada porque as empresas geradoras não se sentiram obrigadas, nos últimos anos, a investir na construção de novas usinas. Assim, a produção de eletricidade estagnou no patamar em que estava há dez anos, apesar de a economia ter crescido 34% no período.

Portanto, a transição do petróleo para novas fontes de energia será tortuosa e pontuada por idas e vindas complicadas. Nos próximos anos, os países pobres, com certeza, vão se tornar um fator de tensão permanente, porque dependem, muito mais do que os ricos, do petróleo para empurrar suas economias. Para ter uma idéia, se, por algum passe de mágica, o consumo dos países em desenvolvimento se igualasse de imediato ao dos desenvolvidos, o consumo mundial de energia ficaria cinco vezes maior da noite para o dia. Portanto, será preciso facilitar o acesso dos países em desenvolvimento às

inovações energéticas por meio de uma maior cooperação internacional. O êxito da saudável conspiração ambiental contra o petróleo depende disso.

Para saber mais

Na livraria: Earth Odyssey, Mark Hertsgaard, Broadway Books, Derry, EUA, 1999

The Electric Vehicle and the Burden of History, David Kirsh, Rutgers University Press, New Brunswick, EUA, 2000

fdieguez@falso.com.br

Os países desenvolvidos consomem, hoje, quase metade de toda a energia que se produz. Como o consumo do resto do mundo tende a crescer, os problemas de abastecimento poderão se agravar muito nas próximas décadas

Endereço desta matéria:

http://www.superinteressante.com.br/superarquivo/2001/conteudo_180282.shtml

1987 - 2008 Editora Abril S.A. Todos os direitos reservados.

11 ANEXO 2 – RESULTADOS PRELIMINARES

Nesta etapa preliminar foram propostas 36 configurações de parâmetros de controle, todas conduzidas com a frequência de magnetização de 200Hz a partir da variação da intensidade do campo magnético aplicado para cada técnica. Estas configurações estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Configurações de parâmetros micromagnéticos utilizadas na análise preliminar.

| | H [A/cm] | | | | H [A/cm] | | |
|----|----------|-----|------|----|----------|-----|------|
| | ACP | AIP | AHCT | | ACP | AIP | AHCT |
| 1 | 15 | 15 | 20 | 19 | 20 | 20 | 30 |
| 2 | 15 | 15 | 25 | 20 | 20 | 20 | 35 |
| 3 | 15 | 15 | 30 | 21 | 20 | 25 | 20 |
| 4 | 15 | 15 | 35 | 22 | 20 | 25 | 25 |
| 5 | 15 | 20 | 20 | 23 | 20 | 25 | 30 |
| 6 | 15 | 20 | 25 | 24 | 20 | 25 | 35 |
| 7 | 15 | 20 | 30 | 25 | 30 | 15 | 20 |
| 8 | 15 | 20 | 35 | 26 | 30 | 15 | 25 |
| 9 | 15 | 25 | 20 | 27 | 30 | 15 | 30 |
| 10 | 15 | 25 | 25 | 28 | 30 | 15 | 35 |
| 11 | 15 | 25 | 30 | 29 | 30 | 20 | 20 |
| 12 | 15 | 25 | 35 | 30 | 30 | 20 | 25 |
| 13 | 20 | 15 | 20 | 31 | 30 | 20 | 30 |
| 14 | 20 | 15 | 25 | 32 | 30 | 20 | 35 |
| 15 | 20 | 15 | 30 | 33 | 30 | 25 | 20 |
| 16 | 20 | 15 | 35 | 34 | 30 | 25 | 25 |
| 17 | 20 | 20 | 20 | 35 | 30 | 25 | 30 |
| 18 | 20 | 20 | 25 | 36 | 30 | 25 | 35 |

As tabelas 13 a 16 apresentam os resultados obtidos para a análise micromagnética (sem a variação de carregamento) utilizando-se as diferentes configurações de parâmetros descritas na Tabela 12. Estes ensaios foram realizados nas amostras encruadas. Após esta análise, foram selecionadas as configurações 4, 8, 12 e 17 (configuração fornecida pelo fabricante do equipamento), as quais passaram a ser chamadas:

Configuração A – Configuração 17 testada na etapa preliminar, apresentando os seguintes parâmetros: $H_{AHCT} = 20$ A/cm, $H_{AIP} = 20$ A/cm, $H_{ACP} = 20$ A/cm.

Configuração B – Configuração 4 testada na etapa preliminar, apresentando os seguintes parâmetros: $H_{AHCT} = 35$ A/cm, $H_{AIP} = 15$ A/cm, $H_{ACP} = 15$ A/cm.

