



PREFEITURA DE
CAMPOS

SECRETARIA MUNICIPAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA

 Mais
Ciência

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS CONDUTORES E SUA RELAÇÃO COM A ESTABILIDADE ESTRUTURAL

Orientador: Everton Maick Rangel Pessanha

Bolsista: Samuel Santana Costa

UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ
2022/2023



SUMÁRIO

PLANO DE TRABALHO SUBMETIDO	3
RESUMO	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1. A Ponte de Kelvin	19
2.2. Método de Elementos Finitos	21
2.3. Ferro Fundido Nodular	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Análise de Composição Química do Ferro Fundido Nodular	31
4.2. Análise de Estrutura por Difração de Raios X	33
4.3. Elaboração do Circuito e Simulação	37
4.4. Modelagem pelo Método de Elementos Finitos	42
4.4.1. Pré-Processamento	42
4.4.2. Processamento	43
4.4.3. Pós-Processamento	44
4.5. Elaboração do Protótipo	52
4.6. Dificuldades encontradas na execução do projeto	59
4.7. Relacionamento com a Secretaria de Petróleo, Energia e Inovação..	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6. REFERÊNCIAS	63

PLANO DE TRABALHO SUBMETIDO

- **Título da Etapa:** Pesquisa e estudo bibliográfico.
- **Data de início e Fim:** Agosto/2022 a Julho/2023.
- **Descrição da etapa:** Serão realizadas pesquisas de artigos e livros que darão suporte ao estudo das técnicas de medição de baixa resistência elétrica de materiais metálicos e a relação das propriedades elétricas do ferro nodular com a estabilidade estrutural. O estudo também será pautado na importância da metodologia através da ponte de Kelvin para minimizar os erros de impedâncias dos equipamentos convencionais devido à baixa resistência dos condutores.

- **Título da Etapa:** Aplicação das Equações de Maxwell para a resolução de problemas eletrocinéticos.
- **Data de início e Fim:** Setembro/2022 a Fevereiro/2023.
- **Descrição da etapa:** Estudo teórico que auxiliará na fundamentação sobre a aplicação de Equações de Maxwell para a resolução de problemas eletrocinéticos em condutores metálicos e os métodos de discretização dos domínios.

- **Título da Etapa:** Separação dos corpos de prova
- **Data de início e fim:** Julho/2022 a Setembro/2022.
- **Descrição da Etapa:** Etapa de separação dos corpos de prova e dos materiais para as medidas de propriedades elétricas, incluindo os espécimes para a calibração.

- **Título da Etapa:** Preparação dos corpos de prova.
- **Data de início e fim:** Setembro/2023 a Fevereiro/2023.
- **Descrição da Etapa:** Preparação dos corpos de prova para as medidas com corte, lixamento e polimento com pasta de alumina de distinta granulometria.

- **Título da Etapa:** Curso de modelagem através do *software* FEMM 4.2
- **Data de início e Fim:** Setembro/2022 a Outubro/2022.

- **Descrição da etapa:** Treinamento com oito encontros, uma vez por semana, para conhecer o Método de Elementos Finitos e as potencialidades do *software Finite Element Method Magnetics 4.2*.

- **Título da Etapa:** Designer dos corpos de prova no *software AutoCad*
- **Data de início e Fim:** Outubro/2022 a Novembro/2022.
- **Descrição da etapa:** Os corpos de prova com o formato cilíndrico com as dimensões definidas serão desenhados no *software AutoCad* e em seguida enviados para o *software FEMM 4.2*.

- **Título da Etapa:** Definição do problema elétrico e as condições de contorno
- **Data de início e Fim:** Novembro/2022 a Dezembro/2022.
- **Descrição da etapa:** Com a definição de parâmetros, tais como corrente e frequência, será possível definir o tipo do problema a ser analisado.

- **Título da Etapa:** Modelagem no FEMM 4
- **Data de início e Fim:** Novembro/2022 a Março/2023.
- **Descrição da etapa:** Com os parâmetros inseridos no *software* será possível obter dados importantes tais como o comportamento do fluxo elétrico no condutor e a distribuição do potencial elétrico e do campo elétrico. Estes dados irão complementar as análises de resistividade elétrica no protótipo de instrumentação elétrica.

- **Título da Etapa:** Determinação da composição química
- **Data de início e fim:** Outubro/2022 a Novembro/2022.
- **Descrição da Etapa:** Os corpos de prova selecionados serão enviados ao laboratório de análises químicas na usina SGC para a determinação da composição química por espectrometria de massa e analisador elementar.

- **Título da Etapa:** Elaboração do protótipo de instrumentação elétrica
- **Data de início e Fim:** Outubro/2022 a Março/2023.

- **Descrição da etapa:** Através dos estudos bibliográficos e dos conhecimentos adquiridos no curso de engenharia elétrica, será desenvolvido o projeto do instrumento que tem como finalidade mensurar a baixa resistência elétrica dos corpos de prova de materiais metálicos. Nesta etapa também será elaborado o circuito da ponte de Kelvin utilizando os *softwares* NI Multisim 14.1 e Proteus 8.

- **Título da Etapa:** Testes e calibragem do protótipo desenvolvido
- **Data de início e Fim:** Dezembro/2022 a Fevereiro/2023.
- **Descrição da etapa:** O protótipo será testado quanto ao seu funcionamento e eficiência, utilizando cilindros de alumínio, cobre, carbono puro, aço doce e aço eutetóide.

- **Título da Etapa:** Investigação das propriedades elétricas das amostras de ferros nodulares
- **Data de início e Fim:** Abril/2023 a Junho/2023.
- **Descrição da etapa:** Nesta etapa serão realizadas as medidas de baixa resistência e posterior cálculo de resistividade elétrica em cada um dos corpos de prova nos dois lingotes de ferro nodular (T1/10 min e T8/45 min) e em seguida realizada as análises estatísticas com um nível de confiança de 95% correlacionando com os dados disponíveis na literatura. 16 Projeto de Iniciação Científica UNESA 2022/2023 - D.Sc. Everton Maick Rangel Pessanha

- **Título da Etapa:** Elaboração do circuito lógico programável
- **Data de início e Fim:** Março/2023 a Junho/2023.
- **Descrição da etapa:** Neste período será elaborado o circuito lógico programável com o Arduino para realizar a leitura da baixa resistência e posterior cálculo de resistividade e mostrá-la em um display e comparar com os cálculos realizados manualmente.

- **Título da Etapa:** Desenvolvimento e entrega do relatório parcial
- **Data de início e Fim:** Dezembro/2022 a Fevereiro/2023.
- **Descrição da etapa:** Será elaborado relatório parcial sobre o

desenvolvimento da pesquisa de iniciação científica.

- **Título da Etapa:** Artigo para participação do XXI *Brazilian Materials Research Society*.
- **Data de início e fim:** Março 2023 a Abril/2023.
- **Descrição da Etapa:** Será elaborado o artigo com os dados para a participação no XXI *Brazilian Materials Research Society* que ocorrerá em Setembro de 2023.

- **Título da Etapa:** XI Jornada de Iniciação Científica da UNESA
- **Data de início e fim:** Abril 2023 a junho de 2023.
- **Descrição da Etapa:** Será elaborado o resumo e posterior submissão na XI Jornada de Iniciação Científica a ser realizada no 2º Semestre de 2023 na área de produtos metálicos ferrosos.

- **Título da Etapa:** CONFICT 2023.
- **Data de início e Fim:** Maio/2023 a Junho/2023.
- **Descrição da etapa:** Elaboração e submissão do trabalho no CONFICT 2023.

- **Título da Etapa:** Relatório final das atividades desenvolvidas
- **Data de início e Fim:** Junho/2023 a Julho/2023.
- **Descrição da etapa:** Elaboração do relatório final das atividades de iniciação científica desenvolvidas durante o período de vigência do projeto apresentando os dados obtidos.

RESUMO

O presente projeto de pesquisa tem como objetivo elaborar um protótipo para a caracterização elétrica de novos materiais condutores, bem como analisar de forma sistemática a influência da estrutura nas propriedades elétricas de um lote de ferro fundido nodular (FFN), e, assim, estabelecer os parâmetros necessários na otimização do processo de fabricação. Para tanto, foi utilizado um lote de FFN obtido para o tempo de vazamento de 10 min e 45 min após o tratamento de Nodulização e Pós-inoculação na usina PAM Saint Gobain Canalização (SGC). Para a caracterização elétrica foi elaborado um sistema de medição de baixa resistência elétrica através do método de ponte dupla de Kelvin com a capacidade de mensurar resistências na faixa de $\mu\Omega$ a Ω . A composição química das amostras foi realizada por espectrometria de massa e analisador elementar na usina SGC e também foram analisadas a análise de composição física por difração de raios. A modelagem pelo método de elementos finitos foi realizada através do *software* FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*) para resolver problemas eletrocinéticos. As ligas de FFN hipereutético apresentaram estruturas com predominância da fase ferrítica Fe- α , carbono hexagonal e romboédrico e ainda a cementita (Fe₃C) com a rede que possui baixa simetria. A simulação do dispositivo da ponte de Kelvin utilizando o *software* NI Multisim 14.1 e o Proteus 8.1, bem como a sua construção física vem mostrando a viabilidade do protótipo para a medição da baixa resistência do ferro nodular, e que ainda recebem influência dos constituintes presentes. A partir do problema eletrocinético foi possível estabelecer o comportamento da densidade de corrente e do campo elétrico no corpo de prova analisado e assim articular com os dados de resistividade elétrica determinado com o protótipo construído, bem como auxiliar na tecnologia de fabricação do FFN e na avaliação do comportamento elétrico de novos materiais fabricados e com grande relevância industrial.

1. INTRODUÇÃO

No estudo da instrumentação de medidas de materiais várias técnicas de caracterização são atualmente utilizadas para compreender como a estrutura e as propriedades podem influenciar em sua aplicação. Dentre muitas propriedades da matéria, as propriedades elétricas, principal interesse do presente trabalho de iniciação científica, são estritamente importantes tanto do ponto de vista acadêmico, para a compreensão do comportamento fundamental da matéria, quanto do ponto de vista tecnológico, para a obtenção e caracterização de novos materiais.

As técnicas instrumentais para a caracterização de materiais auxiliam na compreensão dos distintos aspectos relacionados à composição e a estrutura, bem como na produção de novos materiais que estão diretamente ligadas às suas propriedades químicas, mecânicas, ópticas, térmicas, elétricas, magnéticas, entre outras (ZARBIN, 2007).

Existem, atualmente, vários instrumentos e técnicas para a caracterização dos materiais com o objetivo de compreender como a estrutura e as propriedades podem influenciar em sua aplicação e conseqüente redução de custos e de matéria prima para um mundo sustentável.

Neste contexto, a indústria de fundição vem se destacando por possibilitar a fabricação de peças aliado a necessidade de técnicas de análises que possibilitem maior controle do processo para que não interfira na qualidade das propriedades do material produzido, principalmente, por produzir peças com grande variedade de formas e tamanhos, bem como peças de extrema responsabilidade como as que se destinam à indústria aeronáutica, aeroespacial e automobilística (PESSANHA, 2016).

Os Ferros Fundidos Nodulares (FFN), dentre as ligas de ferro fundido, se destacam por possuir menor custo de produção associado as suas boas propriedades. São ligas de Fe-C-Si que se caracterizam por apresentar nódulos de grafita distribuídos sobre a matriz metálica devido ao tratamento de nodulização, com adição de Mg, e pós-inoculação, com adição de Fe-Si75% (SANTOS; BRANCO, 1989; CHIAVERINI, 2012).

Nos materiais condutores que possuem baixa resistência elétrica a resistência dos fios de ligação e a força eletromotriz termoelétrica nos contatos de materiais

diferentes originam erros que podem assumir valores significativos tornando os resultados duvidosos. Portanto, um caminho para fazer a medição é usar a ponte dupla de Kelvin, que permite leitura de valores baixos de resistência elétrica, na faixa de 1Ω a frações de $10^{-3}\Omega$ (CAMPILHO, 2013).

A Ponte Dupla de Kelvin pode ser considerada como uma modificação da ponte de Wheatstone, com a finalidade de assegurar um aumento de exatidão nas medidas de baixas resistências elétricas. Através do método de Kelvin é possível anular de forma algébrica os ruídos, e desta forma realizar os testes. Assim, a principal vantagem no uso deste tipo de ponte é que a influência da resistência dos fios que fazem a ligação pode ser eliminada, o que é importante quando se mede resistências muito baixas (RAMALEY, 1960).

O estudo dos materiais condutores podem se tornar complexos devido às características que cada material possui que impacta diretamente em suas propriedades. Neste sentido, umas das formas de minimizar a complexidade de avaliação das propriedades elétricas e magnéticas dos materiais é a utilização da modelagem numérica, como o Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*, FEM). Este método surgiu no início do século XX, período compatível com os primeiros computadores e foi utilizado por Walter Ritz (1878 - 1909) para determinar inicialmente a solução de problemas em mecânica dos sólidos deformáveis, onde o funcional de energia era aproximado por funções conhecidas com coeficientes a serem estipulados (CAMPOS, 2006).

Para tanto, diante do exposto, o presente trabalho de iniciação científica tem o objetivo de desenvolver o protótipo de Instrumentação Elétrica para medidas de baixa resistência em novos materiais condutores, sobretudo para os ferros nodulares produzidos pela tecnologia de vazamentos prolongados e utilizando sucatas, bem como a utilização do Método de Elementos Finitos para à solução de problemas eletrocinéticos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As pesquisas com novos materiais, principalmente para aplicação na área elétrica,

vêm sendo considerados pelos pesquisadores (PESSANHA; MATLAKHOVA, 2021; PESSANHA *et al.*, 2020; PESSANHA *et al.*, 2019; AULER *et al.*, 2019; PESSANHA *et al.*, 2018; PESSANHA; MATLAKHOVA, 2018; VIDAL, 2017; PESSANHA, 2016; PESSANHA *et al.*, 2016; PESSANHA; MATLAKHOVA, 2015a; PESSANHA; MATLAKHOVA, 2015b; VIDAL, 2013) um dos temas de grande relevância no meio científico e tecnológico. Esta área de pesquisa tem um amplo campo a ser desbravado que incluem alterações de estrutura, propriedades químicas, caracterização mecânica, elétrica e ainda a caracterização magnética do material.

No estudo da instrumentação de medidas de materiais várias técnicas de caracterização são atualmente utilizadas para compreender como a estrutura e as propriedades podem influenciar em sua aplicação. Dentre muitas propriedades da matéria, as propriedades elétricas são estritamente importantes para a compreensão do comportamento fundamental da matéria e para a obtenção e caracterização de novos materiais.

No presente trabalho de iniciação científica é necessário apresentar e conceituar algumas grandezas elétricas de elevado grau de importância para caracterização e aplicação. Dentre estas, a densidade de corrente ($J \rightarrow$) se destaca devido a sua interdependência em relação as características dimensionais e intrínsecas do material a qual está inserida.

Nos materiais cristalinos o elétron choca-se constantemente com a estrutura cristalina e logo uma velocidade média final é alcançada. Esta velocidade v_d é denominada de velocidade de arrastamento (*drift*) e é diretamente proporcional ao campo elétrico $E \rightarrow$ e à mobilidade do elétron μ_e através da Equação 1 (HAYT; BUCK, 2017).

$$v_d = -\mu_e \cdot E \rightarrow \quad (1)$$

O sinal negativo se deve ao deslocamento do elétron no sentido oposto ao campo elétrico aplicado. A mobilidade do elétron, por sua vez, deve ter um valor positivo e tem os seguintes valores típicos, Alumínio equivale a 0,0012 m²/Vs, o Cobre é igual a 0,0032 m²/Vs e a Prata igual a 0,0056 m²/Vs (HAYT; BUCK, 2017).

É importante destacar que quando abordamos a velocidade do elétron nos condutores, estamos nos referindo ao cuidado para que não altere a estrutura do material. Para estes condutores uma velocidade de *drift* de poucos centímetros por segundo pode provocar um aquecimento capaz de fundir o condutor se não for resfriado convenientemente.

A densidade de corrente pode, assim, ser determinada em função da mobilidade dos elétrons que percorre o material condutor, através da relação expressa na Equação 2

$$J \rightarrow = \rho_e \cdot v$$

$$J \rightarrow = \rho_e \cdot v_d = \rho_e \cdot (-\mu_e \cdot E \rightarrow) \quad (2)$$

ou através da Equação 3.

$$J \rightarrow = -\rho_e \mu_e \cdot E \rightarrow \quad (3)$$

onde ρ_e corresponde a densidade volumétrica de carga dos elétrons livres (C/m³).

Através da relação apresentada na Equação 3 pode-se determinar a forma pontual da Lei de Ohm, Equação 4, onde σ corresponde a condutividade do material medida em Siemens por metro (S/m).

$$J \rightarrow = \sigma \cdot E \rightarrow \quad (4)$$

A condutividade, considerada o inverso da resistividade elétrica, ρ , do material, é uma propriedade extremamente importante, principalmente no instante de montagem de um projeto de Engenharia. Pode-se destacar como a condutividade para alguns materiais condutores em Siemens por metro: Alumínio=3,82x10⁷ S/m; Cobre=5,80x10⁷ S/m; Prata = 6,17x10⁷ S/m (HAYT; BUCK, 2017).

Os materiais, em geral, obedecem à lei de Ohm, ou seja, a relação entre $J \rightarrow$ e $E \rightarrow$ é uma constante e a condutividade independe do campo elétrico. Para tanto, os materiais metálicos são isotrópicos, isto é, as propriedades são independentes da direção. Neste

sentido, se considerarmos um cilindro maciço de material condutor, Figura 1, podemos determinar a relação expressa pela Lei de Ohm em que a densidade de corrente seja uniforme ao longo da seção transversal do cilindro.

