

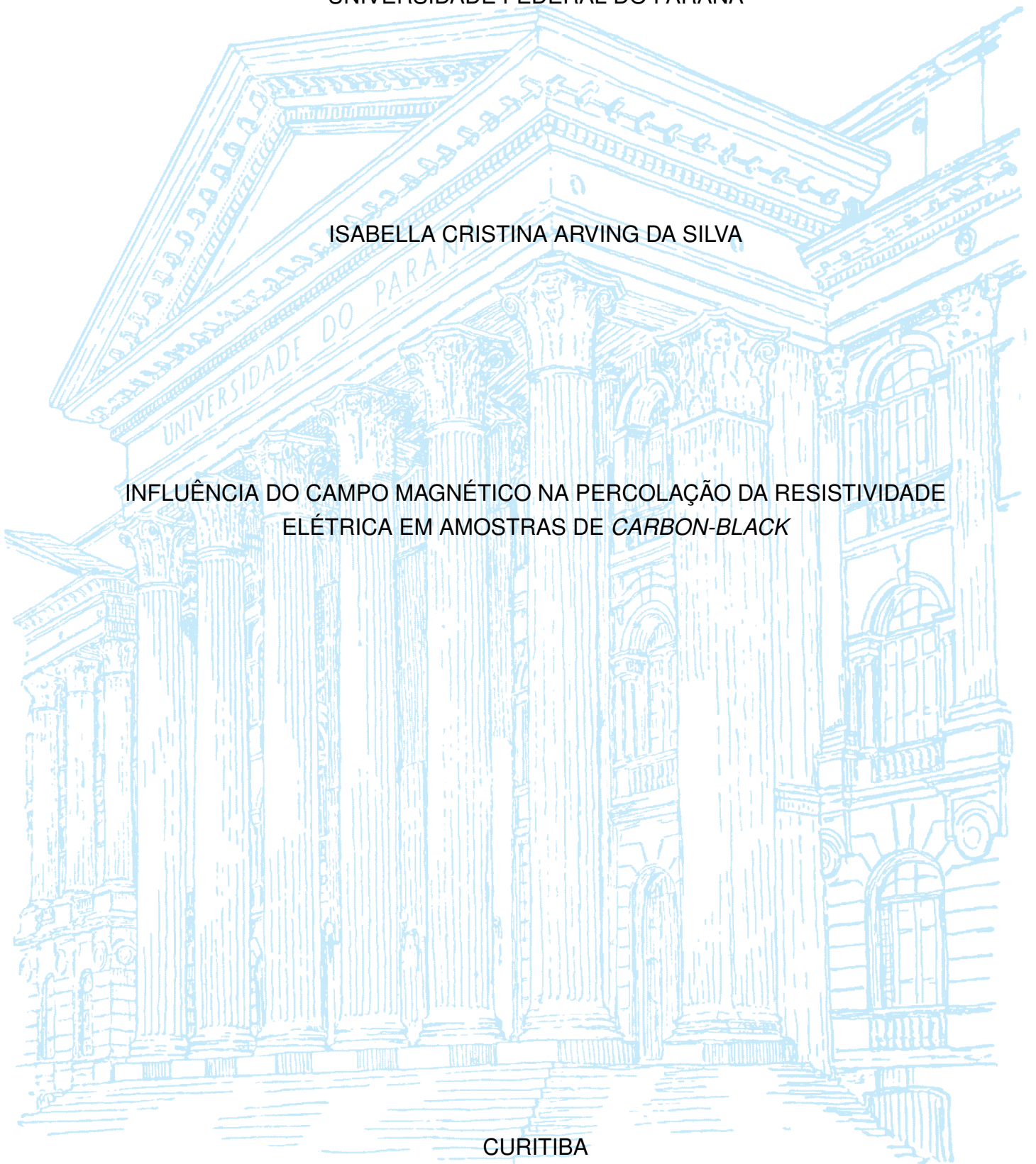
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISABELLA CRISTINA ARVING DA SILVA

INFLUÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO NA PERCOLAÇÃO DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA EM AMOSTRAS DE *CARBON-BLACK*

CURITIBA

2021



ISABELLA CRISTINA ARVING DA SILVA

INFLUÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO NA PERCOLAÇÃO DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA EM AMOSTRAS DE *CARBON-BLACK*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física, Setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciada em Física.

Orientador: Prof^o Dr. Alex Aparecido Ferreira

CURITIBA

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

INFORMAÇÃO Nº 239/2021/UFPR/R/ET/DFIS

ATA DA APRESENTAÇÃO E ARGUIÇÃO ORAL DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 30 dias do mês de julho de 2021, as 14 horas, reuniram-se remotamente usando a Plataforma Microsoft Teams, disponibilizada pela Agência de Tecnologia da Informação e Comunicação da UFPR, a acadêmica **Isabella Cristina Arving da Silva**, aluna do Curso de Licenciatura em Física do Setor de Exatas da Universidade Federal do Paraná, para fazer a apresentação e arguição oral relativa ao seu **Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)**, intitulado “INFLUÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO NA PERCOLAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM AMOSTRAS DE CARBON-BLACK”, orientado pelo Professor Dr. Alex Aparecido Ferreira, perante a banca examinadora, que foi assim constituída: Prof. Dr. Alex Aparecido Ferreira, como Presidente da Banca, o Prof. Dr. José Pedro Mansueto Serbena, como 1º Membro da Banca e o Prof. Dr. Celso de Araujo Duarte, como 2º Membro da Banca. Após assistirem a exposição da acadêmica, acima nomeada, e arguirem-na sobre diferentes aspectos do TCC apresentado, os membros da banca reuniram-se para atribuição da nota final, a qual foi **98,4 (noventa e oito pontos e quatro décimos)**, de acordo com o **Relatório de Avaliação de TCC**, que acompanha esta Ata, estando a acadêmica aprovada na disciplina TCCB, com a recomendação de que todas as sugestões de correções indicadas pela Banca sejam atendidas e que a versão definitiva do TCC seja entregue conforme as regras estabelecidas pelo Colegiado de Curso e no prazo fixado. A nota final foi comunicada à acadêmica. Nada mais havendo a ser tratado, o Presidente da Banca declarou encerrada a seção e todos os membros da Banca assinaram eletronicamente a presente Ata.

Curitiba, 30 de julho de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **ALEX APARECIDO FERREIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/07/2021, às 15:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOSE PEDRO MANSUETO SERBENA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/07/2021, às 15:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CELSO DE ARAUJO DUARTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/07/2021, às 15:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ISABELLA CRISTINA ARVING DA SILVA, Usuário Externo**, em 30/07/2021, às 15:41, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **3688091** e o código CRC **011AE3AA**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais e avós, pelo carinho, incentivo e paciência para a minha conclusão deste curso de graduação.

Agradeço ao professor Alex Aparecido Ferreira pela orientação neste trabalho e pela dedicação na nossa Iniciação Científica, que foi muito legal e de grande aprendizado apesar da dificuldade devido a pandemia, com os laboratórios fechados.