Configuração C – Configuração 8 testada na etapa preliminar, apresentando os seguintes parâmetros: C) $H_{AHCT} = 35$ A/cm, $H_{AIP} = 20$ A/cm, $H_{ACP} = 15$ A/cm.

Configuração 12 testada na etapa preliminar, apresentando os seguintes parâmetros: $H_{AHCT} = 35$ A/cm, $H_{AIP} = 25$ A/cm, $H_{ACP} = 15$ A/cm.

Tabela 14: Resultados preliminares – teste de configuração de parâmetros.

| Configuração | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
|--------------|--------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Parâmetro | Unidade | Média | Média | Média | Média | Média | Média | Média | Média | Média | |
| AHCT | V_{mag} | V | 0,16 | 0,20 | 0,34 | 0,12 | 0,15 | 0,19 | 0,23 | 0,12 | 0,15 |
| | A_3 | A/cm | 0,27 | 0,52 | 3,57 | 0,14 | 0,24 | 0,43 | 0,88 | 0,15 | 0,22 |
| | A_5 | A/cm | 0,04 | 0,08 | 0,86 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,17 | 0,02 | 0,03 |
| | A_7 | A/cm | 0,03 | 0,04 | 0,26 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,01 | 0,02 |
| | P_3 | rad | 0,94 | 1,43 | 2,22 | 0,35 | 0,93 | 1,40 | 1,75 | 0,42 | 0,88 |
| | P_5 | rad | 2,98 | 2,85 | 3,12 | 3,04 | 3,05 | 2,88 | 2,58 | 2,99 | 3,02 |
| | P_7 | rad | 1,29 | 1,66 | 1,68 | 0,82 | 1,22 | 1,63 | 2,03 | 0,87 | 1,15 |
| | SAH | A/cm | 0,35 | 0,65 | 4,83 | 0,18 | 0,30 | 0,54 | 1,12 | 0,19 | 0,28 |
| | K | % | 1,13 | 1,78 | 10,44 | 0,71 | 0,95 | 1,45 | 2,59 | 0,73 | 0,92 |
| | Hco | A/cm | -6,15 | -11,87 | -25,07 | -1,98 | -6,19 | -11,76 | -19,30 | -2,47 | -5,74 |
| Hro | A/cm | -0,26 | -0,54 | -2,70 | -0,06 | -0,22 | -0,45 | -0,83 | -0,07 | -0,20 | |
| AIP | μ_{max} | V | 0,28 | 0,28 | 0,38 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,19 | 0,19 |
| | $\mu_{médio}$ | V | 0,11 | 0,11 | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,07 |
| | μ_r | V | 0,26 | 0,26 | 0,35 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,17 | 0,17 |
| | $\Delta H_{25\mu}$ | A/cm | 4,00 | 3,99 | 5,07 | 3,85 | 3,89 | 3,89 | 3,89 | 3,98 | 3,93 |
| | $\Delta H_{50\mu}$ | A/cm | 40,14 | 40,15 | 40,87 | 23,42 | 23,32 | 23,38 | 23,49 | 31,23 | 31,23 |
| | $\Delta H_{75\mu}$ | A/cm | 29,46 | 29,50 | 30,72 | 17,52 | 17,39 | 17,43 | 17,51 | 22,80 | 22,81 |
| | $H_{c\mu}$ | A/cm | 17,61 | 17,68 | 18,74 | 11,07 | 11,01 | 10,99 | 11,03 | 13,89 | 13,87 |
| ACP | Re_1 | V | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,12 | -0,12 | -0,12 | -0,12 | -0,12 | -0,12 |
| | Im_1 | V | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| | Mag_1 | V | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| | Ph_1 | rad | 2,91 | 2,91 | 2,92 | 2,94 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,95 |
| | Re_2 | V | -0,11 | -0,11 | -0,12 | -0,10 | -0,10 | -0,10 | -0,10 | -0,10 | -0,10 |
| | Im_2 | V | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,09 |
| | Mag_2 | V | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| | Ph_2 | rad | -2,47 | -2,47 | -2,49 | -2,43 | -2,42 | -2,42 | -2,42 | -2,42 | -2,42 |
| | Re_3 | V | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| | Im_3 | V | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,12 | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,13 | -0,13 |
| | Mag_3 | V | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| | Ph_3 | rad | -1,44 | -1,44 | -1,49 | -1,38 | -1,37 | -1,37 | -1,37 | -1,37 | -1,37 |
| | Re_4 | V | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| | Im_4 | V | -0,03 | -0,03 | -0,04 | -0,02 | -0,02 | -0,02 | -0,02 | -0,02 | -0,02 |
| Mag_4 | V | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | |
| Ph_4 | rad | 0,00 | 0,00 | -0,44 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |