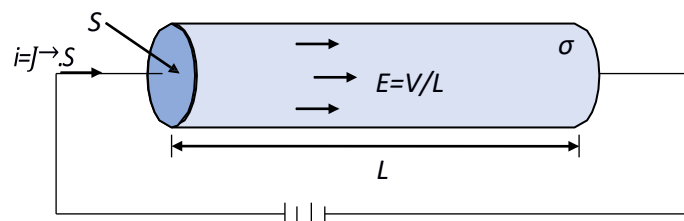


Figura 1. Representação de um cilindro condutor com comprimento L e área da seção transversal S para a dedução da Lei de Ohm (Adaptado HAYT; BUCK, 2017).

Admitindo que \vec{E} seja constante em toda a extensão do cilindro, temos a Equação 5 para determinar a diferença de potencial aplicada no corpo de prova.

$$V_{ab} = - \int_b^a \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

$$V_{ab} = E \cdot L \quad (5)$$

Quando estamos interessados em investigar fenômenos elétricos localizados em um ponto específico da amostra, devemos focalizar não a diferença de potencial e a corrente elétrica neste ponto, mas sim, o campo elétrico e a densidade de corrente elétrica. Em um condutor sujeito à ação de um campo elétrico \vec{E} , os portadores de carga fluem na direção deste campo. Sendo assim, podemos definir a densidade de corrente elétrica nesse condutor como $\vec{J} = i/S$, em que S corresponde a área da seção transversal do condutor como mostra a Figura 1 (HALLIDAY *et al.*, 1993; GIOTTO; SANTOS, 2002).

A partir da relação da densidade de corrente pode-se obter a Equação 6 que expressa a determinação da resistência em função de sua condutividade elétrica.

$$\sigma \cdot E' = \frac{i}{S} \rightarrow \sigma \cdot \frac{V}{L} = \frac{i}{S}$$
$$\frac{V}{i} = \frac{L}{\sigma S} \rightarrow R = \frac{L}{\sigma S} \quad (6)$$

Esta Equação 6 é fundamental no presente trabalho de iniciação científica, pois através desta grandeza pode-se avaliar o comportamento elétrico do ferro fundido nodular e relacionar com as alterações estruturais provenientes do processo de fabricação.

A resistência elétrica, portanto, é uma grandeza física que expressa o “impedimento” sofrido pelos portadores de carga, sujeitos à ação de um campo elétrico, ao atravessarem de um ponto a outro em um determinado “corpo”, sendo dependente das dimensões e do tipo de material do qual este corpo é constituído. A resistividade elétrica, apesar de ser uma grandeza que também está relacionada a um impedimento sofrido pelos portadores de carga, ela representa uma propriedade intrínseca da matéria, sendo independente das dimensões do corpo estudado. Assim, é considerada uma propriedade da matéria (HALLIDAY *et al.*, 1993; GIROTTO; SANTOS, 2002).

Existem alguns métodos para mensurar a resistência elétrica em sólidos, que podem ser agrupados nos métodos destinados às elevadas resistências com grandezas superiores a 1M Ω , os destinados às resistências médias compreendidas entre 1 Ω e 1M Ω e as resistências pequenas, entre 10 $\mu\Omega$ e 1 Ω (ROBBINS; MILLER 2010; MEDEIROS FILHO, 1981).

Deste modo, se for realizada a medição em corpo de provas que foram produzidos com distintos métodos de fabricação ou diferentes parâmetros, tendo como consequências estruturas distintas, teremos diferentes resistividades/condutividades (ANGUS, 1960).

As medidas de elevada resistência é utilizada para determinar as resistências de isolamento dos cabos elétricos, em linhas de transmissão, em dispositivos eletromecânicos de energia, tais como motores e geradores, em transformadores e outros. Os métodos mais empregados para realizar as medidas envolvem o método de

voltímetro, o método de carga do capacitor, e o megaohmímetro a magneto (MEDEIROS FILHO, 1981).

O autor supracitado complementa que para medições de resistências médias, tem-se o método voltímetro e amperímetro, o método ohmímetro a pilha, o método de substituição, e a ponte de wheatstone.

Em medidas de baixa resistência elétrica deve-se considerar a resistência própria dos fios condutores e a resistência de contatos destes fios com os dispositivos elétricos ou eletrônicos envolvidos que podem acarretar em erros, assumindo valores de resistência de mesma ordem de grandeza da resistência que se deseja mensurar (TANABE, 1914; THOMAS, 1948; MEDEIROS FILHO, 1981). Isso é comum ocorrer quando se deseja realizar medidas de resistências muito baixa (CAMPILHO, 2013).

Em geral, os multímetros utilizados em laboratório são adequados para medições de tensões, correntes e resistência superiores a alguns décimos de volt ou décimos de miliampères e o limite teórico da medição dependem do nível de ruído que as resistências introduzem no circuito e ainda através da resistência interna da fonte que gera a tensão ou corrente. Portanto, quando é necessário realizar medidas próximas do limite teórico, devem-se utilizar instrumentos especiais, tais como electrómetro, picoamperímetros ou nanovoltímetros (CAMPILHO, 2013).

Para reduzir as influências indesejáveis, como as correntes elétricas que circulam através das resistências dos contatos e provocam o surgimento de força eletromotriz, os instrumentos são constituídos de um circuito de corrente e um circuito de potencial que devem ser praticamente independentes entre si (THOMAS, 1948; MEDEIROS FILHO, 1981). Assim, estes instrumentos são providos de dois terminais de corrente, denominados de C_1 e C_2 , Figura 2, em que a resistência X , que se deseja determinar, é conectada por meio dos fios condutores b_1 e b_2 .

A Figura 2 mostra ainda os terminais de potencial, denominados de terminais P_1 e P_2 , em que a resistência X é conectada através dos fios condutores a_1 e a_2 .

O diagrama do circuito do instrumento de medidas da Figura 2 mostra uma resistência própria Y que é muito maior do que o máximo valor da resistência X que o instrumento pode medir. Assim, a corrente i é muito menor do que a corrente $I-i$,

podendo assumir que, praticamente, toda corrente I passa através de X (MEDEIROS FILHO, 1981).

Este método é bastante comum e também de simples utilização. Conhecendo-se com precisão as dimensões do material, pode-se realizar uma medida direta de sua resistividade elétrica medindo-se a diferença de potencial e a corrente elétrica que flui através da amostra sob a ação de um campo elétrico dc aplicado (GIROTTI; SANTOS, 2002).

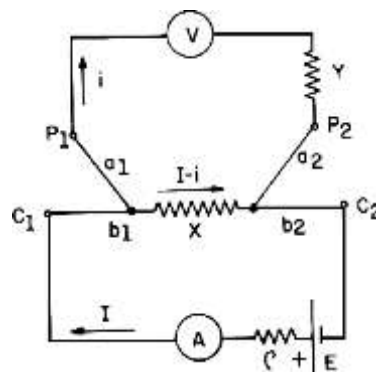


Figura 2. Circuito base para medição de baixa resistência (MEDEIROS FILHO, 1981).

Medeiros Filho (1981) destaca ainda que a inexistência de erros na medição é assegurada quando os condutores a_1 e a_2 estão em série com o circuito potencial e com uma resistência desprezível na frente de Y . Em relação ao circuito de corrente pode-se afirmar que os condutores b_1 e b_2 estão em série ficando excluídos da resistência X durante a medição. Assim, podemos, por exemplo, obter uma corrente que chega a 10 A no circuito com uma fonte de alimentação com tensão de 2 V.

Para a instrumentação elétrica de baixa resistência os métodos mais utilizados de forma prática incluem o método de galvanômetro diferencial, o método de potenciômetro, o método da ponte de Kelvin e o método do Ohmímetro Ducter, que serão abordados nos itens subsequentes, devido o interesse do presente estudo nas medidas de baixa resistência elétrica.

O Método do Potenciômetro consiste em utilizar um potenciômetro para medir a

queda de tensão no resistor por meio de comparação com outro resistor em série, de resistência conhecida. Desta forma, colocam-se os terminais do potenciômetro nos terminais da resistência que se deseja determinar, e posteriormente ao resistor conhecido, compara-se a queda de tensão em ambos para determinar a resistência desconhecida (THOMAS, 1948).

A Figura 3 mostra o esquema básico de funcionamento do método do Potenciômetro. Observa-se entre AB um resistor contínuo com graduações de tensão, de 0 a 2 V, em que o cursor C pode deslizar. Também se verifica uma pilha de operação, E, um galvanômetro com zero central, G, uma pilha padrão com uma força eletromotriz estabelecida, E_p , e uma pilha com uma força eletromotriz que se deseja mensurar, E_x .

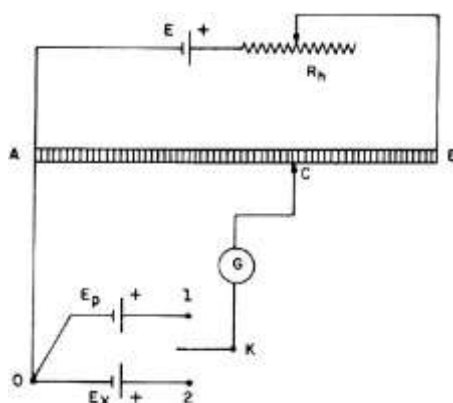


Figura 3. Esquema base do método do Potenciômetro (MEDEIROS FILHO, 1981).

As medidas no instrumento iniciam-se com o ajuste do potenciômetro fazendo com que a queda de tensão de AB seja efetivamente correspondente aos valores que o equipamento identificou. Para tanto, é necessário posicionar o cursor C no valor de E_p . Ao posicionar a chave K no ponto 1 tem-se a atuação no reostato até que o galvanômetro indique zero demonstrando que a tensão de A a C está com a força eletromotriz E_p em equilíbrio e o potenciômetro pronto para ser utilizado. Por outro lado, ao posicionar a chave K no ponto 2, o cursor C será novamente deslizado até que o galvanômetro entre em equilíbrio e marque zero, apontando o valor da força eletromotriz E_x , a partir do valor indicado por C entre os pontos AB do resistor (THOMAS,

1948; MEDEIROS FILHO, 1981).

A corrente I é mensurada através da Equação 7 fazendo-a circular por meio do resistor padrão R_p , de valor conhecido, posicionado no lugar de E_x . O valor obtido através do cursor C no equilíbrio indica o valor de E_I .

$$I = \frac{E_I}{R_p} \quad (7)$$

Medeiros Filho (1981) complementa que para mensurar uma resistência X , pode-se, inicialmente, posicionar esta resistência em série com um resistor padrão R_p seguida da alimentação do conjunto através de uma pilha E_1 , Figura 4 (a, b).

Com o potenciômetro posicionado no circuito, pode-se determinar a força eletromotriz E_r e E_x , respectivamente, através da leitura nos terminais de R_p , Figura 4 (a), e X , Figura 4 (b), através da Equação 8 (TANABE, 1914; MEDEIROS FILHO, 1981).

$$X = \frac{E_x}{E_r} \cdot R_p \quad (8)$$

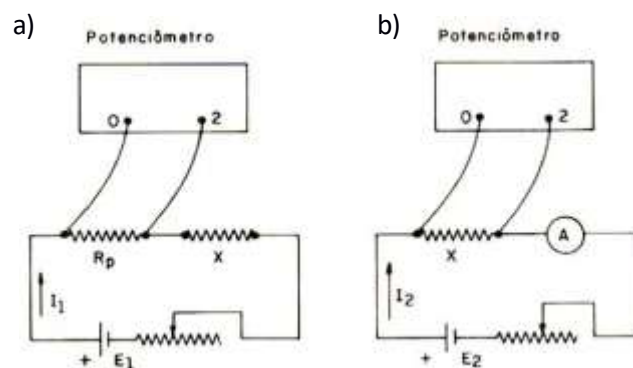


Figura 4. Esquema de posicionamento do potenciômetro no circuito para a leitura R_p (a) e para a leitura X (b) (MEDEIROS FILHO, 1981).

Em seguida, utilizando-se um amperímetro A de boa exatidão, pode-se dispensar a utilização do resistor padrão R_p e seguir a montagem correspondente a Figura 4 (b). O valor de X será, portanto, a razão entre a tensão E_x lida no potenciômetro e a corrente I_2 mensurada no amperímetro, Equação 9 (MEDEIROS FILHO, 1981).

$$X = \frac{E_x}{I_2} \quad (9)$$

A elevada precisão na medição da resistência, segundo Thomas (1948), pode ser obtida se um bom potenciômetro e resistores padrão forem utilizados. Este método tem uma desvantagem em relação à ponte de Wheatstone comum, as correntes através do potenciômetro e no circuito de medição devem ser mantidas constantes, enquanto o equilíbrio de uma ponte de Wheatstone é independente da corrente que flui através dela. O Método do Galvanômetro Diferencial é aplicado com um dispositivo do tipo quocientímetro, que possui uma bobina no centro móvel e dois ímãs fixos, uma das bobinas é alimentada em serie com a resistência que se deseja determinar e outra com um resistor conhecido, consistindo em um divisor de tensão. O circuito possui um resistor variável, que quando é vagarosamente variado, indica a resistência que se deseja mensurar assim que a bobina móvel gira ao ponto que ponteiro acoplado a ela alcance o zero da escala (LOTERO, 2003).

A Figura 5 mostra o esquema básico do princípio de funcionamento do método do Galvanômetro indicado em OA o resistor graduado em submúltiplos do ohm de zero par A e que o cursor C pode se mover de modo deslizante. Observam-se ainda os resistores R_1 e R_2 que possuem elevados valores e iguais entre si. Em contraposição, tem-se as correntes i_1 e i_2 muito pequenas (WENNER, 1940; MEDEIROS FILHO, 1981).

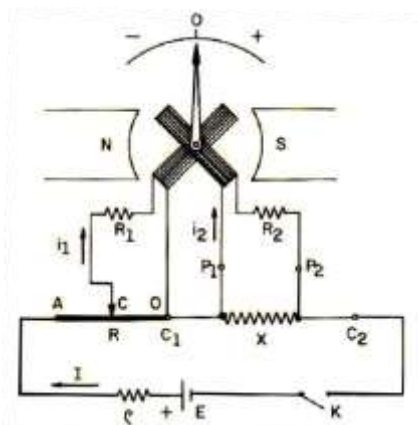


Figura 5 - Esquema base do método do Galvanômetro diferencial.

Para o galvanômetro, as bobinas ficam enroladas em duplicata, e uma pequena bobina móvel é geralmente conectada em série com um enrolamento. Esta bobina móvel é ajustada na posição para compensar qualquer falta de qualidade dos campos produzidos pelos dois enrolamentos (THOMAS, 1948).

As correntes i_1 e i_2 do circuito da Figura 5 podem ser determinadas, respectivamente, de acordo com as Equações 10 e 11, após o fechamento da chave K e com o cursor C numa posição R. A resistência r , por sua vez, indica a resistência própria das bobinas.

$$i_1 = \frac{R' \cdot I}{R_1 + r + R'} \quad (10)$$

$$i_2 = \frac{X \cdot I}{R_2 + r + X} \quad (11)$$

À medida que se desloca o cursor C lentamente, observa-se, segundo Medeiros Filho (1981), que a resistência R é alcançada indicada no ponteiro pelo zero central. Assim, tem-se a igualdade das correntes i_1 e i_2 e, por conseguinte, X é equivalente à resistência R, indicando que se pode determinar a resistência X no cursor C, à partir do resistor AO.

O galvanômetro diferencial do tipo de ímã em movimento tem as mesmas desvantagens que os do tipo de magnetos em movimento, ou seja, pode receber efeitos de perturbações do magnetismo de fontes externas, que devem ser evitadas (THOMAS, 1948; BROOKS, 1962). Para tanto, com a necessidade de uma precisão cada vez maior, o galvanômetro diferencial foi gradativamente descartado, mas ainda é muito satisfatório para alguns tipos de medições (THOMAS, 1948).

2.1. A Ponte de Kelvin

A Ponte Dupla de Kelvin, Figura 6(a), é o método escolhido para o desenvolvimento do presente trabalho, corresponde a uma variação do método da Ponte de Wheatstone, Figura 6(b), e dentre suas vantagens estão à facilidade de

construção, aceita correntes com pequenas instabilidades, rápida manipulação e atende a precisão desejada (TANABE, 1914).

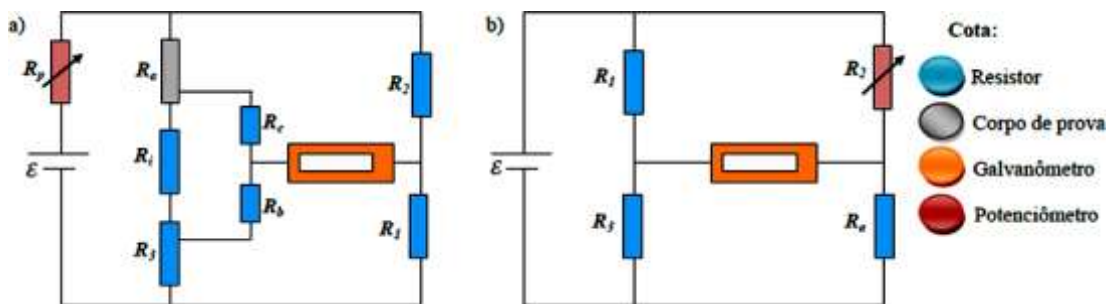


Figura 6. Ponte de Kelvin (a) e Ponte de Wheatstone (b) (Adaptado de CAMPILHO, 2013).

O método da ponte de Kelvin ou ponte de Thomson, devido ao seu criador, agraciado com o título de *Baron Kelvin of Largs* e posteriormente com o título de Lord Kelvin, com o qual ficou mais conhecido, é considerado um dos métodos mais simples e eficientes para medição de baixas resistências (MEDEIROS FILHO, 1981; CAMPILHO, 2013). Em 1961 Lord Kelvin produziu modificações na ponte de Wheatstone para que o valor da corrente no terminal de uma bobina de resistência não ocupasse mais o braço da ponte (TANABE, 1914).

Através da ponte de Kelvin pode-se realizar a medição de baixa resistência e com esse dado e as dimensões do material obter a resistividade pela Lei de Ohm.