Aos membros e coordenadores do Projeto FiBrA, que foi praticamente a minha segunda casa durante a graduação, já que passava as manhãs, tardes e noites no projeto. Em especial a Rosemeri Fagundes, monitora do projeto e parceira em todos os eventos, almoços, grande amiga e confidente. Aos professores José Pedro Mansueto Serbena e Professor Irineu Mazzaro por me orientarem no FiBrA durante essa jornada, e serem sempre muito prestativos quanto a tirar dúvidas.

A todos os professores do departamento, em especial ao Professor Cláudio H. Lepiensi, meu primeiro professor de Física Básica na graduação, que nos deixou no ano de 2014, e com seu jeito muito didático de ensinar, fez com que as aulas fossem as mais divertidas de se assistir. Ao professor Celso Araújo Duarte, que ia almoçar comigo e amigos no RU, e sempre nos incentivou a continuar no curso e vencer essa grande jornada. Aos professores Sérgio L. Meister Berleze e Ney Mattoso, por me ensinarem as maravilhas da Física Experimental, caminho que com certeza irei seguir. E ao professor Marlus Koehler, pelas histórias incríveis que ele contava durante as aulas de História da Física e Física, Tecnologia, Sociedade e Ambiente.

*"Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim, dividir um planeta e uma época com você."
-Carl Sagan.*

RESUMO

Neste trabalho, estudamos o comportamento percolativo da resistividade em carbon-black, sob o efeito de um campo magnético variável. Para estudar a percolação, foi medida a resistividade elétrica (ρ) desse material em função da densidade volumétrica (d) das amostras, submetidas a campos magnéticos de intensidade 0 a 15 T. Foram utilizadas seis amostras com diferentes densidades de *carbon-black*, que foram resfriadas à duas temperaturas diferentes: 1.4 e 100 K. Foi feita a análise da resistividade elétrica das amostras cuja dependência com a densidade deve seguir a função $\rho = \rho_0(d - d_c)^{-t}$, onde d_c é a densidade crítica, que com a análise dos gráficos obtidos, foi estimada em 0,03802 g/cm³ e t é o expoente crítico cujo valor é esperado ser universal. Para verificar a universalidade de t , avaliamos se o expoente varia com temperatura e com o campo magnético. Observamos com este estudo que t depende da temperatura, mas não depende do campo magnético.

Palavras-chave: percolação, *hopping*, condutividade elétrica, compósitos condutores poliméricos, modelo queijo suíço.

ABSTRACT

In this work, we study the percolative behavior of carbon-black resistivity under the effect of a variable magnetic field. To study the percolation, the electrical resistivity (ρ) of this material was measured as a function of the volumetric density (d) of the samples, subjected to magnetic fields of intensity 0 to 15 T. Six samples with different carbon-black densities were used, which were cooled to two different temperatures: 1.4 and 100 K. The analysis of the electrical resistivity of the samples whose dependence on density must follow the function $\rho = \rho_0(d - d_c)^{-t}$, where d_c is the critical density, which with the analysis of the obtained graphs, was estimated at 0,03802 g/ cm³ and t is the critical exponent whose value is expected to be universal. To verify the universality of t , we evaluate whether the exponent varies with temperature and with the magnetic field. We observe with this study that t depends on the temperature, but it does not depend on the magnetic field.

Keywords: percolation, hopping, electrical conductivity, polymeric conductive composites, swiss cheese model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens obtidas via microscópio eletrônico de a) um aglomerado de <i>Carbon-Black</i> , com agregados e nódulos visíveis. b) Aglomerado de <i>Carbon-Black</i> em uma tela de transmissão com a escala de 1 micrômetro.	1
Figura 2 – Exemplo de uma rede bidimensional (a) de sítios desocupados (1-p), (b) de percolação por sítios ocupados (p) e (c) de percolação por ligação. ³³	3
Figura 3 – Esquema do porta-amostra utilizado ³³	8
Figura 5 – Gráfico de $\ln(\rho)$ em função de $\ln(d - 0,03802)$, com os valores dos coeficientes linear (t) e o coeficiente angular(ρ_0), para um campo magnético com intensidade de $H = 15$ T e submetido a temperatura de 1,4 K.	12
Figura 6 – Gráfico da variação percentual do expoente crítico (t) em função da intensidade do campo magnético aplicado às amostras a uma temperatura de 1,4 K.	13
Figura 7 – Gráfico do logaritmo natural da resistividade em função da densidade para os campo magnético $H = 0$ a 15 T , a temperatura de $T = 100$ K.	14
Figura 8 – Gráfico de $\ln(\rho)$ em função de $\ln(d - 0,03802)$, com os valores dos coeficientes linear (t) e o coeficiente angular(ρ_0), para um campo magnético com intensidade de $H = 15$ T e submetido a temperatura de 100 K.	16
Figura 9 – Gráfico da variação percentual do expoente crítico (t) em função da intensidade do campo magnético aplicado às amostras a uma temperatura de 100 K.	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados coletados da resistividade para as amostras submetidas à temperatura de 1,4 K.	10
Tabela 2 – Dados convertidos da Tabela 1, com a aplicação de \ln em $(d - 0,03802)$ e ρ	12
Tabela 3 – Tabela da intensidade do campo magnético aplicado às amostras e seus respectivos valores de t	13
Tabela 4 – Dados coletados da resistividade para as amostras submetidas à temperatura de 100K.	14
Tabela 5 – Dados convertidos da Tabela 4, com a aplicação de \ln em $(d-0.03802)$ e ρ	15
Tabela 6 – Tabela da intensidade do campo magnético aplicado às amostras e seus respectivos valores de t	16

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 O CARBON BLACK – ESTRUTURA E CARACTERÍSTICAS	1
1.2 TEORIA DA PERCOLAÇÃO	2
1.3 OUTROS MODELOS TEÓRICOS	4
1.4 TRANSPORTE ELÉTRICO POR <i>HOPPING</i>	5
2 – OBJETIVOS	7
3 – METODOLOGIAS E MATERIAIS	8
3.1 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS E MATERIAIS UTILIZADOS	8
3.2 COLETA DE DADOS	9
4 – ANÁLISE DOS DADOS	10
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
5.1 CONCLUSÃO	18
5.2 TRABALHOS FUTUROS	18
6 – REFERÊNCIAS	19
Anexos	22
ANEXO A –Gráficos da resistividade em função da densidade para $T = 1,4 \text{ K}$	23
ANEXO B –Gráficos de $\ln(\text{resistividade})$ em função do $\ln(\text{densidade} - 0,03802)$ para $T = 1,4 \text{ K}$	28
ANEXO C –Gráficos da resistividade em função da densidade para $T = 100 \text{ K}$	32
ANEXO D –Gráficos de $\ln(\text{resistividade})$ em função do $\ln(\text{densidade} - 0,03802)$ para $T = 100 \text{ K}$	37

1 INTRODUÇÃO

O *carbon-black* (CB) foi um material muito estudado nas últimas décadas e de uns tempos para cá voltou a ser um protagonista devido a demanda por equipamentos eletrônicos e novas tecnologias. É um material de uso milenar, chineses e indianos já utilizavam um preliminar desse material como pigmentos para tintas desde o século III a.C¹. É um dos materiais nanoestruturados de carbono mais abundantemente produzido, cerca de 70% da produção mundial de *carbon-black* é utilizado como pigmento e como fase de reforço em borracha e plásticos. Estudos mais recentes utilizam o *carbon-black* em compósitos condutores poliméricos, que é a motivação para a realização desse trabalho.

1.1 O CARBON BLACK – ESTRUTURA E CARACTERÍSTICAS

Carbon-Black (CB) ou negro de fumo, consiste em carbono elemental na forma de nódulos quase esféricos. Os nódulos (partícula primária) são o alicerce fundamental do CB, e fundem-se uns aos outros tornando-se agregados. Agregados são formados por aglomerados unidos por força fraca de van der Waals². Diferente dos aglomerados, que estão fundidos e não é possível separá-los em nódulos, os agregados podem ser separados. Podemos ver na Figura 1a) a imagem de um aglomerado, e comparar os nódulos com uma uva, por exemplo, e os agregados como um cacho de uvas, e respectivamente os aglomerados como a junção de vários cachos. Observando a escala que se encontra a imagem na Figura 1b), podemos ver que o tamanho desses nódulos é microscópico, e podem ter de 10 a 300 nanômetros².

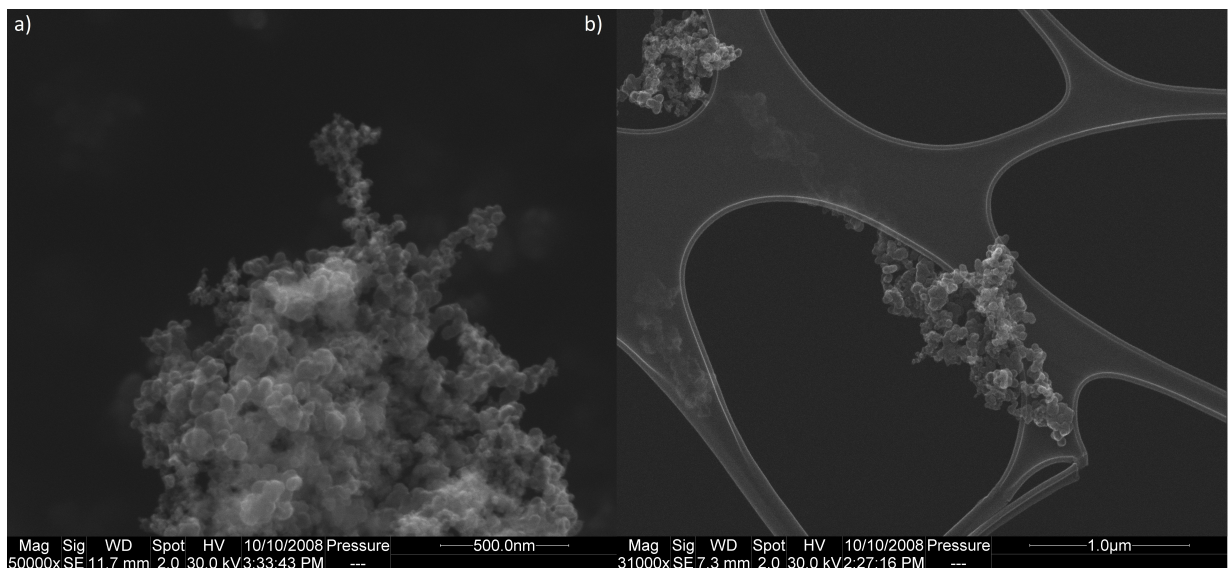


Figura 1 – Imagens obtidas via microscópio eletrônico de a) um aglomerado de *Carbon-Black*, com agregados e nódulos visíveis. b) Aglomerado de *Carbon-Black* em uma tela de transmissão com a escala de 1 micrômetro.

A produção do CB pode ocorrer de duas formas: por combustão completa ou incompleta de hidrocarbonetos. A diferença entre esses métodos é a presença ou não de oxigênio no processo, e o resultado final irá depender do tipo de hidrocarboneto utilizado na combustão, e as condições experimentais da reação. Esses dois métodos são responsáveis pela quase totalidade de CB produzido no mundo, sendo o de combustão incompleta o mais utilizado.

Pesquisas recentes com o CB estão sendo desenvolvidas por vários pesquisadores no mundo, como em fontes de energia limpa, devido ao CB absorver radiação ultravioleta³¹, é utilizado com uma mistura de polipropileno em componentes para absorver energia solar, e possui uma alta absorvância de 95%³. Além disso, há um trabalho em andamento de Saeed Khodabakhshi, Pasquale Fulvio e Enrico Andreoli⁴, pesquisadores do Reino Unido e Estados Unidos, batizado de “When Black Turns Green” (Quando o preto se torna verde, em tradução literal), que estuda o uso do CB em fontes de energia renovável e captura de carbono.

Freqüentemente usa-se o fato de o CB possuir uma excelente condutividade elétrica e estuda-se o seu comportamento quando incorporado a uma matriz polimérica isolante. A essa classe de materiais é dada a denominação de compósitos condutores poliméricos, e é um exemplo importante da modificação de materiais em áreas até então restrita aos metais, tais como piezo elétricos⁵, adesivos condutivos⁶, roupas e artigos antiestáticos⁷, blindagem eletromagnética⁸ e sensores químicos⁹. A vantagem dos compósitos condutores poliméricos são muitas em comparação com metais, dentre elas estão resistência a corrosão, menor densidade, processabilidade e custo¹⁰. A variação da condutividade elétrica de um compósito em função da concentração ou densidade do material *Carbon-Black* costuma ser muito alta (várias ordens de grandeza) e costuma ser explicado pela teoria da percolação.

1.2 TEORIA DA PERCOLAÇÃO

A Teoria da Percolação foi proposta pelos matemáticos Broadbent e Hammersly em 1957 para estudar a propagação de fluidos em meios desordenados¹¹, e é utilizada em várias áreas da ciência. Difusão de fluidos em rochas porosas³⁵, propagação do fogo em incêndios florestais³⁴, o contágio de pessoas em uma epidemia^{35,36}, e etc, podem ser previstos através desse modelo matemático simples. Para melhor entender a percolação, vamos imaginar um certo material poroso que possui poros dispostos de maneira aleatória, dependendo de quão distantes essas cavidades estejam uma das outras poderá haver uma junção de poros, ou seja, um túnel. Há a possibilidade desses túneis ligarem as duas extremidades do material, de forma que em uma das extremidades derramar-se um fluido, ele pode atravessar o material através desses túneis. Se o fluido conseguir encontrar um caminho entre os túneis e atravessar o material, passando para a outra extremidade e “vazar”, então quer dizer que o sistema percolou. Vamos agora analisar a probabilidade da percolação acontecer: imaginemos uma rede bidimensional de sítios desocupados ($1-p$) como na Figura 2a), e com a probabilidade (p) de um sítio estar ocupado (Figura 2b)), sendo essa probabilidade independente dos vizinhos do sítio em questão; a rede será preenchida aleatoriamente. Portanto, cada ligação tem a probabilidade p de existir

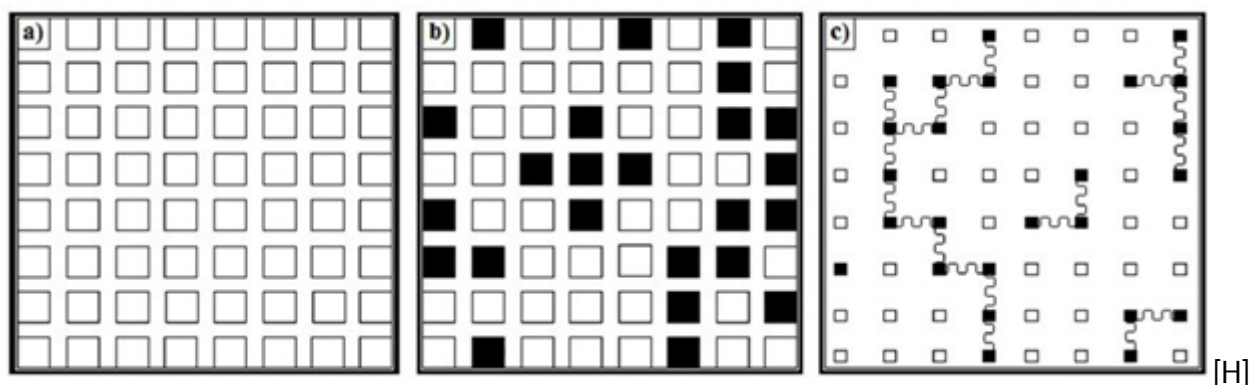


Figura 2 – Exemplo de uma rede bidimensional (a) de sítios desocupados ($1-p$), (b) de percolação por sítios ocupados (p) e (c) de percolação por ligação.³³

e a probabilidade $1-p$ de não conectar os sítios vizinhos. Se houver um caminho possível, a ligação é estabelecida entre os dois sítios vizinhos preenchidos com uma rede (Figura 2c)). Se prepararmos várias redes utilizando probabilidades diferentes, há um valor de p , que chamamos de probabilidade crítica (p_c), ou limiar de percolação, a partir do qual um caminho ininterrupto de sítios ocupados surgirá de uma extremidade a outra da rede, que será o valor determinante para podemos dizer que o sistema percolou.

A teoria da percolação é utilizada para estudar fenômenos críticos ou transições de fase, ou seja, aqueles controlados por leis de potência de algum parâmetro de ordem p , que possuem expoentes denominados expoentes críticos (β)³⁰. Os pioneiros a estudarem a percolação elétrica para materiais formados com partículas condutoras em matrizes isolantes são Kirkpatrick¹¹ e Zallen¹². O modelo clássico tem como base o desenvolvimento de matrizes regulares finitas, e utilizando simulação computacional é possível determinar a concentração de sítios ou ligações existentes, regidas por lei de potências utilizadas em fenômenos de transição de fase, dada por:

$$\sigma \propto (p - p_c)^\beta \quad (1)$$

onde β é o expoente crítico e p e p_c variam de acordo com a propriedade analisada.

Para considerar as propriedades elétricas específicas dos materiais, e relacionar a condutividade da mistura com a fração volumétrica da partícula condutora, utilizamos a Equação 2³¹:

$$\sigma = \sigma_0(\phi - \phi_c)^\beta \quad (2)$$

com $\phi = p_{c(\text{SÍTIO})} \times V$, onde σ é a condutividade da mistura, σ_0 a condutividade da partícula condutora, ϕ a fração volumétrica da partícula, ϕ_0 é a fração volumétrica crítica de percolação, β é o parâmetro que determina o aumento da condutividade acima de ϕ_c e V é o fator relacionado à localização de uma partícula em um ponto específico da rede³¹. Os valores de c e β são dependentes apenas da dimensão da rede. Kirkpatrick¹³ apresentou os seguintes valores para o expoente β : para modelo de percolação por ligação $\beta = 1,6 \pm 0,1$ e para o modelo de percolação por sítio $\beta = 1,5 \pm 0,1$.³³

Quando p é muito próximo de p_c , $\beta = -t$ e a teoria define que o expoente crítico depende somente da dimensão do sistema, e portanto teoricamente possui um valor universal. Considerando um sistema matriz isolante/*carbon – black* e analisando a resistividade do sistema, podemos considerar a condutividade versus densidade do sistema como $\rho \propto (d - d_c)^{-t}$, onde t é o expoente crítico para a percolação, e negativo pois a resistividade elétrica diverge com a densidade crítica. Alguns autores como Kogut^{14,15} e Straley¹⁵ mostraram que podem ter sistemas percolativos com expoentes não universais. Segundo Halperin¹⁶, alguns sistemas não se comportam necessariamente como redes discretas, e podem assumir outros modelos batizados de queijo suíço e queijo suíço invertido.

1.3 OUTROS MODELOS TEÓRICOS

Houve muita discussão entre pesquisadores acerca do expoente crítico t ser universal ou não. Levando em conta a lei de potência na Equação 1, temos um valor para o expoente $t \approx 2$ para o caso tridimensional¹⁷, que seria o valor universal. Porém, como já vimos antes, Kirkpatrick¹¹ encontrou o valor $t \approx 1,5$, logo começou-se a estudar um possível modelo para explicar essa diferença. A possibilidade teórica de expoentes não-universais foi apresentada por Kogut e Straley¹⁸, que o coeficiente t deveria ser diferente de 2, se a amostra apresentasse uma probabilidade alta de conter conexões de baixa condutância. Para isso, os autores utilizaram uma distribuição de condutâncias $f(g) = (1 - p)\delta(g) + ph(g)^{33}$, onde g é o valor das condutâncias microscópicas, que normalizada em uma função $h(g)$, fica como a Equação 3, e válida para os intervalos $g < 1$, $h(g) = 0$, com $0 < \alpha < 1$, onde α é uma distribuição de condutâncias com maior probabilidade de conter baixas condutâncias. Assim, Kogut e Straley³⁰, puderam concluir que o expoente crítico pode ter um valor diferente de $t_{un} = 2$ (expoente crítico universal), com a equação:

$$t = t_{un} + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3)$$

Outro modelo que explicaria essa diferença nos coeficientes é o modelo do queijo suíço, proposta por Halperin¹⁶. Neste modelo, “buracos isolantes” são colocados em um meio contínuo condutor, e esses buracos podem se sobrepor, daí vem a semelhança com o queijo suíço. Halperin et al¹⁶, mostraram que o mapeamento deste meio numa rede discreta leva a uma distribuição de condutâncias $h(g)$ divergente para $g \rightarrow 0$ $p(\delta)$ da distância entre as superfícies dos isolantes, quando $\delta \rightarrow 0$. Neste caso, para uma amostra tridimensional, temos $t \approx 2,5$.

Ainda há o modelo do “queijo suíço invertido”¹⁹, na qual “buracos condutores”, que podem se sobrepor, são dispostos num meio isolante e contínuo, o mapeamento não leva a uma divergência para $h(g)$ quando $g \rightarrow 0$, pois nesse caso os autores obtiveram um valor negativo para α . Portanto, neste caso, o expoente t deveria ser universal. Porém, com estudos seguintes à apresentação da teoria, foi provado que essa hipótese do t universal não procede. Para alguns estudos concordou-se com o valor universal^{20,21}, mas também valores muito altos como $t = 6,4$ foram encontrados³², e valores médios como $2.97 \pm 0,1$ para o CB em matriz

polimérica de polietileno, 4 e 2.8 para dois compósitos com diferentes carbon- blacks^{22,32} O próximo modelo que explica essa diferença entre os expoentes t , é o processo de condução por *hopping*, que foi descrito na década de 60 por Miller e Abrahams, como é um processo de tunelamento termicamente ativado, poderia também explicar a questão da não universalidade do expoente t , e a sua ligação direta com a temperatura.

1.4 TRANSPORTE ELÉTRICO POR HOPPING

O transporte elétrico por hopping é uma teoria muito utilizada para explicar resultados experimentais da relação entre condutividade e temperatura. É uma forma de condução em que elétrons com função de onda localizadas saltam de um estado localizado para outro estado localizado com a assistência de fônons. Foi descrita inicialmente por Miller e Abrahams²⁵, e é um tipo de tunelamento termicamente ativado. Como nesse modelo de hopping, a condutividade é uma função exponencial da temperatura elevada a alguma potência c , muitos trabalhos experimentais usam essa teoria para analisar os dados obtidos, que segue a Equação 5³⁰:

$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^c\right] \quad (4)$$

onde esse expoente c está relacionado com o alcance do elétron ao “hop”, ou seja, saltar de um ponto ao outro da amostra. Pelo fato do número de fônons em um material diminuir ao abaixarmos a temperatura, amostras que conduzem por hopping têm resistividade mais alta em temperaturas baixas, dependendo do alcance do salto e da densidade de estados para o material, o expoente da dependência da condutividade com a temperatura muda. Foi Mott²⁶ que verificou que com a diminuição da temperatura, a distância do salto pode aumentar para que a energia de ativação necessária diminua, favorecendo então hopping para locais mais distantes no material. Para uma distribuição de estados constante em torno da energia de Fermi (eF), a relação entre condutividade e temperatura é dada (em três dimensões) por:

$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/4}\right] \quad (5)$$

A temperatura T_0 está associada a densidade de estados no nível de Fermi e também ao raio de localização da função de onda do elétron. Este comportamento é observado em temperaturas mais baixas, quando o número de fônons é pequeno e eles têm baixa energia. Sendo assim, o transporte que envolve menores energias de ativação é favorecido.

Ainda temos outro modelo a discutir, o modelo de Efros e Shklovskii²⁷, que considera a interação coulombiana entre os elétrons, onde ocorre um gap na energia de Fermi, que diferente do modelo de Mott, não é constante³⁰.

Efros e Shklovskii mostraram que se considerarmos a interação coulombiana, o expoente da temperatura muda e é $\frac{1}{2}$, levando a expressão:

$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left[-\left(\frac{T_{0ES}}{T}\right)^{1/2}\right] \quad (6)$$

sendo T_{0ES} inversamente independente do raio de localização da função de onda. Estas teorias apresentadas, só servem para temperaturas baixas, para temperaturas “altas”, há outros tipos de condutividade que ocorrem simultaneamente, mascarando o transporte por hopping³⁰.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi fazer uma comparação de um conjunto de amostras submetidas a duas temperaturas diferentes (1,4 e 100 K), e perceber semelhanças e diferenças no regime de percolação dos sistemas.

3 METODOLOGIAS E MATERIAIS

Os dados coletados para a realização desse trabalho foram extraídos pelo Professor Doutor Alex Aparecido Ferreira, no Laboratório de Semicondutores - Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais. Conforme descrito pelo professor Alex, segue a metodologia utilizada para a confecção das amostras e a coleta dos dados.

3.1 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS E MATERIAIS UTILIZADOS

O *carbon-black* utilizado foi o *Vulcan XC72R*, cedido pela *Cabot Corp.* Segundo as especificações disponíveis pela empresa fabricante, é um material muito leve e fofo, de densidade igual a $1,87\text{g/cm}^3$. De fácil dispersão, possui absorção de DBP igual a $192\text{ml}/100\text{mg}$, com tamanho de partícula média igual a 30 nm , obtido a partir de Microscopia Eletrônica de Transmissão. Informações adicionais sobre o *Vulcan XC72R* estão mais detalhadas nas referências^{28,29}. As amostras foram fabricadas sem o uso de uma matriz polimérica, então foi utilizado um porta-amostra de formato cilíndrico (volumes = 80 e 110 mm^3) e feito de material isolante, para sustentar mecanicamente o CB, para as tampas das extremidades do porta-amostra, foi utilizado cobre, que funciona como contato elétrico, como o esquema na Figura 3³³. O volume dos porta- amostra é conhecido, assim como a massa do CB depositada para cada amostra, que variam de 50 a 7 g , e a densidade volumétrica de cada amostra que será utilizada como parâmetro para a análise da percolação, foi calculada utilizando $d = \frac{m}{V_P}$, onde m é a massa do CB e V_P o volume do porta-amostra.

Para medir a resistividade, foi utilizados contatos elétricos na forma de “pseudo-4 pontos”. O termo pseudo é utilizado porque, efetivamente, existem apenas dois pontos de contato elétrico, assim como mostrado Figura 3, em que dois fios foram conectados para a aplicação de uma corrente elétrica através de uma fonte, e outros dois fios, independentes, foram conectados a um multímetro para as medidas de diferença de potencial. Essa configuração foi utilizada, devido a algumas das amostras terem resistências muito baixas, da ordem da grandeza

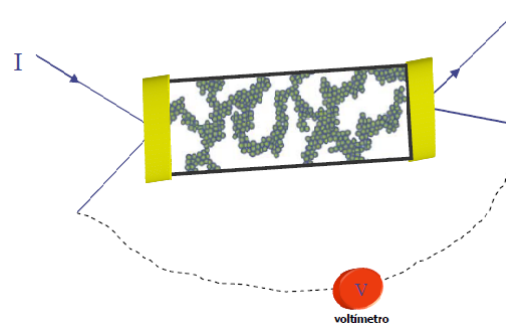


Figura 3 – Esquema do porta-amostra utilizado³³

de resistência dos fios, o que levaria a um erro experimental nas medidas e o multímetro como tem um circuito interno com resistência muito alta, elimina o problema do erro experimental.