Através do método de Kelvin é possível anular de forma algébrica os ruídos, e dessa forma realizar a medição. Como mostrado na Equação 12.

$$R = \frac{\alpha}{R_1} R + \frac{\alpha R_2 R_3}{R_b + R_c + R_i} \quad (12)$$

Se os valores de R_1 , R_2 , R_b e R_c forem tais que $R_2/R_1 = R_c/R_b$ teremos a Equação 13 da forma simplificada da Equação 12.

$$R = \frac{R_2}{R_1} R_3 \quad (13)$$

Assim, a partir dos dados de baixa resistência R_0 determinado é possível obter a resistividade e a condutividade de um material, aplicando a Equação 6, evitando problemas de interferência na instrumentação elétrica para as baixas medidas.

As medidas de resistividade em materiais condutores podem auxiliar, portanto, na identificação da predominância das fases e constituintes presentes, sendo considerado um método sensível para avaliação de ensaio não destrutivo. Ferros fundidos com resistividade de 0,50-0,55 $\mu\Omega \cdot m$, à temperatura ambiente, pode ter uma resistividade que chega a 1,25-1,30 $\mu\Omega$ a 650°C (1200°F). Aumentando a quantidade de elementos químicos, como o silício e a matriz perlítica e ferrítica, também aumenta a resistividade elétrica (BROWN, 2000; JENKINS; FORREST, 2005).

A determinação dos resistores próprios da ponte vai depender do tipo de projeto e são dimensionados pelo fabricante, levando em consideração a corrente máxima que poderão circular em detrimento à fonte de alimentação, sendo comum a utilização de 2 V, com elevada potência e com a corrente total da ordem de 10 A. Assim, as resistências X a serem mensuradas devem suportar correntes desta ordem de grandeza, quanto menores forem (RAMALEY, 1960; MEDEIROS FILHO, 1981)..

Em geral, segundo Medeiros Filho (1981), Tumanski (2006) e Campilho (2013), uma ponte de Kelvin pode fornecer limites de medição que variam de $5,0 \times 10^{-5} \Omega$ a $1,05 \times 10^2 \Omega$. Se considerarmos a relação de entrada R_2/R_1 do circuito da ponte de Kelvin, na Figura 6(a), e a sua relação algébrica expressa pela Equação 13, podemos atribuir que com os multiplicadores 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1 e 10, teremos,

respectivamente, uma corrente total no circuito de 10 A, 6 A, 1,5 A, 0,2 A, 20 mA e 2 mA.

Portanto, quanto menor a relação de entrada, o que equivale a menores resistências R_0 a mensurar, maiores corrente irão suportar, pois as correntes que fluem através de R_1+R_2 e de R_b+R_c são ínfimas, da ordem de poucos miliampères.

2.2. Método de Elementos Finitos

As características de cada material proporcionam alterações peculiares em sua estrutura e conseqüentemente em suas propriedades, o que torna complexo o estudo dos materiais. Assim, umas das formas de minimizar a complexidade de avaliação das propriedades elétricas e magnéticas dos materiais é a utilização da modelagem numérica, como o Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*, FEM). Este método surgiu no início do século XX, período compatível com os primeiros computadores e foi utilizado por Walter Ritz (1878 - 1909) para determinar inicialmente a solução de problemas em mecânica dos sólidos deformáveis, onde o funcional de energia era aproximado por funções conhecidas com coeficientes a serem estipulados (CAMPOS, 2006).

No entanto, Lotti *et al.* (2006) destacam que os fundamentos algébricos do Método de Elementos Finitos tiveram suas origens no final do século XVIII por meio de Gauss, quando propôs a aplicação de funções de aproximação para a deliberação de problemas matemáticos. Por mais de um século teorias e técnicas analíticas foram buscadas para a decisão de problemas físicos, porém devido à limitação no processamento de equações algébricas, a aplicabilidade e sua utilidade se tornaram inviáveis.

Alguns estudos (CARDOSO, 2011; BASTOS; SADOWSKI, 2003; CARDOSO, 1995) apontam que o Método de Elementos Finitos foi desenvolvido para determinar esforços em fuselagens aeronáuticas em meados da década de 1950, mas somente no final da década de 1960 foi aplicado, pela primeira vez, na resolução de problemas eletromagnéticos, sendo amplamente aplicado nesta área a partir de 1970.

Contudo, foi neste período que a Agência Espacial Americana (NASA) desenvolveu um *software* de análise de estruturas denominado NASTRAN (*NASA Structural Analysis*), que implementou a técnica de Elementos Finitos para resolver problemas estruturais. A primeira versão do NASTRAN continha mais de 200 mil linhas de código (MACNEAL, 1974).

Com o passar das décadas o uso de *softwares* de Método de Elementos Finitos passaram a ter posição destaque na área da Engenharia, sobretudo na Engenharia Elétrica, como podemos observar nas quantidades de trabalhos publicados (PESSANHA;

MATLAKHOVA, 2021; PROENÇA, 2019; NOVACKI, 2018; SOUSA, 2016; SALLES, 2008) utilizando o método na simulação de problemas em Motores Elétricos.

Assim, o Método de Elementos Finitos passou a ser bastante utilizado na área do eletromagnetismo através de *softwares* acessíveis e que se encontram à disposição de engenheiros, projetistas e estudantes. A consolidação do Método de Elementos Finitos como um instrumento de trabalho fez com que a evolução e a criatividade na área de dispositivos eletromagnéticos assumissem um novo ímpeto a partir dos anos 80, alcançando uma propagação no meio científico e industrial (BASTOS, 2012; BASTOS; SADOWSKI, 2003; CARDOSO, 1995).

Bastos (2012) destaca ainda que os problemas decorrentes da variação de campos eletromagnéticos são comuns em diversos dispositivos elétricos e magnéticos, como é o caso de capacitores, indutores, ímãs, entre outros. O comportamento destes dispositivos eletromagnéticos depende da distribuição dos campos em seu interior.

Assim, por meios algébricos se podem obter os projetos finais sem a necessidade da construção de inúmeros protótipos. O que pressupõe como vantagem o tratamento de problemas não lineares, como afirma Cardoso (2011), ou seja, problemas em que a propriedade física do meio depende da intensidade do campo magnético o qual está submetido. É justamente o que ocorre com os materiais ferromagnéticos em que a curva de magnetização não é linear. Complementa ainda a flexibilidade do Método de Elementos Finitos na simulação de problemas anisotrópicos, como os encontrados em dispositivos elétricos com ímãs permanentes e em algumas chapas de aço silício de transformadores de grande porte.

O princípio de aplicação do Método de Elementos Finitos consiste, portanto, em subdividir o domínio em estudo em pequenos subdomínios denominados de elementos finitos (CARDOSO, 2011; BASTOS, 2012), ou seja, após a divisão ou discretização de um domínio em um conjunto de elementos no padrão bidimensional triangular, chamado de triângulo de primeira ordem, a solução admissível é construída no elemento usando os valores de solução nos nós, conforme demonstrado na Figura 7, exemplificando um domínio discretizado.

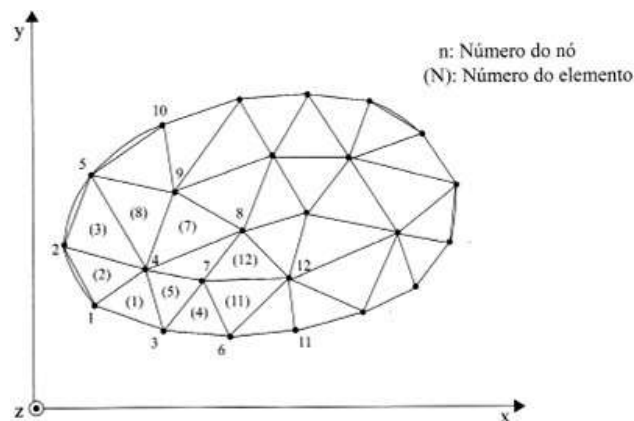


Figura 7. Exemplo de domínio discretizado através de triângulos de primeira ordem (CARDOSO, 2011).

Desta forma, os vértices de cada elemento triangular são nomeados os “nós”, Figura 8, e quando deseja-se determinar uma variável específica, uma vez conhecida nos elementos, obtém-se, através do conjunto, a malha e a grandeza correspondente a mesma.

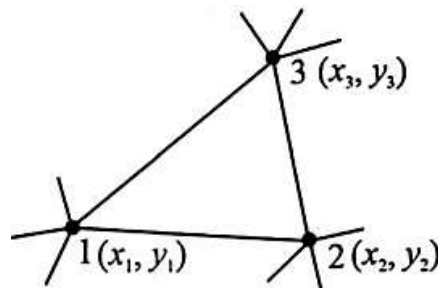


Figura 8. Elemento triangular de primeira ordem (BASTOS, 2012).

Trata-se de um elemento de primeira ordem devido a sua variável interior alterar-se de acordo com a Equação 14 para cada um dos nós.

$$V(x, y) = a + bx + cy \quad (14)$$

A grande parte dos problemas do eletromagnetismo envolve o cálculo das distribuições de campos elétricos/magnéticos ou de potencial elétrico/magnético, em uma determinada localidade no espaço. Geralmente os problemas são matematicamente descritos por pares de onde as equações de “Poisson” e “Laplace” são aplicadas na resolução de problemas da eletrostática (DANILO; GENÚBIO, 2010), expressadas pelas Equações 16 e 18, a partir das Equações 18 e 17.

A Equação 12 se refere aos problemas que envolvem uma distribuição volumétrica de cargas elétricas (ρV) e a Equação 18 é aplicada no caso de cálculo de campos eletrostáticos (HAYT JR; BUCK, 2017).

$$\Delta^2 V = - \frac{\rho V}{\epsilon} \quad (15)$$

$$\Delta^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = - \frac{\rho V}{\epsilon} \quad (16)$$

$$\Delta^2 V = 0 \quad (17)$$

$$\Delta^2 V = \frac{\partial^4 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^4 V}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

Portanto, em inúmeros problemas eletromagnéticos a resolução analítica das equações é uma tarefa não-trivial, ou que necessita de um grande esforço matemático. Como consequência, em geral, tais equações são resolvidas através de métodos numéricos de aproximação como o Método de Elementos Finitos para avaliação do seu comportamento seja elétrico ou magnético (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

2.3. Ferro Fundido Nodular

Existem vários tipos de ferros fundidos, cada qual com suas diferenças estruturais que os permitem ter propriedades distintas, e que estão associados aos seus métodos de fabricação. Dentre os distintos tipos de ferro fundidos, branco, cinzento, maleável,

vermicular e nodular, destacam-se no presente estudo de iniciação científica os ferros fundidos nodulares que apresentam grande ductilidade devido à formação de sua estrutura com grafita em nódulos (GUESSER, 2009; CHIAVERINI, 2012).

O ferro fundido nodular foi descoberto por volta de 1938-1940 de forma independente por Adey, Millis e Morrogh (STEFANESCU, 2005; BAPTÍSTA *et al.*, 2013), mas a comunicação oficial da descoberta dos ferros fundidos nodulares foi efetuada em 07 de maio de 1948, durante a reunião anual da *American Foundryman Society*, na Philadelphia. Nesse congresso Henton Morrogh, de *British Cast Iron Research Association* (BCIRA), apresentou o trabalho relatando a obtenção de ferros fundidos que possuíam grafita na forma esferoidal no estado bruto de fusão.

Desde 1940 os pesquisadores da BCIRA estavam trabalhando com o objetivo de obter grafita nodular em ferros fundidos, morfologia esta que já havia sido observada por aqueles pesquisadores em ligas Ni-C e Co-C. O processo desenvolvido e patenteado baseava-se na adição de cério, pouco antes do vazamento, a banhos de ferro fundido de baixo teor de enxofre, procedendo-se ainda a inoculação com compostos grafitizantes. Na discussão desse trabalho, Thomas H. Winckenden, da *International Nickel Co*, apresentou resultados relativos à obtenção de grafita esferoidal no estado bruto de fusão através da adição de pequenos teores de magnésio (SANTOS; BRANCO, 1989).

O componente estrutural mais importante dos ferros fundidos é a grafita por ser o elemento que determina essencialmente suas propriedades (CHIAVERINI, 2012). A grafita representa cerca de 10% do volume e apresenta quase nenhuma resistência, mas a sua forma ou morfologia, quantidade e distribuição exercem influência significativa sobre as propriedades do ferro fundido (JIYANG, 2009).

A grafita possui estrutura cristalina hexagonal, com seis faces prismáticas e duas compactas no plano basal. Sua estrutura cristalina é ilustrada na Figura 9(a) (JIYANG, 2009; LABRECQUE; GAGNÉ, 1998). Na solidificação, dependendo da velocidade de crescimento na direção do plano basal ou prismático, pode assumir a forma nodular, Figura 9(b), ou lamelar, Figura 9(c), respectivamente (LUX *et al.*, 1974; LABRECQUE; GAGNÉ, 1998).

O plano entre as camadas é denominado de plano basal (0001), o plano

perpendicular ao plano basal é uma face retangular, chamada de prisma ($10\bar{1}0$). A orientação paralela ao plano basal é a orientação cristalográfica $a[10\bar{1}0]$, chamada eixo a , e a orientação perpendicular ao plano basal é a orientação cristalográfica $c[0001]$, eixo c . A distância do átomo no interior da camada (plano basal) é de 0,142 nm e a distância entre as camadas (planos basais) é de 0,335 nm, como destaca a Figura 9 (JIYANG, 2009).

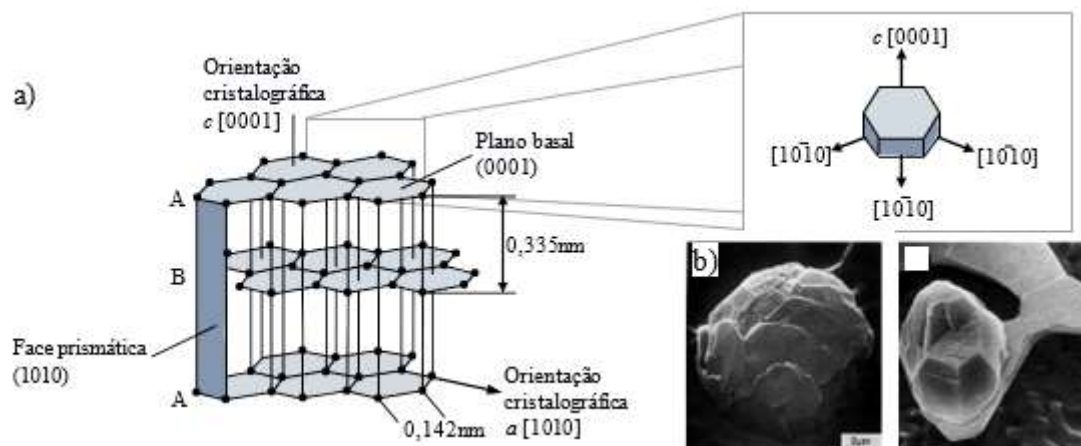


Figura 9. Esquema de representação da estrutura hexagonal da grafita (a) (Adaptado de JIYANG, 2009). O crescimento preferencial na direção do plano basal resulta em grafita nodular (b), como mostra a micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura, e o crescimento na direção da fase prismática produz grafita lamelar (c) (LUX *et al.*, 1974).

No interior de cada camada, segundo Jiyang (2009), os átomos de carbono são acondicionados em hexágono e estão ligados com três vizinhos mais próximos, e possuem uma energia de ligação de 400-500 kJ/mol. As camadas adjacentes são ligadas por uma fraca força atrativa de Van der Waals. A grande diferença nas forças de ligação faz com que ocorra forte anisotropia na grafita.

Deste modo, é fácil de dividir e de deslizar entre as camadas devido a uma ligação muito fraca entre elas. Por conseguinte, a resistência e a dureza no plano basal são acentuadamente mais elevadas do que no plano prismático, enquanto que a resistividade elétrica é oposta, ou seja, a resistividade em planos basal é muito mais baixa do que aquela em planos prismáticos.

Em ligas de Fe-C puras a direção preferida para a grafita se desenvolver é a do plano basal, pois tem baixa energia interfacial com o líquido. O crescimento no plano basal tem como resultado a grafita nodular. No entanto, elementos tensoativos, como enxofre e oxigênio, tendem a ser adsorvidos no plano prismático, reduzindo a sua energia superficial, que atinge menores valores que o plano basal. Assim, tem-se como resultado grafita lamelar (LABRECQUE; GAGNÉ, 1998).

Os ferros fundidos também possuem outros constituintes estruturais importantes como, ferrita (Fe- α), cementita (Fe₃C) e perlita (Fe- α +Fe₃C). Estes constituintes são também encontrados nos aços e por isso costuma-se comparar os ferros fundidos aos aços, chamando-os de aços com grafita em veios. No entanto, os ferros fundidos apresentam propriedades peculiares e distintas das dos aços, pois os veios de grafita constituem uma solução de continuidade na estrutura ou matriz básica do material, ou seja, interrompem a uniformidade ou continuidade dessa matriz (CHIAVERINI, 2012).

Para determinar a resistividade elétrica do material em estudo é necessário obter o valor de sua resistência elétrica com a passagem de corrente no sólido. Existem alguns métodos para mensurar a resistência elétrica em sólidos, dentre eles temos os destinados às elevadas resistências, médias e pequenas. Assim, com os dados de resistividade e também da condutividade elétrica podemos encontrar uma informação inerente ao material (ROBBINS; MILLER 2010). Neste sentido, se for realizada a medição em corpo de provas que foram produzidos com diferentes métodos ou diferentes parâmetros, tendo como consequências estruturas distintas, teremos diferentes resistividades/condutividades (ANGUS, 1976).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 10 mostra as etapas de elaboração do presente trabalho de iniciação científica de instrumentação para a caracterização de materiais metálicos. As etapas foram divididas levando em consideração os tópicos de estudo e o seu desenvolvimento.

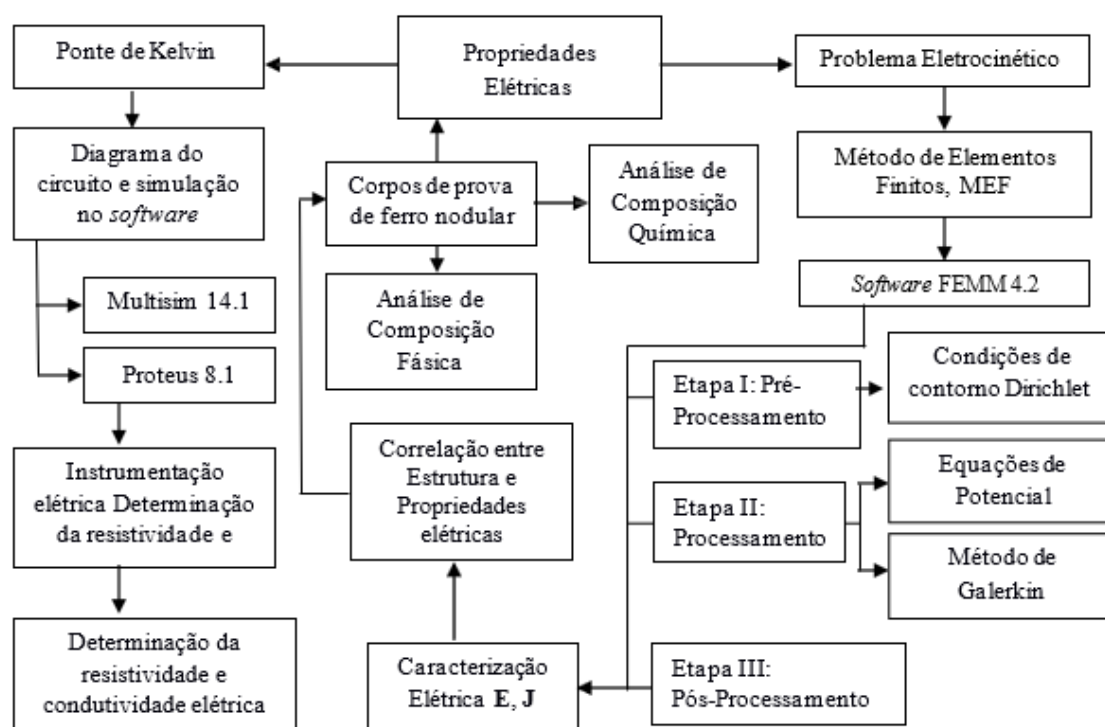


Figura 10. Fluxogramas representando o desenvolvimento do projeto operando em duas vertentes de estudo.

Para as análises foram utilizadas duas ligas de ferro fundido nodular cedidas pelo Laboratório de Materiais Avançados da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LAMAV/UENF) obtidas após 10min a 1362°C e 45min a 1232°C de tratamento de nodulização e pós-inoculação através da técnica de imersão de sino na usina PAM Saint Gobain Canalização - Brazil.

De cada um dos corpos de prova estudados foi retirada uma amostra para análise de composição química no laboratório de análises químicas da usina Saint-Gobain Canalização, Brazil. O equipamento Espectrômetro OES-5500 II analisou automaticamente os elementos químicos Si, Mn, Mg, P, S e Ti contidos na amostra e apresentou no monitor de vídeo os valores percentuais em peso de cada elemento.

Para a análise do teor de carbono utilizando o equipamento LECO, modelo CS-200, um pedaço do material foi triturado no pilão com o auxílio da esfera e soquete. Após a

calibração do equipamento a amostra triturada foi pesada de 0,10 a 0,20 gramas em cadinho de cerâmica com o fundente lecocel e levada para a fusão no equipamento que apresentou em seguida os resultados da análise. A variação foi de $\pm 0,05\%$ para o carbono e $\pm 0,002\%$ para o enxofre.

A análise de composição física para o ferro fundido obtida no tempo de 10 min e 45 min foi realizada por Difração de Raios X (DRX) no difratômetro 7000 Shimadzu disponível no LAMAV/UENF, utilizando a radiação de Cu-K α .

O regime de execução das análises ficou na faixa de ângulo 2θ entre 2° a 90° , onde surgiram picos de maiores intensidades para o ferro fundido nodular, utilizando o passo de varredura Δ de $0,05^\circ$ por 2 segundos. A identificação das fases no presente estudo de iniciação científica foi realizada através da comparação dos dados disponíveis no programa JCPDS-2006.

Na análise por DRX a irradiação da amostra de ferro fundido nodular através dos raios X sofreu difração quando incididos nos planos cristalográficos de sua rede cristalina e interferiram entre si reforçando a amplitude em uma determinada direção. Assim, através do ângulo de difração θ pode ser obtida a distância interplanar d dos planos cristalográficos, por meio da Equação 19 da Lei de Bragg,

$$n.\lambda = 2.d. \text{sen } \theta, \quad (19)$$

onde n corresponde a ordem de reflexão que equivale a 1 e o comprimento de onda λ de 1,54178 Å utilizado durante o experimento.

Os vários elementos que fazem parte da composição física do ferro fundido têm seus efeitos individuais sobre as propriedades elétricas (ANGUS, 1976). Porém, para avaliação dessas propriedades, tais como condutividade e resistividade elétrica, foi desenvolvido um protótipo de instrumentação elétrica.

O funcionamento do protótipo de caracterização elétrica de materiais metálicos consiste em utilizar a ponte de Kelvin para determinar o valor da resistência elétrica do corpo de prova de ferro nodular a partir do equilíbrio da ponte no circuito.

O circuito variador de resistência consiste em conjuntos de resistores posicionados de forma específica para alcançar valores de resistência elétrica nos

parâmetros de $0,1\mu\Omega$ a $1m\Omega$, podendo, então, igualar os valores de resistência entre o corpo de prova e o circuito, fazendo com que a ponte de Kelvin fique em equilíbrio.

Como indicador do equilíbrio da ponte foi utilizado o galvanômetro, dispositivo que mede pequenas variações de corrente, posicionado junto à ponte de Kelvin, que permanece zerado.

Para a elaboração do diagrama do projeto do circuito foi utilizado o *software* NI Multisim 14.1 e o Proteus 8.1, que corresponde a um programa de captura e simulação de esquemas eletrônicos que faz parte de um conjunto de programas de design de circuitos.

A modelagem para avaliar o comportamento elétrico do ferro nodular foi realizada através do método de elementos finitos utilizando o *software* FEMM 4.2, desenvolvido por David Meeker para resolução de problemas eletromagnéticos de baixa frequência em domínios bidimensionais planares e assimétricos (OLIVEIRA; DONSIÓN, 2017; MEEKER, 2015).

O *software* FEMM 4.2 permitiu simular problemas eletrodinâmicos auxiliando na investigação do comportamento elétrico do ferro nodular, tais como a determinação do campo elétrico e da densidade de corrente elétrica e também do corpo de prova de cobre e alumínio, utilizados, na calibração do protótipo de instrumentação elétrica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de Composição Química do Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido nodular hipereutético investigado, com 6 mm \varnothing e 20 mm de comprimento, de 10 min/1362°C e 45 min/1232°C obtidos na usina Saint-Gobain Canalização – Brazil, apresentaram a composição química sensível, quando investigados, a partir do metal base, Tabela 1, ou seja, antes do tratamento. Os dados mostraram que com o acréscimo do inoculante Si em forma de FeSi75%, Tabela 2, ocorreu um aumento em seu teor, quando comparado com o metal base.

Tabela 1. Composição química do metal base para o ferro fundido nodular.

Metal Base (%p.)				
C (3,4-3,7)	Si (2,2-2,8)	Mn ($\leq 0,30$)	P ($\leq 0,80$)	S ($\leq 0,010$)
3,86	2,18	0,21	0,08	0,015

Tabela 2. Composição química do metal tratado para o ferro fundido nodular.

Metal Tratado (%p.)									
Amostras		C	CE	Si	Mn	P	S	Ti	Mg
t min	T °C	3,3-3,7	>4,3	2,2-2,8	$\leq 0,30$	$\leq 0,080$	$\leq 0,01$	$\leq 0,050$	$\geq 0,050$
10	1362	3,65	4,49	2,44	0,20	0,081	0,010	0,02096	0,084
45	1232	3,62	4,46	2,45	0,20	0,081	0,008	0,02178	0,090

Os dados de composição química em % em peso foram plotados de forma gráfica, Figura 11, e mostra a redução do carbono, após o tratamento, devido a sua participação na formação das microconstituintes e ainda a elevação do silício que se manteve equilibrado, após o tratamento de pós-inoculação, funcionando como substratos para a nucleação heterogênea da grafita.

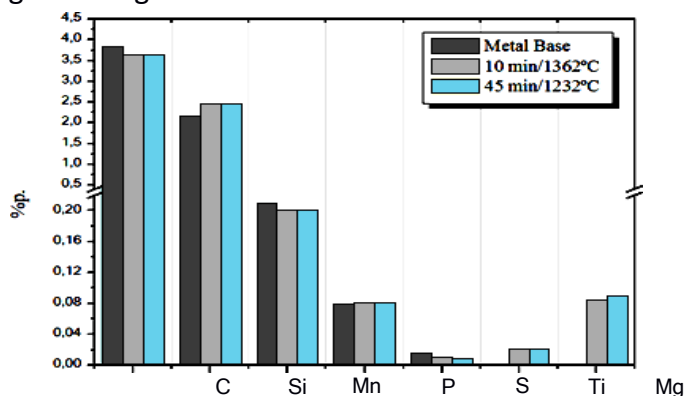


Figura 11. Comportamento dos elementos químicos identificados do metal base e após o tratamento para o tempo de 10 min/1362°C e 45 min/1232°C.

Os teores de silício, portanto, se elevaram em $12,16 \pm 0,23\%$ com o tratamento, em comparação ao metal base com $2,18 \pm 0,04\%$, obtendo o valor de $2,44 \pm 0,04\%$ para o tempo de 10min/1362°C e de $2,45 \pm 0,04\%$ para o tempo de 45min/1232°C. Este aumento foi devido a adição do inoculante FeSi75%.

Com o tratamento de nodulização foi adicionado o magnésio apresentando os teores de $0,084 \pm 0,003\%p.$ (10min/1362°C) e $0,090 \pm 0,003\%p.$ (45min/1232°C), Tabela 1. Com o acréscimo de magnésio houve a redução dos teores de enxofre com $0,081 \pm 0,003\%p.$ para as duas ligas analisadas. Isso ocorreu porque o enxofre possui baixo ponto de ebulição (1090°C) e ao ser inserido em elevada temperatura foi vaporizado atravessando o metal líquido reduzindo os seus teores para a formação da grafita esférica, ou seja, a formação do ferro nodular (PESSANHA, 2016; CHIAVERINI, 2012; BROWN, 2000; SANTOS; BRANCO, 1989).

4.2. Análise de Estrutura por Difração de Raios X

O difratograma para a investigação estrutural para o tempo de vazamento de 10 min pode ser observado na Figura 12(a) com picos característicos com predominância da fase ferrita, com solução sólida a base de Fe- α que possui estrutura Cúbica de Corpo Centrada (CCC) revelados com os planos (110)_{Fe- α} , (200)_{Fe- α} e (211)_{Fe- α} .

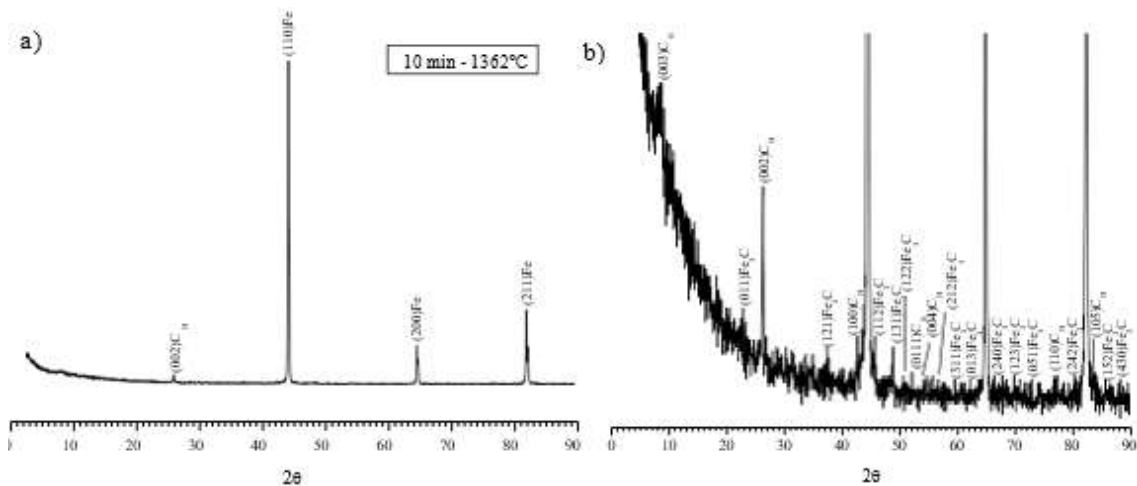


Figura 12. Difração de raios X do ferro fundido nodular para o tempo de vazamento de 10 min a 1362°C (a). Ampliação do difratograma para análise estrutural (b).

Através do difratogramas foi possível ainda identificar o carbono hexagonal (C_H) que possui pico que pertence ao plano $(002)_{C_H}$ com 134 cps de intensidade de picos difratados com a distância interplanar de, aproximadamente, 3,37 Å. Com a ampliação do difratograma para o tempo de vazamento de 10 min (1362°C), Figura 12(b), foi possível identificar a presença de outros planos pertencente ao carbono, tais como os planos $(100)_{C_H}$, $(004)_{C_H}$, $(110)_{C_H}$ e $(105)_{C_H}$ para o carbono hexagonal e $(003)_{C_R}$, $(101)_{C_R}$ e $(0111)_{C_R}$ para o carbono romboédrico.

A Tabela 3 apresenta a identificação para cada plano revelado na análise por difração de raios X. Verifica-se que as maiores intensidades foram identificadas para a fase ferrítica devido a elevada simetria de sua rede cristalina. A fase de cementita (Fe_3C) apresentou baixa intensidade e só foram identificadas a partir da ampliação dos difratogramas da Figura 12(b), pois diferentemente da fase ferrítica a sua rede ortorrômbica possui baixa simetria. Para tanto, os picos para a fase Fe_3C revelados pertencem aos planos $(011)_{Fe_3C}$, $(121)_{Fe_3C}$, $(201)_{Fe_3C}$, $(112)_{Fe_3C}$, $(131)_{Fe_3C}$, $(122)_{Fe_3C}$, $(212)_{Fe_3C}$, $(311)_{Fe_3C}$, $(013)_{Fe_3C}$, $(240)_{Fe_3C}$, $(123)_{Fe_3C}$, $(051)_{Fe_3C}$, $(242)_{Fe_3C}$, $(152)_{Fe_3C}$ e $(430)_{Fe_3C}$.

Os resultados obtidos por difração de raios X no presente trabalho de iniciação científica mostraram, portanto, que o ferro fundido nodular apresenta a fase ferrítica como predominância o que pressupõe para o tempo de 10 min elevada condutividade elétrica para o material investigado e baixa resistividade elétrica.

Tabela 3. Identificação das fases no difratograma de raios X do ferro fundido nodular após 10 min a 1362°C.

Resultados						Identificação e análise			
Nº de picos	Intens./cps	2θ (graus)	d (Å)	hkl	Fase	Intens./cps	2θ (graus)	d (Å)	Referências
1	195	8,53270	10,36264	(003)	C_R	1	8,5807	10,29	OWNBY <i>et al.</i> (1992)
2	66	23,0658	3,855876	(011)	Fe_3C	8	23,6588	3,756	FASIKA; JEFFREY (1965)
3	134	26,4500	3,369703	(002)	C_H	100	26,3462	3,38	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
4	44	37,5392	2,395889	(121)	Fe_3C	326	37,6392	2,388	FASIKA; JEFFREY (1965)
5	50	42,8027	2,112664	(100)	C_H	5	42,6109	2,12	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
6	4274	44,6009	2,031575	(110)	Fe	999	44,6709	2,027	OWEN; YATES (1935)
7	50	45,8477	1,979189	(112)	Fe_3C	506	45,8716	1,977	FASIKA; JEFFREY (1965)

8	44	48,7565	1,8677	(131)	Fe ₃ C	334	48,5922	1,872	FASIKA; JEFFREY (1965)
9	28	50,7917	1,797534	(122)	Fe ₃ C	181	51,8301	1,763	FASIKA; JEFFREY (1965)
10	30	52,2504	1,750734	(0111)	Cr	11	53,0736	1,724	OWNBY <i>et al.</i> (1992)
11	28	54,7461	1,676681	(004)	CH	10	54,2312	1,690	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
12	26	56,7512	1,622111	(212)	Fe ₃ C	51	56,0237	1,640	FASIKA; JEFFREY (1965)
13	26	59,5998	1,8677	(311)	Fe ₃ C	37	59,7588	1,546	FASIKA; JEFFREY (1965)
14	26	62,3009	1,490289	(013)	Fe ₃ C	1	63,1109	1,472	FASIKA; JEFFREY (1965)
15	26	64,1534	1,451658	(200)	Fe	115	65,016	1,433	OWEN; YATES (1935)
16	28	66,5577	1,404937	(240)	Fe ₃ C	39	66,4609	1,406	FASIKA; JEFFREY (1965)
17	26	70,9045	1,329094	(123)	Fe ₃ C	138	70,8378	1,329	FASIKA; JEFFREY (1965)
18	26	73,0927	1,294615	(051)	Fe ₃ C	12	73,1492	1,293	FASIKA; JEFFREY (1965)
19	28	77,0017	1,238355	(110)	CH	18	77,5471	1,23	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
20	28	80,4475	1,193774	(242)	Fe ₃ C	9	80,3583	1,194	FASIKA; JEFFREY (1965)
21	994	82,3546	1,170898	(211)	Fe	174	82,3325	1,170	OWEN; YATES (1935)
22	36	83,1049	1,162222	(105)	CH	9	84,1046	1,150	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
23	26	85,7418	1,133108	(152)	Fe ₃ C	72	85,9759	1,129	FASIKA; JEFFREY (1965)
24	26	88,3993	1,105783	(430)	Fe ₃ C	84	88,1562	1,107	FASIKA; JEFFREY (1965)

A Figura 13(a) mostra o difratograma obtido por difração de raios X para o tempo de vazamento de 45 min após o tratamento na temperatura de 1232°C. Observa-se semelhança dos difratogramas identificados para o tempo de 10 min analisado apresentando pico de elevada intensidade (3778 cps) para a fase ferrítica com o plano (110)_{Fe-α}, como mostra a Tabela 4 e 5.