Foi utilizada uma bobina supercondutora para a variação do campo magnético, e o porta-amostra foi inserido dentro da bobina. Ela induz um campo magnético de até 15 T de intensidade. Para a variação da temperatura das amostras, importante para estudarmos o comportamento das amostras a baixas temperaturas, de 1,4 K e 100 K, foi utilizado um criostato *Oxford* de imersão em hélio, e para o controle da temperatura foi utilizado um controlador de temperatura *ITC503* da *Oxford*. Então a bobina com o porta-amostra dentro foi submerso em Hélio líquido. Também foi utilizado nesses equipamentos, uma fonte de tensão *Keithley* modelo 220 e um multímetro digital, também da *Keithley*, modelo 196.

3.2 COLETA DE DADOS

Para a medida da resistividade nas amostras, podemos utilizar a equação $\rho = \frac{V A}{I l}$ A, onde V é a diferença de potencial medida pelo multímetro, I a corrente aplicada pela fonte de corrente (menos de 1mA), A é a área da seção reta do cilindro (porta-amostra) e l é o comprimento do cilindro. Com a amostra resfriada pelo criostato e controlada pelo controlador de temperatura, foi utilizado um programa de aquisição de dados feito em *Labview* para medir a resistividade nas amostras. A coleta de dados foi dividida em duas partes, para temperatura fixas em 1,4 K e para 100 K.

4 ANÁLISE DOS DADOS

Para melhor analisarmos o efeito da percolação, os dados foram obtidos em temperaturas diferentes: 1,4 e 100 K.

Para as amostras submetidas à temperatura fixa de 1,4 K, tendo como guia a Tabela 1, foram obtidos sete gráficos da resistividade (ρ) em função da densidade (d), assim foi possível investigar se a resistividade varia com a densidade de *carbon-black* nas amostras, para valores fixos do campo magnético (H).

Tabela 1 – Dados coletados da resistividade para as amostras submetidas à temperatura de 1,4 K.

d(g/cm ³)	$\rho(\Omega cm)$							
	H = 0	H = 2	H = 4	H = 6	H = 8	H = 10	H = 13	H = 15
0.068	24285	24757	25558	26385	27418	28100	29570	30157
0.073	13096	13344	13863	14351	14947	15428	16120	16499
0.165	546	596.80	611.60	651.50	686.80	712	743	760.80
0.25	39.60	40.50	42.10	43.70	45.10	46.40	48.0	48.90
0.34	14.10	14.60	15.46	16.39	17.36	18.31	19.45	20.20
0.41	3.34	3.41	3.54	3.66	3.77	3.85	3.96	4.02
0.48	1.80	1.83	1.89	1.94	1.99	2.03	2.07	2.09

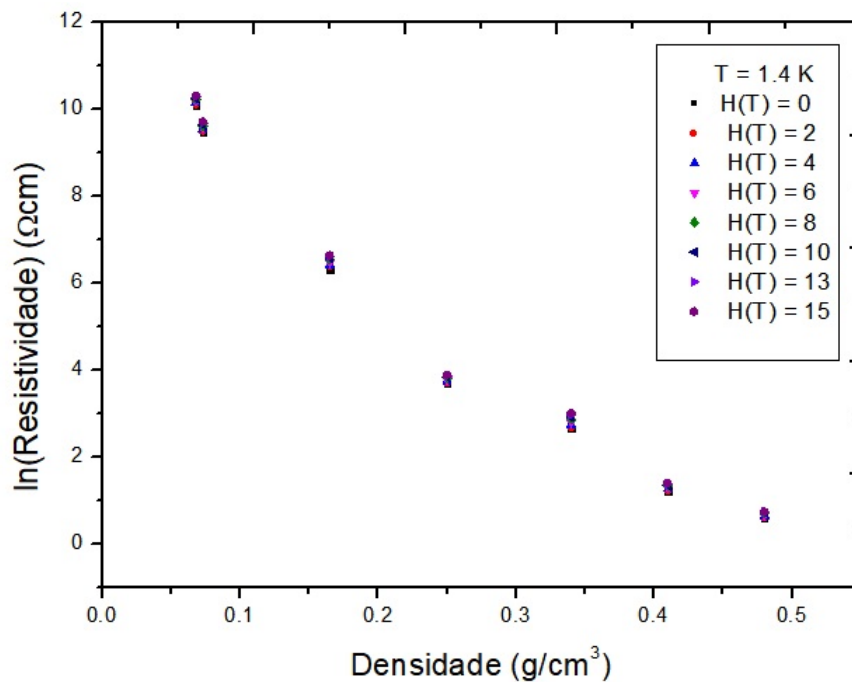


Figura 4 – Gráfico do logaritmo natural da resistividade em função da densidade para os campos magnéticos H = 0 a 15 T, a temperatura de T = 1,4 K.

Os gráficos, para cada valor de campo magnético, seguem na seção Anexo A desse trabalho. Observando-os, podemos perceber que a resistividade possui um comportamento constante para densidades maiores que $0,073\text{g/cm}^3$, já para valores menores que $0,165\text{g/cm}^3$ a resistividade aumenta consideravelmente conforme a densidade aumenta. Fazendo a análise do gráfico do logaritmo natural da resistividade em função da densidade, utilizando as intensidades do campo magnético de 0 A 15 T, conseguimos ver melhor o comportamento da resistividade, mostrado na Figura 4.

Analisando os pontos mostrados na Figura 4, vemos que a resistividade é dependente da intensidade do campo magnético somente para densidades muito pequenas, ou seja, próximas da densidade crítica (d_c) do sistema, que é a menor concentração possível de CB pelo volume da amostra em que ocorre percolação. Para encontrar a densidade crítica do sistema, foi analisada a Equação 7, que mostra a resistividade (ρ) dependente da densidade (d) do sistema e o expoente crítico (t).

$$\rho = \rho_0(d - d_c)^{-t} \quad (7)$$

Para isolarmos o coeficiente t , basta aplicar aos dois lados da equação por \ln , assim obtemos a Equação 8.

$$\ln(\rho) = \ln(\rho_0) - t(d - d_c) \quad (8)$$

Agora, podemos perceber que a Equação 8 possui a forma $y = a + b \cdot \ln(x-c)$, com $a = \ln\rho_0$, $b = t$ e $c = d_c$ a se determinar através da análise do gráfico. Com o gráfico confeccionado do $\ln(\rho)$ em função da densidade, os coeficientes a e b não convergiram para um valor aceitável quando foi feita um ajuste automático no Origin. Assim, foi feita uma análise qualitativa para encontrar um valor de d_c para que tenha uma melhor linearização. O valor de d_c encontrado que melhor se encaixa na linearização é de $0,03802$. Com a densidade crítica estimada, podemos inseri-la na Equação 8, e obtêm-se a Equação 9.

$$\ln(\rho) = \ln(\rho_0) - t(d - 0,03802) \quad (9)$$

Fazendo o gráfico de $\ln(\rho)$ em função de $\ln(d - 0.03802)$, podemos encontrar o expoente crítico (t) para cada valor do campo magnético submetido nas amostras, e descobrir se (t) varia com a variação da intensidade do campo magnético. Para a análise do expoente (t), foi confeccionada a Tabela 2, com os valores convertidos. Todos os gráficos confeccionados para essa análise, encontram-se na seção Anexo B, e como exemplo a Figura 5 mostra a como foi feita a linearização, para $H = 15$ T.