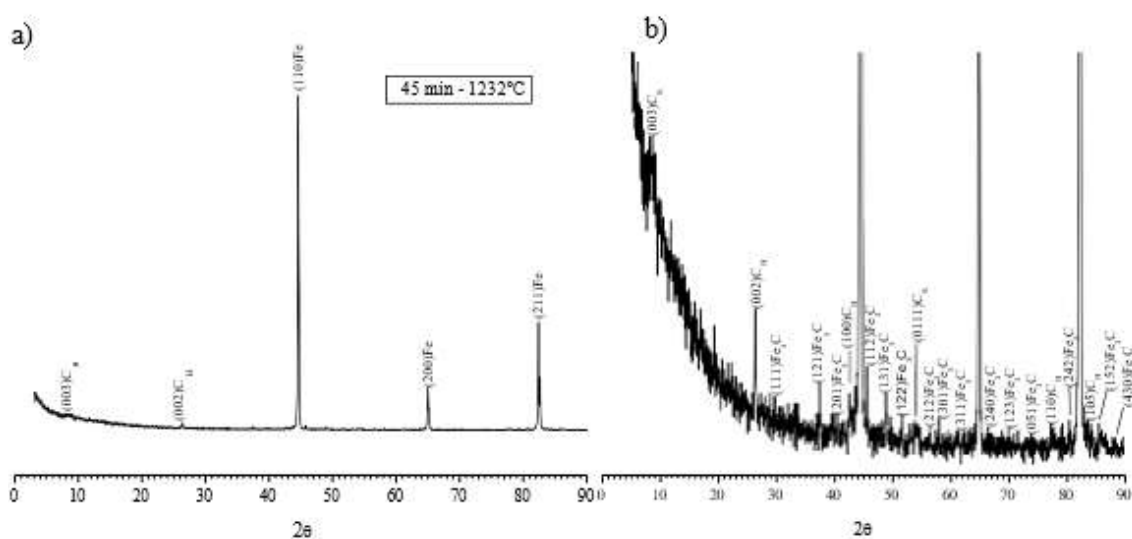


Figura 13. Difração de raios X do ferro fundido nodular para o tempo de vazamento de 45 min a 1232°C

(a). Ampliação do difratograma para análise estrutural (b).

Ainda foi identificado o carbono romboédrico e hexagonal pertencentes, respectivamente, aos planos $(003)_{C_R}$ e $(002)_{C_R}$. A fase Fe_3C continuou sendo identificada apenas para maiores ampliações dos difratogramas devido a baixas intensidades em seus picos. Esta fase, com estrutura a ortorrômbica, se sobrepõe aos picos correspondentes às fases $Fe-\alpha$ e C_H .

Tabela 4. Identificação das fases no difratograma de raios X do ferro fundido nodular após 45 min a 1232 °C.

Resultados						Identificação e análise			
Nº de picos	Intens./ cps	2 θ (graus)	d (Å)	hkl	Fase	Intens./ cps	2 θ (graus)	d (Å)	Referência
1	201	8,6166	10,26193	(003)	C_R	1	8,5807	10,296	OWNBY <i>et al.</i> (1992)
2	99	26,3533	3,381859	(002)	C_H	100	26,3462	3,38	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
3	47	29,6256	3,015346	(111)	Fe_3C	24	29,5252	3,0229	FASIKA; JEFFREY (1965)
4	53	37,3709	2,406288	(121)	Fe_3C	326	37,6392	2,3878	FASIKA; JEFFREY (1965)
5	36	40,3335	2,236115	(201)	Fe_3C	180	40,6409	2,2181	FASIKA; JEFFREY (1965)
6	48	42,7345	2,115878	(100)	C_H	5	42,6109	2,12	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
7	3778	44,5353	2,034415	(110)	Fe	999	44,6709	2,0269	OWEN; YATES (1935)
8	64	45,6971	1,98536	(112)	Fe_3C	506	45,8716	1,9766	FASIKA; JEFFREY (1965)
9	48	48,8339	1,864919	(131)	Fe_3C	334	48,5922	1,8721	FASIKA; JEFFREY (1965)
10	36	51,7965	1,765004	(122)	Fe_3C	181	51,8301	1,7625	FASIKA; JEFFREY (1965)
11	33	53,8296	1,703044	(0111)	C_R	11	53,0736	1,7241	OWNBY <i>et al.</i> (1992)
12	28	56,5985	1,626126	(212)	Fe_3C	51	56,0237	1,6401	FASIKA; JEFFREY (1965)
11	34	58,0701	1,588374	(301)	Fe_3C	148	58,0132	1,5885	FASIKA; JEFFREY (1965)
13	26	59,7354	1,548012	(311)	Fe_3C	37	59,7588	1,5462	FASIKA; JEFFREY (1965)
14	492	64,9828	1,435121	(200)	Fe	115	65,016	1,4333	FASIKA; JEFFREY (1965)
15	28	66,5706	1,404695	(240)	Fe_3C	39	66,4609	1,4056	FASIKA; JEFFREY (1965)
16	28	70,0947	1,342454	(123)	Fe_3C	138	70,8378	1,3291	FASIKA; JEFFREY (1965)

Tabela 5. Continuação da identificação das fases no difratograma de raios X do ferro fundido nodular após 45 min a 1232 °C.

Resultados						Identificação e análise			
Nº de picos	Intens./ cps	2 θ (graus)	d (Å)	hkl	Fase	Intens./ cps	2 θ (graus)	d (Å)	Referência
17	25	73,9673	1,281458	(051)	Fe_3C	12	73,1492	1,2927	FASIKA; JEFFREY (1965)
18	30	77,2978	1,234349	(110)	C_H	18	77,5471	1,23	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
19	32	80,6089	1,19179	(242)	Fe_3C	9	80,3583	1,1939	FASIKA; JEFFREY (1965)
20	1230	82,2547	1,172066	(211)	Fe	174	82,3325	1,1702	OWEN; YATES (1935)
21	32	83,5714	1,156919	(105)	C_H	9	84,1046	1,15	HANAWALT <i>et al.</i> (1938)
22	30	85,6046	1,134572	(152)	Fe_3C	72	85,9759	1,1297	FASIKA; JEFFREY (1965)
23	22	88,3735	1,106039	(430)	Fe_3C	84	88,1562	1,1073	FASIKA; JEFFREY (1965)

4.3. Elaboração do Circuito e Simulação

Para avaliar as propriedades elétricas do ferro fundido nodular foi projetado o diagrama do circuito, Figura 14. No primeiro momento foi realizada uma projeção para verificar a possibilidade de execução do circuito físico. Com o auxílio do *software* Multisim 14.1 foi possível simular o funcionamento do circuito da ponte de Kelvin, conforme e destaque para a ponte de Kelvin fora do equilíbrio na Figura 14(a) e após o equilíbrio, Figura 14(b).

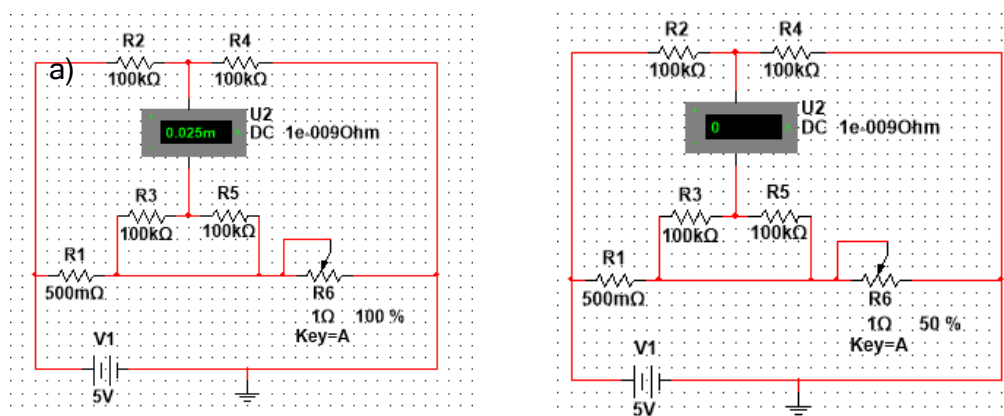


Figura 14. Recorte do diagrama do circuito destacando a ponte de Kelvin em desequilíbrio (a) equilibrada com o galvanômetro zerado (b).

Verifica-se na Figura 14(a) que a ponte se encontra em desequilíbrio, pois o galvanômetro de zero central (U2) possui valor diferente de zero. Por outro lado, na Figura 14(b) é possível identificar que a ponte de Kelvin se encontra em equilíbrio, após permitir a passagem da corrente pela chave D (Key = A) proporcionando a estabilização da ponte com o ponteiro marcando zero central no Galvanômetro, de acordo com o balanço realizado através da Equação 13.

O circuito é composto pelas resistências R2, R4 e R3 e R5, que são denominadas de resistências padrão, uma vez que possuem elevados valores e fixos, com função de limitar a corrente que passa pelo galvanômetro com zero central e ainda permitem

controlar a estabilidade da ponte.

A partir do circuito elaborado no *software*, foi montado o circuito físico, possibilitando avaliar o equilíbrio da ponte de Kelvin projetada. Os resistores em paralelo funcionaram como um potenciômetro a fim de obter uma escala de baixos valores de resistência que se mantiveram em equilíbrio, Figura 15(a). Para verificar a desestabilização da ponte de Kelvin foi retirado um dos resistores em paralelo que altera os valores de equilíbrio da ponte verificando o seu efeito na deflexão do ponteiro do galvanômetro, Figura 15(b).

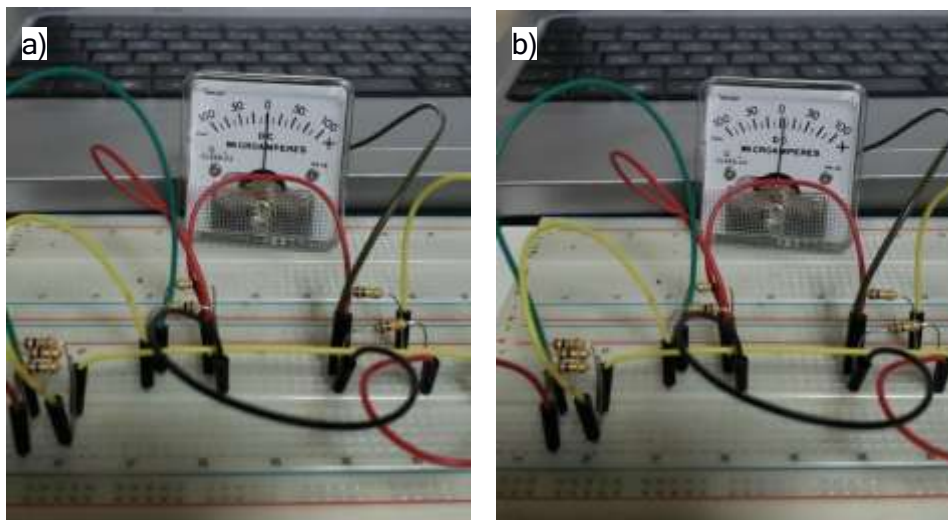


Figura 15. Ponte de Kelvin em equilíbrio montada a partir do diagrama do circuito projetado (a) e a ponte em desequilíbrio (b).

Com o objetivo de determinar a melhor versão possível do projeto e de acelerar o processo de prototipação, foi utilizado o *software* Proteus 8.1, que permitiu trabalhar no circuito eletrônico, desenvolver a trilha de prototipação e ao mesmo tempo elaborar uma vista projetada em 3D, que proporcionou uma perspectiva futura de como será o layout aproximado.

O circuito desenvolvido no Proteus 8.1 manteve as mesmas características do Multisim 14.1, havendo apenas algumas alterações em componentes de manipulação

de energia, tais como, as botoeiras convencionais pelas botoeiras seletoras que teve como finalidade simular o funcionamento dos potenciômetros, e também a reavaliação da escala de medida das trilhas de resistores referente à R6. Tais alterações podem ser analisadas na Figura 16.

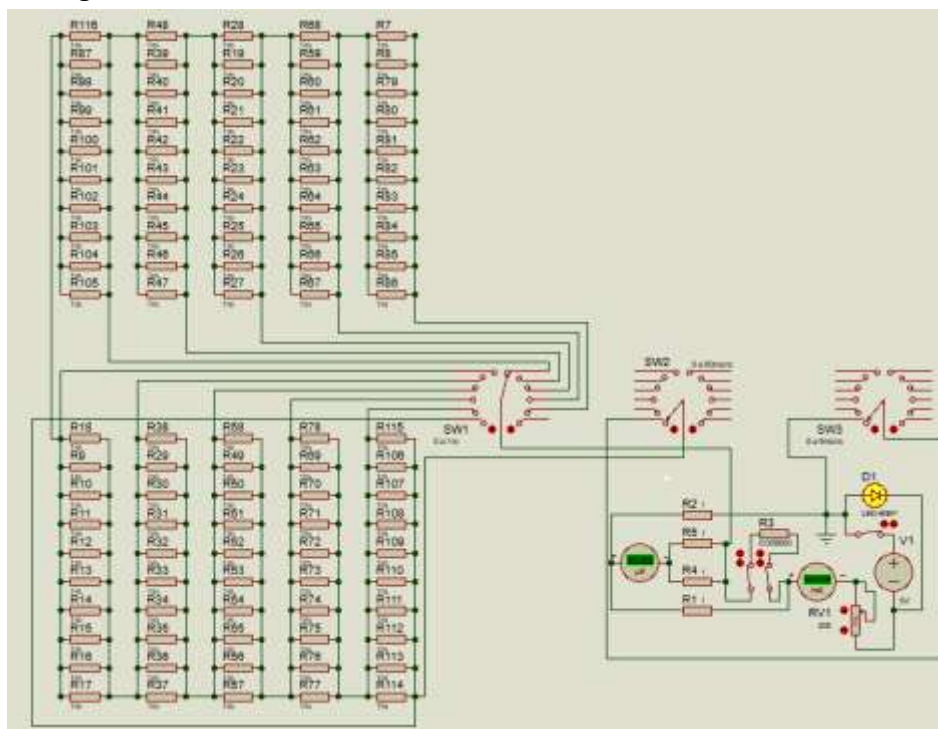


Figura 16. Circuito desenvolvido no Proteus 8.1 com as devidas alterações.

No diagrama do circuito da Figura 17, a escala de medida trabalha nos níveis de $100\mu\Omega$ até $1m\Omega$, variando de $100\mu\Omega$ a cada movimentação da chave seletora, sendo a configuração mais precisa do circuito, se encaixando nos requisitos mínimos de medida para os corpos de prova.

Para alcançar os níveis de $100\mu\Omega$ até $1m\Omega$, foi necessário o desenvolvimento dos bancos de resistores que correspondem ao conjunto constituído por 10 resistores de $1m\Omega$ que foram organizados de modo a trabalharem em paralelismo alcançando uma resistência total de $100\mu\Omega$. Atualmente a faixa de medida do circuito funciona em uma escala de amplitude linear, variando de $100\mu\Omega$, $200\mu\Omega$, $300\mu\Omega$ e assim por diante até $1m\Omega$, totalizando 10 bancos de resistores com $100\mu\Omega$ cada.

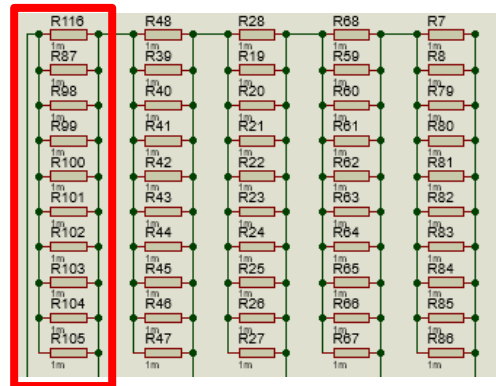


Figura 17. Imagem ampliada com destaque em vermelho para os bancos de resistores.

Para alimentar o circuito foi utilizada uma fonte contínua com uma tensão de 9V e uma corrente de 1,5A, tais valores estabelecidos pensando na utilização do equipamento com uma bateria interna recarregável e também com a opção de plugar na tomada com uma fonte que atende os valores pré-estabelecidos. Assim, já pensando em tais valores de alimentação foram ajustados os resistores R1, R2, R4, R5, R7 e também o acréscimo do resistor R6, pois devido ao alto nível de impedância foi necessário aumentar a tensão da fonte e reorganizar as resistências.

Após avaliar o circuito, foi determinante a utilização de um resistor RV1 (Figura 18) variável na saída da fonte. Como o circuito opera com valores de resistência baixa, seus valores de corrente eram elevados, chegando a alcançar 46A, o que não é aconselhável para a operação de um circuito eletrônico. Assim, foi adicionado o resistor RV1 variável que teve a função de restringir os níveis de corrente na saída da fonte que adentram as trilhas da placa.

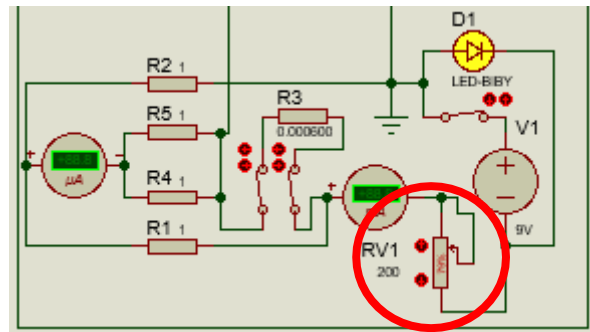


Figura 18. Imagem ampliada para destaque em vermelho para resistor R7.

Ao realizar o acréscimo de RV1 variável, foi necessário a calibração da resistência R1, R2, R4 e R5, pois os mesmos tinham uma resistência de $100\text{k}\Omega$, limitando a corrente que chegava ao galvanômetro tornando-o impreciso para a leitura na escala de micro ohm. Desta forma, as resistências dos mesmos foram atualizadas para 1Ω , como mostra a Figura 19.

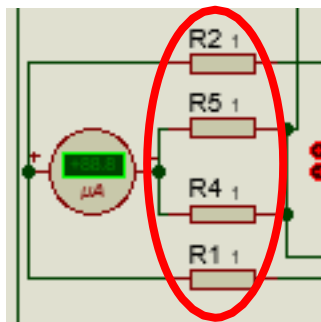


Figura 19. Imagem ampliada para destaque em vermelho para resistor R1, R2, R4 e R5.

O acréscimo do resistor R6, Figura 20, tem como finalidade balancear o circuito já que uma vez que as botoeiras possuem resistência própria atrapalham a leitura do sistema, porém com a escala de medida atual do dispositivo tornou não necessária à utilização do mesmo.

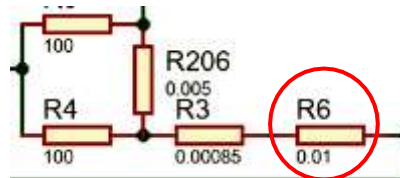


Figura 20. Imagem ampliada para destaque em vermelho para resistor R6.

4.4. Modelagem pelo Método de Elementos Finitos

No desenvolvimento da modelagem aplicando o Método de Elementos Finitos no *software* FEMM (*Finite Element Magnetics Method*) foram obtidos resultados para as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, descritos abaixo.

4.4.1. Pré-Processamento

Previamente foi definida que seria realizada uma análise do problema eletrocinético considerando a densidade de corrente em sua relação infinitesimal, devido à aplicação do potencial. Com a definição da geometria cilíndrica do corpo de prova de ferro nodular, foram então estabelecidas as medidas da seção transversal com o diâmetro de 6 mm, Figura 21(a), e a seção longitudinal com 20 mm de comprimento, Figura 21(b).

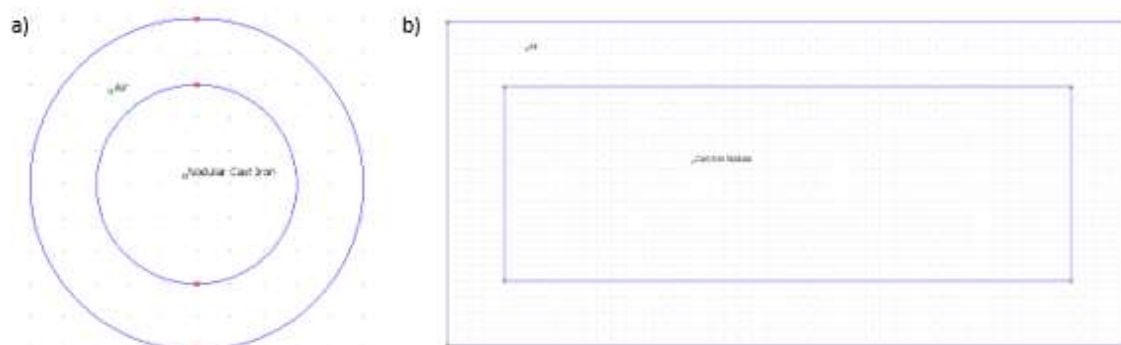


Figura 21. Desenho da Amostra de ferro fundido nodular em sua seção transversal (a) e seção longitudinal do cilindro (b).

Ao redor do corpo de prova foram estabelecidas as condições de contorno

Dirichlet e a região atribuída como ar. Adotou-se a aplicação de um potencial de 14,5 V no corpo de prova analisado. Com as condições de contorno identificadas foram então inseridas as características do material analisado a partir dos dados obtidos no trabalho de Angus (1976), intitulado *Cast Iron Physical and Engineering Properties*. Foi, então, levado em consideração uma resistividade elétrica de $0,508 \mu\Omega.m$ para um ferro nodular ferrítico com a composição química de 3,04% de carbono, 2,40% de silício, 0,25% de manganês, 0,014% de enxofre, 0,022% de fósforo, 0,72% de níquel e 0,055% de magnésio. A partir destas informações foi possível determinar a condutividade do ferro nodular investigado de $1,969 \times 10^6$ S/m. Este valor de condutividade foi inserido no *software* FEMM para calibração do material.

4.4.2. Processamento

A Etapa de Processamento consistiu na geração da malha de elementos finitos triangulares. A Figura 22(a) mostra a malha gerada na seção transversal do corpo de prova e a Figura 22(b) na seção longitudinal. Com o processamento foram gerados 5.576 nós no plano transversal e 3.409 nós no plano longitudinal. Verifica-se que os elementos triangulares estão bem uniformes e divididos de forma infinitesimal, o que mostra uma considerável geração de malha para obtenção dos dados no pós-processamento.

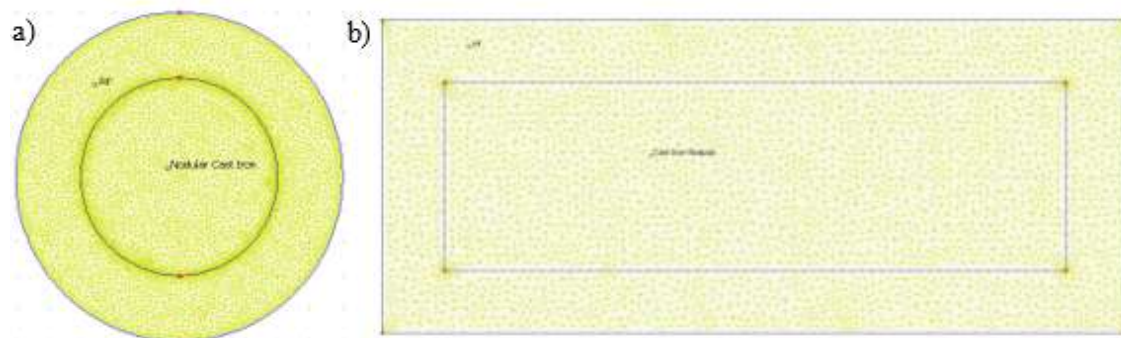


Figura 22. Malha triangular gerada na amostra de ferro fundido nodular em sua seção transversal (a) e seção longitudinal do cilindro (b).

4.4.3. Pós-Processamento

Na Etapa de Pós-Processamento temos o resultado da modelagem através do Método de Elementos Finitos para a amostra de ferro fundido nodular em sua seção transversal, Figura 23(a), e na seção longitudinal, Figura 23(b). Verifica-se o comportamento do potencial na amostra distribuído através do espectro de cores que vai do roxo para elevados potenciais até o azul com o potencial reduzido.

O potencial gerado na seção transversal, onde ficarão as ponteiras na construção física do protótipo, mostra uma boa uniformidade para o potencial devido à concentração de cargas que ficam na superfície desta região maciça.

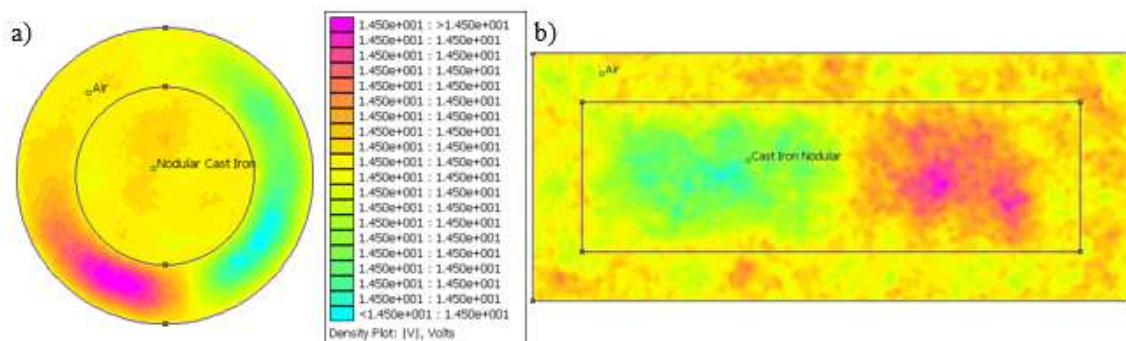


Figura 23. Análise do Potencial gerado com espectro de cores na mostra de ferro fundido nodular em sua seção transversal (a) e seção longitudinal do cilindro (b).

Por outro lado, o potencial ao longo dos 20 mm do corpo de prova apresenta variações. Isso ocorre, sobretudo, em materiais condutores onde a mobilidade eletrônica tendem acelerar as cargas expostas devendo, então, atuar um campo elétrico contrário para reduzir a sua movimentação. É importante destacar ainda que possíveis defeitos e imperfeições presentes poderão contribuir para alterações de movimentação destas cargas.

Além disso, é importante considerar a composição física do material, pois cada fase possui suas características elétricas próprias que interferem como um todo no material investigado.

Através da modelagem por meio do Método de Elementos Finitos também foi possível analisar o comportamento dos vetores de densidade de corrente J na seção

transversal, Figura 24(a), do corpo de prova do ferro nodular e na seção longitudinal, Figura 24(b). Verifica-se a concentração da densidade de corrente no centro do condutor onde recebe a influência do campo elétrico com a passagem de corrente.

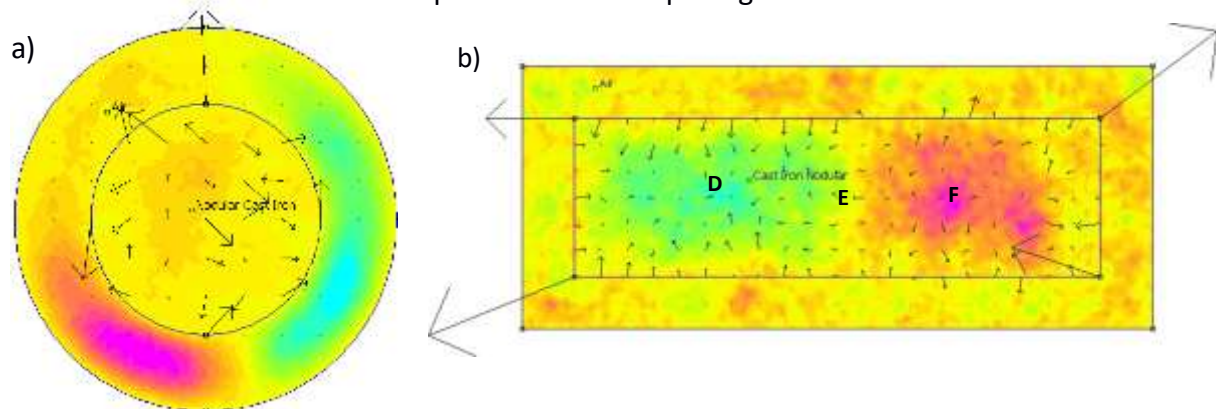


Figura 24. Amostra de ferro fundido nodular com os vetores da densidade de corrente elétrica J em sua seção transversal (a) e seção longitudinal do cilindro (b).

Diante dos resultados foram extraídas grandezas fundamentais para avaliação do comportamento elétrico do ferro nodular avaliado. Os dados obtidos foram separados por regiões da Figura 24(a, b) no corpo de prova na seção transversal, Figura 25(a), com a identificação da Região A, e na seção longitudinal, Figura 26(b), com a identificação da Região D.

a) FEMM

```
Point: x=3.56, y=1.31
V = 14.5+I*1.59278e-015 V
|J| = 1.00851e-019 A/m^2
Jx = -7.54438e-021-I*9.82789e-020 A/m^2
Jy = -1.44063e-020-I*1.57377e-020 A/m^2
|E| = 3.02134e-011 V/m
Ex = -2.94429e-011+I*2.26018e-012 V/m
Ey = -4.71477e-012+I*4.31591e-012 V/m
ex = 1 (rel)
ey = 1 (rel)
ox = 0 S/m
oy = 0 S/m
|Jc| = 0 A/m^2
|Jd| = 1.00851e-019 A/m^2
```

b) FEMM

```
Point: x=5.6, y=3.1
V = 14.5+I*2.316e-029 V
|J| = 8.11135e-007 A/m^2
Jx = 5.77651e-007+I*5.19912e-021 A/m^2
Jy = 5.69438e-007-I*2.95663e-020 A/m^2
|E| = 4.12057e-013 V/m
Ex = 2.93447e-013+I*2.14356e-027 V/m
Ey = 2.89275e-013-I*1.55102e-026 V/m
ex = 1 (rel)
ey = 1 (rel)
ox = 1.9685e+006 S/m
oy = 1.9685e+006 S/m
|Jc| = 8.11135e-007 A/m^2
|Jd| = 1.37542e-021 A/m^2
```

Figura 25. Grandezas obtidas da figura 21 após o processamento na Região A da seção transversal (a) e na Região D seção longitudinal do cilindro (b).

Ainda foram obtidos os dados para as Regiões B e C da Figura 24 (a) que estão expostos, respectivamente, nas Figuras 26 (a) e 27 (a), bem como foram determinadas as grandezas elétricas presentes na Região E, Figura 26 (b), e na Região F, Figura 27 (b) da seção longitudinal do corpo de prova.

a) FEMM

```
Point: x=0.62, y=2.97
V = 14.5-I*4.58268e-023 V
|J| = 4.46355e-005 A/m^2
Jx = 2.88679e-005+I*1.97767e-013 A/m^2
Jy = -3.40437e-005+I*3.11201e-013 A/m^2
|E| = 2.26748e-011 V/m
Ex = 1.46649e-011+I*1.00466e-019 V/m
Ey = -1.72942e-011+I*1.5809e-019 V/m
ex = 1 (rel)
ey = 1 (rel)
ox = 1.9685e+006 S/m
oy = 1.9685e+006 S/m
|Jc| = 4.46355e-005 A/m^2
|Jd| = 7.56875e-020 A/m^2
```

b) FEMM

```
Point: x=4.6, y=7.2
V = 14.5+I*5.90196e-030 V
|J| = 1.01008e-020 A/m^2
Jx = 1.26349e-035-I*1.79521e-021 A/m^2
Jy = 1.94964e-036+I*9.94004e-021 A/m^2
|E| = 3.02428e-012 V/m
Ex = -5.37502e-013-I*3.783e-027 V/m
Ey = 2.97613e-012-I*5.83738e-028 V/m
ex = 1.00059 (rel)
ey = 1.00059 (rel)
ox = 0 S/m
oy = 0 S/m
|Jc| = 0 A/m^2
|Jd| = 1.01008e-020 A/m^2
```

Figura 26. Grandezas obtidas da figura 24 após o processamento na Região B da seção transversal (a) e na Região E seção longitudinal do cilindro (b).

a) FEMM

```
Point: x=-1.96, y=-0.46
V = 14.5-I*4.50681e-015 V
|J| = 1.7017e-019 A/m^2
Jx = 1.53362e-020-I*1.34937e-019 A/m^2
Jy = -1.01883e-020-I*1.02034e-019 A/m^2
|E| = 5.09803e-011 V/m
Ex = -4.0425e-011-I*4.59451e-012 V/m
Ey = -3.05677e-011+I*3.05226e-012 V/m
ex = 1 (rel)
ey = 1 (rel)
ox = 0 S/m
oy = 0 S/m
|Jc| = 0 A/m^2
|Jd| = 1.7017e-019 A/m^2
```

b) FEMM

```
Point: x=14.3, y=2.8
V = 14.5-I*1.00449e-028 V
|J| = 2.3341e-005 A/m^2
Jx = -1.99674e-005-I*4.19491e-020 A/m^2
Jy = 1.20874e-005+I*4.77766e-020 A/m^2
|E| = 1.18572e-011 V/m
Ex = -1.01434e-011-I*4.11013e-027 V/m
Ey = 6.14038e-012+I*1.38584e-026 V/m
ex = 1 (rel)
ey = 1 (rel)
ox = 1.9685e+006 S/m
oy = 1.9685e+006 S/m
|Jc| = 2.3341e-005 A/m^2
|Jd| = 3.95788e-020 A/m^2
```

Figura 27. Grandezas obtidas da figura 21 após o processamento na Região C da seção transversal (a) e na Região F seção longitudinal do cilindro (b).

Com esses dados, foi possível compreender o comportamento do material ao ser exposto a uma tensão e corrente, de maneira a contribuir com o processo de investigação do material e desenvolvimento do protótipo de medidas.

O módulo do campo elétrico na seção transversal foi determinado em, aproximadamente, $2,27 \times 10^{-11}$ V/m com uma densidade de corrente de $4,46 \times 10^{-5}$ A/m² que presumi uma corrente de $1,0 \times 10^{-9}$ A passando na área de $2,29 \times 10^{-5}$ m². Este dado nos mostra que a ponte de Kelvin é fundamental para que se deseje medir a baixa resistência do ferro nodular com a em circulação da corrente.

Após a primeira análise, foi realizada uma investigação utilizando os dados obtidos, com a finalidade de aprimorar o entendimento do comportamento do material submetido a tensão elétrica desejada. A partir das informações obtidas, alterou-se então a metodologia anteriormente utilizada para configurar a tensão e corrente sob os quais o material seria submetido.

Desta vez foi configurada a tensão nas propriedades de condutor e incluindo a diferença de potencial elétrica obtida através do simulador *Multisim* para a seção longitudinal de $V = 201 \mu\text{V}$ e para a seção transversal de $V = 6,527 \mu\text{V}$, levando em consideração também a tensão que será utilizada no modelo físico de $V = 9\text{V}$, ou seja, a tensão real que chega no corpo de prova, além da corrente medida no simulador de $I = 317,179$ mA.

Foram incluídos também quatro nós, referentes às posições onde as respectivas pontas de prova tocariam o material. Realizadas as modificações pode-se observar os resultados nas Figuras 28(a, b).