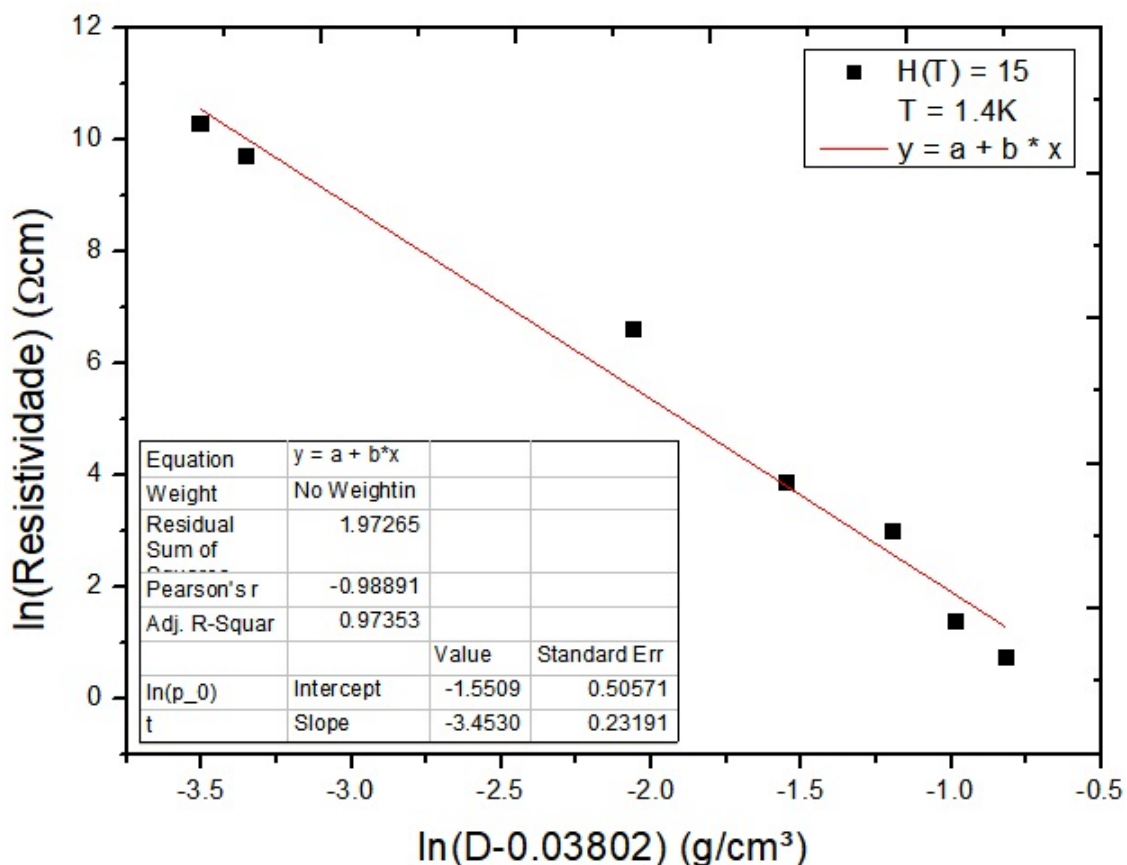


Figura 5 – Gráfico de $\ln(\rho)$ em função de $\ln(d - 0,03802)$, com os valores dos coeficientes linear (t) e o coeficiente angular (ρ_0), para um campo magnético com intensidade de $H = 15$ T e submetido a temperatura de 1,4 K.

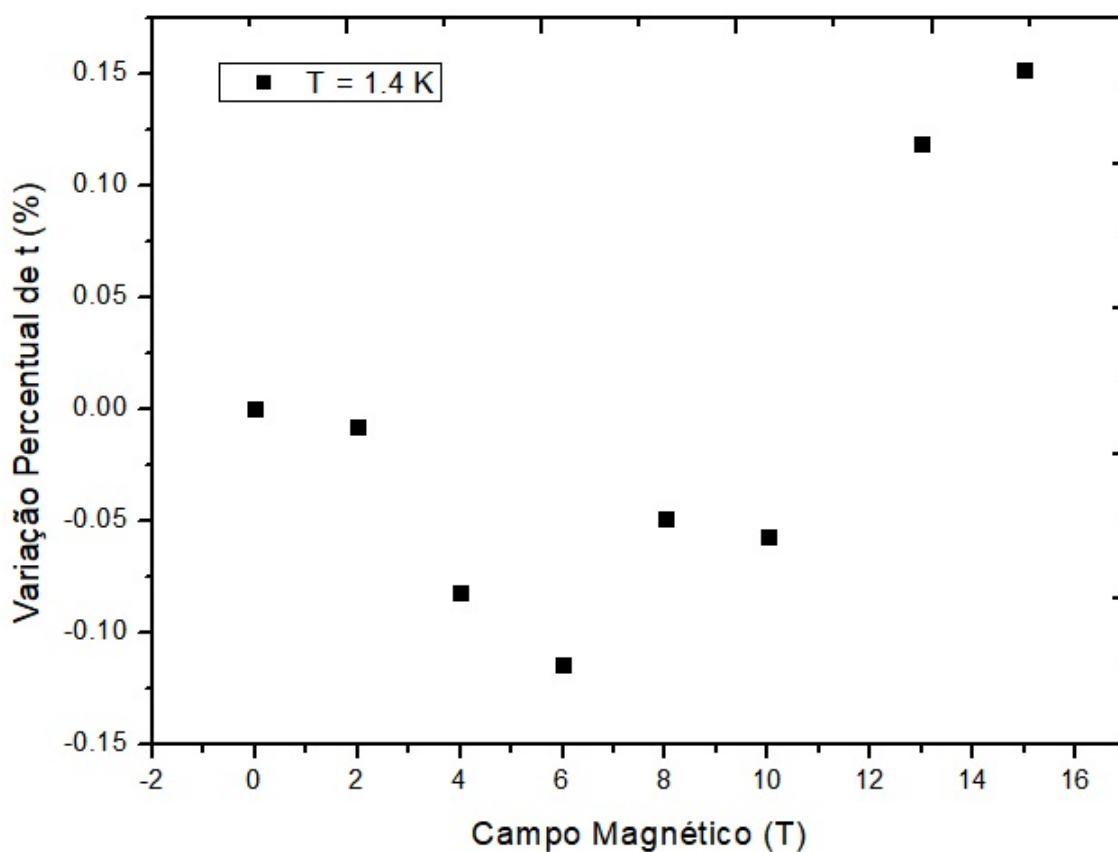
Tabela 2 – Dados convertidos da Tabela 1, com a aplicação de \ln em $(d - 0,03802)$ e ρ .