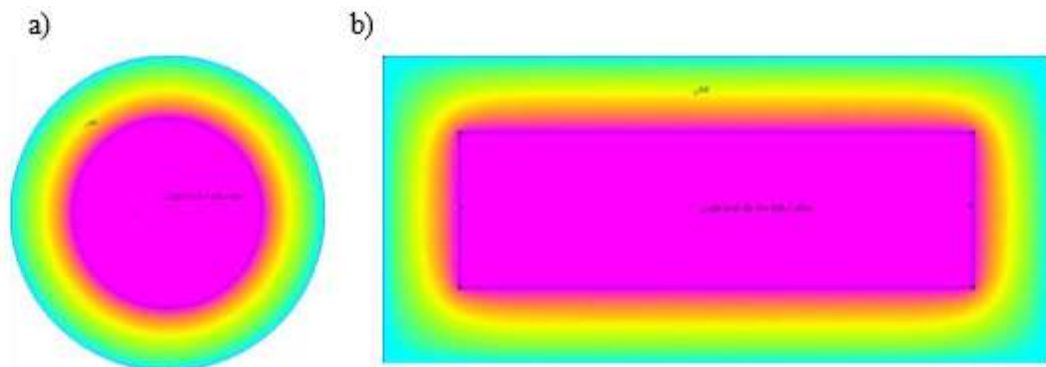


Figura 28. Comportamento da nova tensão elétrica sobre a secção transversal (a) e longitudinal (b).

Para esta análise adotou-se o valor máximo de resistividade elétrica retirada de $\rho = 0,90 \mu\Omega \cdot m$ (ANGUS, 1976) cujo valor resultou numa resistência da secção longitudinal de $636,7 \mu\Omega$. A representação na Figura 28 demonstra o comportamento da tensão elétrica (V), sendo descrita pela mesma escala de cores apresentada na Figura 23, onde a intensidade da tensão sobre a superfície do material se mantém praticamente inalterada longitudinalmente e transversalmente, devido à natureza condutora de baixíssima resistência do ferro.

Desta forma, a queda de tensão no material é muito reduzida, levando a uma uniformidade da coloração na superfície e interior do material, que exhibe uma queda de tensão visual apenas quando se observa a camada de ar ao seu redor.

Pode-se também adicionar vetores à visualização e alterar as cores para representar diferentes grandezas desejáveis, a Figura 29 (a, b) demonstra uma escala de cores, juntamente com vetores, que representam o comportamento da densidade de corrente (J) e sua direção e sentido.

Observa-se que não é possível visualizar com muita precisão a densidade de corrente na escala de cores na Figura 29(b), isso se deve à baixa corrente de trabalho. Na Figura 29(a) é visível a corrente se originando dos nós referentes às pontas de prova, e através dos vetores de representação nota-se o sentido da corrente saindo destes pontos, bem como na Figura 29(b), percebe-se os vetores apontando em direção ao outro lado do corpo de prova, onde se encontram as pontas de prova negativas.

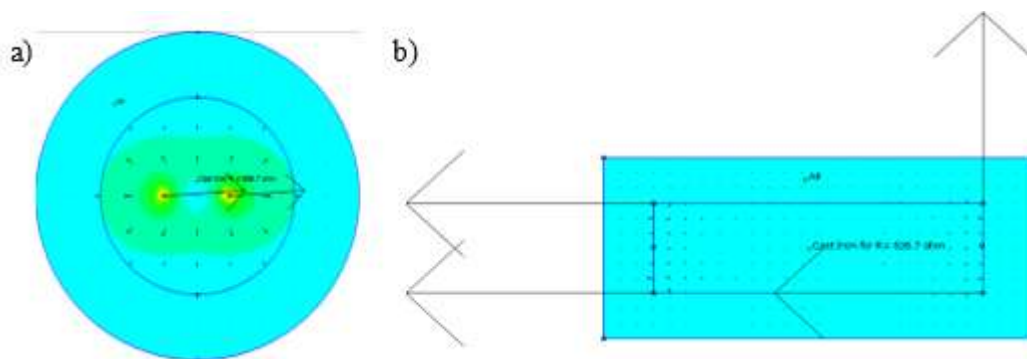


Figura 29. Comportamento vetorial da densidade de corrente sobre a secção transversal (a) e longitudinal (b).

Podemos destacar ainda o comportamento do campo elétrico E , onde alterna-se a escala de cores resultando na Figura 30(a, b).

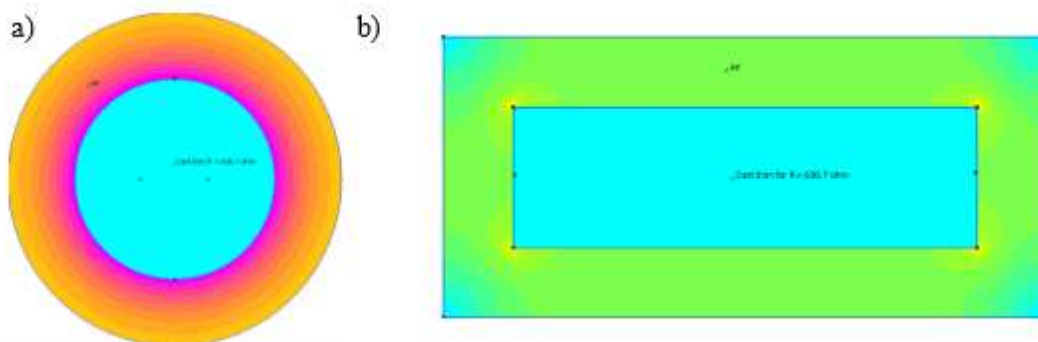


Figura 30. Comportamento do novo campo elétrico sobre a secção transversal (a) e longitudinal (b).

Diante das representações visuais alguns pontos foram selecionados para coleta de dados das respectivas grandezas de tensão (V), densidade de corrente (J) e campo elétrico (E). As regiões analisadas são identificadas na Figura 31(a, b).

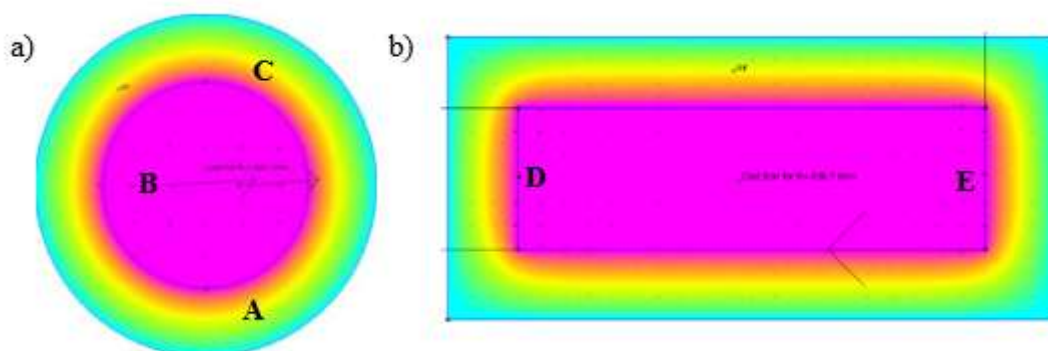


Figura 31. Áreas para análise das grandezas sobre a secção transversal (a) e longitudinal (b).

A partir da modelagem obteve-se os dados das grandezas nos pontos seleccionados. A Tabela 6 apresenta as grandezas elétricas identificadas com o auxílio do *software* FEMM.

Tabela 6. Grandeza elétrica identificadas nos respectivos pontos com o auxílio do FEMM.

Região	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	V (V)	J (A/m ²)	E (V/m)
A	1,60	1,33	2,01999	1,20944.10 ³	1,0885.10 ⁻³
B	1,48	4,97	2,01999	1,06582.10 ³	9,59234.10 ⁻⁴
C	1,02	6,68	1,06618	5,78945.10 ⁻²⁰	1040,05
D	0,89	3,01	2,01983	3,65382.10 ⁴	3,28844.10 ⁻²
E	19,02	3,04	2,01997	3,06601. 10 ⁴	2,75941. 10 ⁻²

De modo semelhante foi realizado o processamento do Ferro Fundido Nodular observando o segundo valor de resistividade adotado ($\rho = 0,508 \mu\Omega \cdot m$), o qual resulta em uma resistência elétrica da perspectiva longitudinal de $R = 359,3 \mu\Omega$, alterando as tensões nos terminais do corpo de prova e a corrente com a ajuda da análise no *software* Multisim.

Assim pôde-se obter dados para a definição de uma faixa de resultados aceitáveis que espera-se encontrar nos testes em laboratório com o Ferro Fundido Nodular, com

o desenvolvimento do protótipo de instrumentação elétrica.

A Figura 32(a, b) apresenta o resultado da tensão em escala de cores, juntamente com os respectivos vetores de densidade de corrente. Nestas figuras foram analisados os pontos de mesma coordenada da figura anterior para comparação das grandezas estudadas.

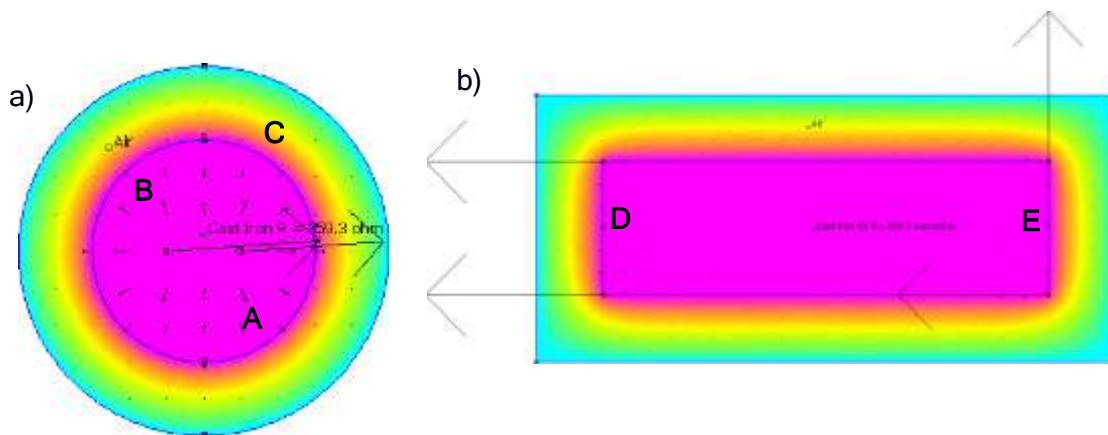


Figura 32. Representação das seções transversal (a) e longitudinal (b) do FFN sob escala de cores e respectivos pontos para análise, adotando $\rho = 0,508 \mu\Omega$.

Observa-se nesta representação, o maior módulo dos vetores de densidade de corrente (J), principalmente na Figura 32(a), isso se deve a menor resistência de análise, para o esboço analisado obteve-se os dados exibidos na Tabela 7.

Tabela 7. Tabela para apresentação das grandezas relevantes nos respectivos pontos para $\rho = 0,508 \mu\Omega$.

Região	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	V (V)	$ J $ (A/m ²)	$ E $ (V/m)
A	1,6	1,33	1,26198	$7,06501 \cdot 10^3$	$3,58902 \cdot 10^{-3}$
B	1,48	4,97	1,26198	$6,20814 \cdot 10^3$	$3,15374 \cdot 10^{-3}$
C	1,02	6,68	0,666087	$3,61692 \cdot 10^{-20}$	649,763
D	0,89	3,01	1,26189	$4,06731 \cdot 10^4$	$2,06619 \cdot 10^{-2}$
E	19,02	3,04	1,26198	$3,4149 \cdot 10^4$	$1,73477 \cdot 10^{-2}$

4.5. Elaboração do Protótipo

Nesta etapa foi realizada a montagem da estrutura física do projeto seguindo todos os parâmetros planejados. A Figura 33 mostra o layout das trilhas do circuito no *software* Proteus 8.1, aonde pode-se observar a pré organização de todos os componentes e a placa medindo 168 mm por 170 mm.

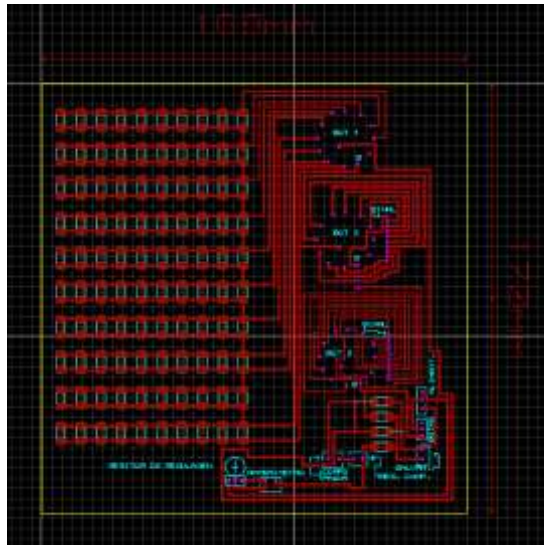


Figura 33. O circuito com as trilhas de elétricas projetadas no Proteus 8.1.

A criação das trilhas no *software* Proteus 8.1 foi extremamente importante, pois ela foi utilizada na impressão no papel fotográfico seguido da sua transferência para a placa de cobre. A Figura 34 mostra a pré-visualização da placa em 3D obtida através do *software* Proteus 8.1 com os devidos componentes organizados de forma a atender os requisitos de qualidade e economia.

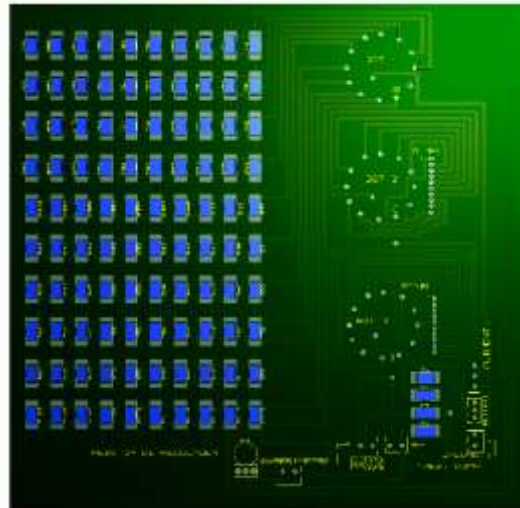


Figura 34. O circuito projetado em 3D com as trilhas e componentes projetado no Proteus 8.1.

Ao determinar de forma planejada o desenvolvimento físico da placa, tornou-se necessário o levantamento dos componentes para que pudesse ser orçado o valor para o projeto e também identificar específicos fornecedores, pois grande parte dos componentes é difícil de serem encontrados no Brasil, como por exemplo, os resistores de $1m\Omega$, tornando necessária uma busca em plataformas internacionais. Para tanto, foi necessário organizar uma lista identificando valores e possíveis fornecedores. A Tabela 8 apresenta o levantamento dos componentes.

Tabela 8. Lista de componentes utilizados no protótipo.

Componentes
Resistor de $1m\Omega$
Conector KK 3961-2 Fêmea 3,96mm, 2 vias
Conector KK 3961-2 Macho 3,96mm, 2 vias
Conector KK 3961-3 Macho 3,96mm, 3 Vias
Conector KK 3961-3 Fêmea 3,96mm, 3 vias
Chave Rotativa 1 polo e 12 Posições
Resistor 1R SMD 2512 5% 1W (RC2512JK-071RL)
Placa De Fenolite Fs Cobreado Pcb
Percloroeto De Ferro
Trimpot 200R 3296w 25 voltas vertical (201)
Galvanometro Escala de 25micro
Maleta ati impacto
Botão Power On/off Com Trava Led Neon Azul Vermelho Conecto
Terminal KK alojamento

Filamento Flexível de cabo 0,75mm de cobre
Papel fotografico
Fonte 9v
Bateria 9v recaregavel
Clip para bateria
Knob rotativo
Conector femea P4
Broca 1x16

Ao realizar a compra dos componentes foi possível dar o primeiro passo para o desenvolvimento do protótipo, através confecção da placa impressa, composta de uma de fenolite, Figura 35. Essa placa recebeu o desenho do circuito em sua superfície de cobre para que depois fosse exposta ao processo de corrosão do cobre ao ser inserido numa solução de Percloroeto de Ferro ($FeCl_3$).

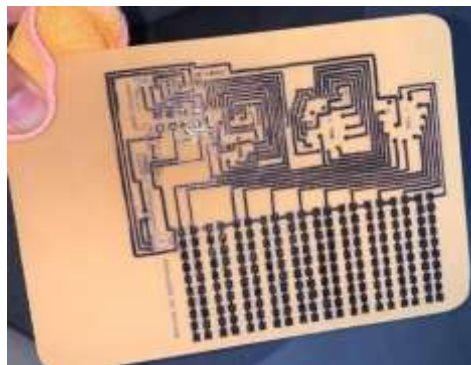


Figura 35. Placa de Fenolite após o tratamento de corrosão.

Com a placa pronta, os próximos passos foram à soldagem dos componentes e desenvolvimento da estrutura para comportar a placa e os demais acessórios.

O processo de soldagem dos componentes foi complexo e desafiador, pois como grandes partes dos componentes se tratam de dispositivos elétricos e eletrônicos pequenos, como os resistores SMD, o processo demandou técnicas de soldagem diferentes para cada tipo de componente e atender suas necessidades características, afinal a precisão para um circuito desse tipo demanda cuidado e atenção. A Figura 36(a) apresenta a placa de circuito com as conexões dos fios interligado com a botoeira

on/off. A visão frontal da placa com os componentes soldados na placa pode se ser observado na Figura 36(b).

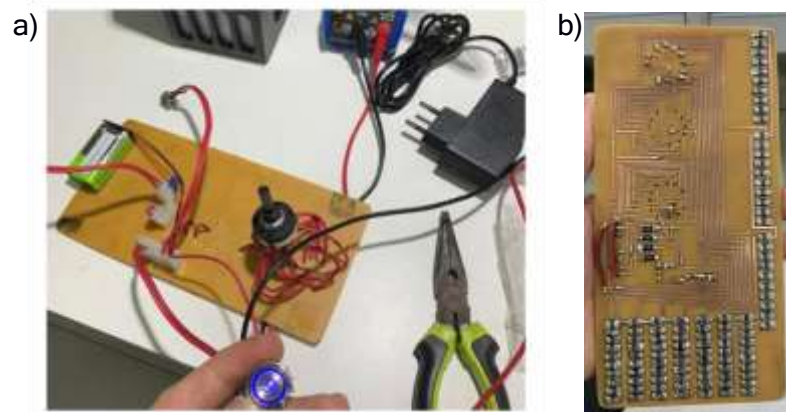


Figura 36. Placa de circuito com as conexões dos fios (a) e a vista frontal com os componentes soldados na placa impressa (b).

Após o processo de soldagem dos componentes, foi realizada uma verificação dos pontos de solda e as trilhas do circuito através de um microscópio digital kkmooon g1000 8mp para circuitos integrados com ampliação em 1000 X, e através dele foram constatados alguns pontos com trilhas abertas, necessitando de reparos para um funcionamento correto. A Figura 37 mostra o processo de análise por microscopia eletrônica das trilhas.



Figura 37. Análise por Microscopia Eletrônica das trilhas dos componentes soldados na placa de circuito impresso com ampliação em 1000 X.

A partir dos dados obtidos da investigação por Microscopia Eletrônica, foi possível estudar a placa de uma forma mais minuciosa e evitar contratempos que atrasariam o desenvolvimento do protótipo, possibilitando passar para a próxima fase do processo com o desenvolvimento da estrutura do projeto.

Para a estrutura do projeto foi utilizado uma maleta anti impacto transparente da marca Vonder. A maleta entrega proteção e o acabamento, pensado para as especificações do projeto, em que o seu corpo transparente possibilita a visualização da placa e seus componentes internos para facilitar uma explicação didática sem precisar desmontar o projeto, Figura 38(a). Também foi idealizada pensando no espaço interno que há na maleta, que possibilita a alocação dos dispositivos que ficam anexados distantes da placa e conectados por cabos como a fonte, bateria, botoeira on/off e botoeira seletora de 12 posições e o galvanômetro com o zero central, Figura 38(b)..

Além dessas características, a maleta foi idealizada pensando em como sua estrutura irá zelar pela integridade do conteúdo do projeto, afinal durabilidade é um dos principais objetivos de se desenvolver um bom projeto.

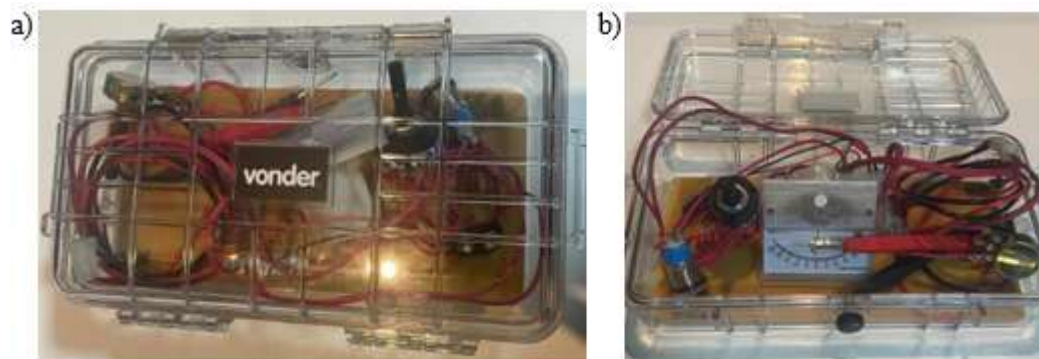


Figura 38. Maleta anti impacto Vonder (a) e a maleta aberta mostrando os componentes utilizados no processo de medição.

Com o dispositivo desenvolvido, foi iniciada a fase de testes do protótipo para o processo de calibração no Laboratório de Circuito e Fenômenos Eletromagnéticos pertencentes ao Núcleo da Engenharia Elétrica da UNESA *Campus* Campos dos Goytacazes, RJ. Foi utilizado corpos de prova de alumínio para os testes possibilitando obter valores de resistência de $1,99 \pm 0,1 \times 10^{-5} \Omega$, o que equivale a resistividade de, aproximadamente $2,8 \times 10^{-8} \pm 0,01 \Omega \cdot m$ para o alumínio, compatível com os dados da literatura estudada (HAYT; BUCK, 2017).



Figura 39. Testes de bancada utilizando um corpo de prova de alumínio com sua estrutura determinada.

O corpo de prova de alumínio utilizado para os testes é importante por apresentar estruturas menos complexas e parâmetros definidos, sendo de grande importância para o presente projeto.

Após a realização dos testes com o protótipo, foram necessários alguns ajustes para alcançar os valores desejados, um dos principais detalhes se refere à chave do protótipo e realização de um bom balanceamento de tensão e resistência elétrica pois quando analisado, levando em consideração a lei de Ohm, observamos elevados valores de corrente elétrica circulando pela placa e assim, o galvanômetro ficava oscilando e mostrando dados confusos, pois não foi dimensionado para trabalhar com elevados valores de corrente elétrica além de sobrecarregar a fonte de alimentação quando a mesma tem um valor máximo de corrente determinado pelo fabricante.

A simulação do dispositivo da ponte de Kelvin, bem como a sua construção física, Figura 40, mostrou a viabilidade do protótipo para a medição da baixa resistência do ferro dúctil, e que ainda recebem influência dos constituintes presentes, sobretudo na formação da cementita livre devido às suas características elétricas intrínsecas por apresentar elevada resistividade com a atuação do mecanismo metaestável para a amostra obtida após 45 min de tratamento, possibilitando obter valores preliminares de resistividades próximas ao limite teórico de 0,50 a $0,90\mu\Omega.m$. Testes na bancada no Laboratório de Circuitos e Fenômenos Eletromagnéticos da UNESA *Campus* Campos dos Goytacazes, RJ.



Figura 40. Testes de bancada para a determinação da resistividade do ferro fundido nodular.

A análise pelo Método de Elementos Finitos, revelou uma boa uniformidade para o potencial gerado na seção transversal do corpo de prova devido à concentração de cargas que ficam na superfície desta região maciça. Por outro lado, o potencial ao longo dos 20 mm apresentou variações, pois a mobilidade eletrônica tendem acelerar as cargas expostas devendo, então, atuar um campo elétrico contrário para reduzir a sua movimentação. Foram determinadas as grandezas elétricas de V, J e E nos pontos indicados no corpo de prova com resistividade de $0,508\mu\Omega$ próximo ao limite teórico.

Contudo pode se determinar que o protótipo tem um grande potencial na área de estudo, o mesmo se mostrou promissor para análise de novos materiais metálicos, sobretudo para auxiliar no processo produtivo de fabricação de ferros fundidos e no estudo de suas constituições estruturais.

4.6. Dificuldades encontradas na execução do projeto

No início do desenvolvimento do circuito obtive alguns atrasos por motivos de compreensão e estudo do *software* Proteus, pois se trata de um programa extremamente complexo e voltado para área da elétrica e eletrônica necessitando de algum tempo para o seu aperfeiçoamento. Após aprender como utilizar as ferramentas

e as funcionalidades do programa foi possível dar andamento e criação e desenvolvimento do diagrama do circuito na plataforma.

Nas pesquisas da literatura, a minha maior dificuldade foi o estudo da composição física do Ferro Fundido Nodular e as propriedades específicas do material, pois quando entramos a fundo e vemos os diversos constituintes e os tipos e tratamentos adequados para os materiais ferrosos, podemos, ver as vastas possibilidades de sua aplicação e importância para o meio tecnológico, econômico e industrial.

O trabalho teve início neste ciclo de 2022-2023, mas ainda necessita de ajustes e formas de melhoria do circuito e da sua execução prática, pois é difícil encontrar componentes eletrônicos que proporcionarão resultados na faixa de miliOhm ($m\Omega$), tornado essa fase do projeto umas das mais intrigantes, pois há várias possibilidades de evolução do projeto que diminuiria custos e até mesmo faria o protótipo ser mais compacto.

4.7. Relacionamento com a Secretaria de Petróleo, Energia e Inovação

No dia 08 de setembro de 2022 o meu orientador, Prof. Dr. Everton Maick R. Pessanha em conjunto comigo tivemos uma reunião de apresentação do Projeto de Pesquisa e as suas potencialidades na Secretaria Municipal de Petróleo Energias e Inovação da Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes, RJ. Foi um momento enriquecedor em conjunto com o Prof. João Batista Pessanha, o Prof. Niander Cerqueira, o Prof. Marcelo Neves e Leonora Tinoco e outros pesquisadores de universidades sediadas em Campos dos Goytacazes, RJ, onde foram discutidos os objetivos do projeto e como poderia contribuir para elevar as potencialidades do Município de Campos dos Goytacazes. Então, a Secretaria de Petróleo, Energia e Inovação sempre se manteve disposta a contribuir com o projeto.

Desde já, quero agradecer a secretaria de Petróleo, Energia e Inovação por todo o apoio no desenvolvimento do projeto. Acredito que na atualidade os futuros engenheiros, cientistas e estudantes necessitam deste tipo de apoio, ou seja, que o poder público acredite na universidade invista nos pesquisadores competentes da sua região, que tenham visão ampla de que possa existir mais do que aquilo que vemos nos

manuais de instruções, fazendo os pesquisadores acreditarem que existe grande potencial do seu projeto para a contribuição da sua região e que não tenham medo de sonhar e acreditar que o novo possa existir e até mesmo ser idealizado e construído em conjunto.

Precisamos de apoio, de confiança para uma nova geração, e isso tem sido transmitido pelo programa Mais Ciência na Universidade, ao financiar um projeto deste nível de complexidade. Por isso deixo essas palavras de gratidão e por enxergar com a academia mais longe!

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi constatado que o presente projeto tem um grande potencial em sua área de atuação, pois a necessidade de estudar novos materiais condutores e suas características para atender certas necessidades da atualidade vem crescendo a cada dia, criando potencialidades de mercado e na área científica.

Portanto, após o período de estudo e desenvolvimento do protótipo, pode-se destacar um crescimento promissor para o projeto quando utilizando novos estudos e teorias que na prática se encaixaram muito bem e ainda a modelagem através do método de elementos finitos para o entendimento estrutural, nos auxiliando no avanço do desenvolvimento do protótipo.

Contudo, pode-se afirmar que o presente estudo do projeto tem grande espaço para crescimento, já que o mesmo tem a possibilidade de se tornar mais preciso, permitindo ampliar ainda mais a sua capacidade de aferição, nos mostrando valores na casa de $1\mu\Omega$, que atualmente não pode ser determinado de uma forma convencional. Assim, esse detalhe único cria uma necessidade de continuação dos estudos do projeto para que o mesmo continue avançando e desbravando o caminho para a solução de problemas atuais da área técnica e científica. Assim, podemos destacar alguns pontos importantes como considerações finais:

1. O desenvolvimento do protótipo de medição da baixa resistência elétrica se

mostrou favorável para as medidas no ferro dúctil avaliado, sobretudo para avaliar a maior participação do equilíbrio metaestável para o tempo de 45 min com a presença da cementita (Fe_3C) livre revelando uma resistividade elétrica na faixa $0,7 \pm 0,2 \mu\Omega \cdot \text{m}$.

2. A modelagem através do método de elementos finitos permitiu simular problemas eletrodinâmicos auxiliando na investigação do comportamento elétrico do ferro dúctil, tais como a determinação do campo elétrico e da densidade de corrente.

3. A construção do instrumento de medição de baixa resistência elétrica para fins de pesquisa e evolução na análise de materiais condutores poderá, portanto, contribuir para projetos que visam o entendimento do comportamento estrutural e obtenção de materiais com propriedades cada vez mais favoráveis, elevando a sua valorização, bem como sua aplicação na indústria e na região Norte Fluminense.

6. REFERÊNCIAS

ANGUS, H. T. **Cast Iron Physical and Engineering Properties**. London: Butterworth Co. Butterworths. 2nd Edition. 141 p. 1976.

AULER, P. M. PESSANHA. E. M. R.; MATLAKHOVA, L. A. **Avaliação da Baixa Resistência Elétrica pela Ponte de Kelvin em Ferros Fundidos Nodulares e sua Correlação com a Investigação Estrutural**. VI Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão - Educação, Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento Sustentável. Instituto Federal Fluminense. Campos dos Goytacazes, RJ, 2019, 1p. ISSN: 2525-975X.

BAPTÍSTA, A. L. de B.; NASCIMENTO, I. A. do; BAPTISTA, L. A. C. **Transporte de petróleo e gás. Conceitos e técnicas ligados ao desenvolvimento de produtos para o segmento de exploração, produção e transporte**. Tubo e Companhia, nº. 57, 2013, p. 11- 27.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. Editora UFSC, Florianópolis, 3ª. ed., 2012, p. 308-311.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods (Electrical and Computer Engineering)**. CRC Press, p. 27 - 115, 2003.

BROWN, J. R. **Ductile iron**. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 2000, pp. 70-84.

CAMPILHO, A. **Instrumentação Eletrônica. Métodos e Técnicas de medição**. 2ª Edição, 2013, p. 162.

CAMPOS, M. D. O. de. **Método de Elementos Finitos aplicado à Simulação Numérica de escoamentos de Fluidos**. III Bienal da SBM IME/UFG, 2006, p. 3.

CARDOSO, J. R. **Engenharia Eletromagnética**. Elsevier, Rio de Janeiro, 2011, pp. 443-466.

CARDOSO, J. R. **Introdução ao método dos elementos finitos para engenheiros**

eletricistas. 1. ed. São Paulo: Editoração Própria, 1995. P 72-75.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 7ª ed. ampliada e revisada. São Paulo, 2012, p. 494-581.

DANILO, N. O.; GINÚBIO, B. F. **Método dos Elementos Finitos como Ferramenta Didática para o Ensino de Eletrostática e Magnetostática**. Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Elétrica, p. 3, 2010.

FASIKA, E. J.; JEFFREY, G. A. **On the cementite structure**. Acta Crystallogr. 19, 1965, p. 463.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Editor Blucher, 2009, 335 p.

JIYANG, Z. **Grey Iron**. In: Jiyang, Z. Colour Metallography of Cast Iron. China Foundry, v. 6, n. 2, 2009, p. 157-163.

MEDEIROS FILHO, Solon de. **Fundamentos de Medidas Elétricas**. 2ª. Edição. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro. 1981, 307 p.

GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A. **Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: Como Efetuá-Las Corretamente**. Quim. Nova. São Carlos - SP. Vol 25. Num 4. p. (639, 607). 2002.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentals of Physics, electromagnetism**. 4th ed. New York City: John Wiley & Sons Inc., 1993; 634 p.

HAYT, JR. W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8ª Edição. Nova Iorque, AMGH Editora Ltda., 2017, 595 p.

HANAWALT, J. D.; RINN, H. W.; FREVEL, L. K. **Ind. Eng. Chem.**, Anal. Ed. 10, 1938, p. 475.

LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. **Ductile iron: Fifty years of continuous development**.

Canadian Metallurgical Quarterly, v. 37, n. 5, 1998, p. 343-378.

LUX, I. B.; MINKOFF, F.; MOLLARD, E. *In*: Lux, I. B.; Minkoff, F. Mollard, E. **The Metallurgy of Cast Iron**. Georgi Publishing Co., St. Saphorin, Switzerland, 1974, pp. 495-508.

MACNEAL, R. H. **Some Organizational Aspects of Nastran**. Nuclear Engineering and design, v.29, p-254-265, Dez 1974.

MEEKER, D . **Finite Element Method Magnetics**. Version 4 MACHADO. K . Teoria do Eletromagnetismo. Editora UEPG . Ponta grossa - PR, p. 697 - 735, 2015.

NOVACKI. D. F. **Análise na Parametrização das Indutâncias e Resistência de um Motor de Indução Trifásico utilizando o Método de Elementos Finitos**. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Elétrica, Minas Gerais, BH. 2018, p. 114-152.

OLIVEIRA, F. T.; DONSIÓN, M. P. **A Finite Element Model of an Induction Motor Considering Rotor Skew and Harmonics**. International Conference, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal and INESCC, Portugal. p. 119 – 122. 2017.

OWNBY, P. D.; YANG, X.; LIU, J. J. **Calculated x-ray diffraction data for diamond polytypes**. Am. ceram. Soc. 75, 1992, p. 1876.

OWEN, E. A.; YATES, E. L. **Precision measurements of crystal parameters**. J. Chem. Phys. 3, 1935, p. 605.

PESSANHA. E. M. R.; MATLAKHOVA, L. A. **Análise do Comportamento Elétrico e Magnético de Ferros Dúcteis através da Instrumentação Elétrica e do Método de RAMALEY, D. Journal of Research of the National Bureau of Standards-C**. A Method of Link Circuit Controlling the Effect of the Thomson or of Resistance in the Kelvin Double Bridge. Engineering and Instrumentation Vol. 64C, Nº.4, October-December 1960, pág. 267.

ROBBINS, A. H.; MILLER, W. C. **Análise de Circuitos: Teoria e Prática**. Vol. 1, Cengage Learning. 4ªed, 611 p., 2010.

SANTOS, A. B. de S.; BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares.** São Paulo. Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT), 1989, 206 p.

SALLES, F. P. **Aplicação do Método de Elementos Finitos para Aprimoramento da Análise de Motores de Indução Trifásicos Acionados por Inversores.** Rio de Janeiro, Brasil, COPPE/UFRJ, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, p 33-35, 2008.

STEFANESCU, D. M. **Cast Iron.** In: ASM International Handbook Committee. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. V. 1, 10ª ed., 2005, p. 17-33, 102-149.

SOUSA, S. G. P. P. de. **Análise do comportamento de motor síncrono pentafásico de ímãs permanentes tolerante a falta de fase pelo método dos elementos finitos.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016, p. 104.

TANABE, S. **A Comparison of the Kelvin Double Bridge and the Potentiometer Methods of Measuring Low Resistances.** Thesis University of Illinois, 1914, 45 p.

THOMAS, J. L. **Precision Resistors and their measurements.** National Bureau of Standards Circular. Washington. October 8, 1948. 12 p.

TUMANSKI, S. **Principles of electrical Measurement.** Taylor e Francis Group, LLC, 2006, 461 p.

VIDAL, D. F. **Alterações estruturais e propriedades mecânicas de ferros fundidos nodulares com teor de mg variável, em função do tempo e da temperatura de vazamento.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, março de 2017. 160p.

VIDAL, D. F. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, março de 2013. 172p.

ZARBIN, A. J. G. **Química de nano (materiais)**. *Quim. Nova*, 2007, Vol. 30, No. 6, 1469-1479.