$\ln[d - d_c]$ (g/cm^3)	$\ln[\rho(\Omega cm)]$							
	H = 0	H = 2	H = 4	H = 6	H = 8	H = 10	H = 13	H = 15
-3.507	10.097	10.117	10.149	10.180	10.219	10.243	10.294	10.314
-3.353	9.480	9.499	9.537	9.571	9.612	9.644	9.711	9.711
-2.064	6.302	6.392	6.416	6.479	6.532	6.568	6.634	6.634
-1.551	3.679	3.701	3.740	3.777	3.809	3.837	3.889	3.889
-1.197	2.646	2.681	2.738	2.797	2.584	2.907	3.006	3.005
-0.989	1.206	1.227	1.264	1.297	1.327	1.376	1.391	1.391
-0.816	0.588	0.604	0.636	0.662	0.688	0.727	0.737	0.737

Com a confecção dos gráficos e a determinação do coeficiente linear, podemos encontrar o valor de t para cada situação, ou seja, cada intensidade do campo magnético (H) aplicado as amostras. Para melhor análise do expoente crítico, foi feita a Tabela 3, com os valores de H e seus respectivos valores do expoente crítico, e o gráfico de H em função da variação percentual de t na Figura 6.

Tabela 3 – Tabela da intensidade do campo magnético aplicado às amostras e seus respectivos valores de t .

H(T)	t
0	3.448
2	3.447
4	3.445
6	3.443
8	3.446
10	3.446
13	3.451
15	3.453

Figura 6 – Gráfico da variação percentual do expoente crítico (t) em função da intensidade do campo magnético aplicado às amostras a uma temperatura de 1,4 K.

Analisando o gráfico t em função de H , podemos perceber uma variação de t com o campo magnético. Mas como essa variação é muito pequena, podemos assumir uma constância no expoente crítico, e a não dependência de t com o campo magnético, sendo um expoente universal, com a variação de H . Agora vamos analisar a parte 2 desse estudo, para as amostras submetidas a uma temperatura de 100 K, repetindo a análise anterior.

A Tabela 4 contém as medidas da resistividade obtidas das 7 amostras de diferentes

densidades, submetidas a campos magnéticos de intensidades de 0 T a 15 T e a uma temperatura de 100 K, em função da densidade volumétrica.

Tabela 4 – Dados coletados da resistividade para as amostras submetidas à temperatura de 100K.

d(g/cm ³)	$\rho(\Omega cm)$							
	H = 0	H = 2	H = 4	H = 6	H = 8	H = 10	H = 13	H = 15
0.068	200.2	200.2	200.2	200.2	200	199.9	199.7	199.5
0.073	129.4	129.35	129.31	129.26	129.17	129.1	129	128.9
0.165	8.21	8.2	8.205	8.203	8.197	8.192	8.18	8.177
0.25	2.02	2.026	2.025	2.025	2.024	2.022	2.02	2.019
0.34	1.13	1.13	1.128	1.126	1.125	1.122	1.121	1.120
0.41	0.605	0.605	0.605	0.604	0.604	0.604	0.603	0.603
0.48	0.481	0.481	0.481	0.480	0.480	0.479	0.479	0.479

Utilizando o mesmo método utilizado na parte 1, foi confeccionado os gráficos da resistividade (ρ) em função da densidade (d) para a análise das resistividades das amostras sob o efeito de um campo magnético com intensidades de 0 a 15 T. Os gráficos para todos os valores medidos de H seguem na seção Anexo C. Fazendo a análise do gráfico do logaritmo natural da resistividade em função da densidade, utilizando as intensidades do campo magnético de 0 a 15 T, conseguimos ver melhor o comportamento da resistividade, mostrado na Figura 7.

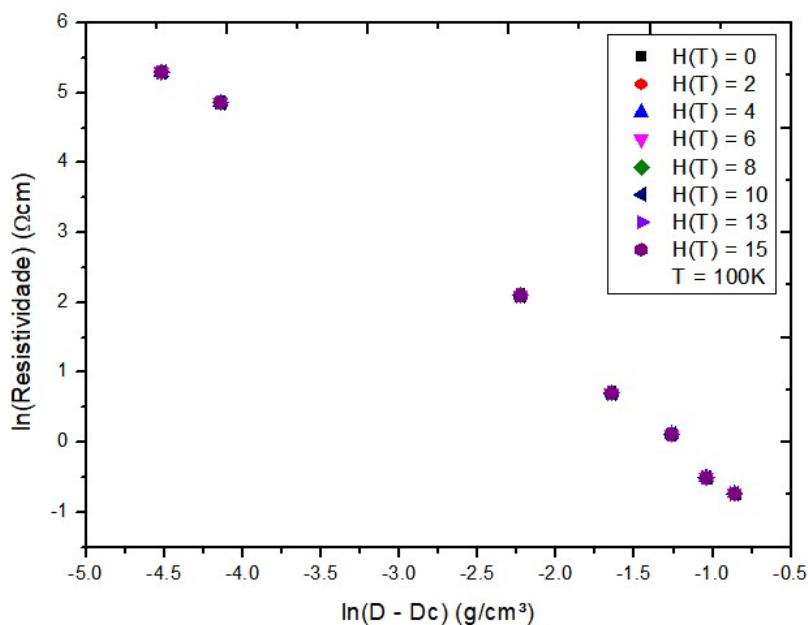


Figura 7 – Gráfico do logaritmo natural da resistividade em função da densidade para os campo magnético H = 0 a 15 T, a temperatura de T = 100 K.

Comparando os gráficos no anexo C, vemos que os valores da resistividade variam muito pouco com a intensidade do campo magnético, e é semelhante ao caso anterior, das amostras submetidas a temperatura de 1.4 K. Podemos perceber que a resistividade comporta-se

de maneira constante para densidades maiores que $0,073 \text{ g/cm}^3$, e para valores menores que $0,165 \text{ g/cm}^3$ a resistividade é maior, já que as densidades menores se aproximam da densidade crítica (d_c), que seria o pico da resistividade, o maior valor possível e o limiar da percolação do sistema. A figura 7, mostra o logaritmo natural da resistividade (ρ) em função da densidade (d) com as amostras submetidas a um campo magnético de 0 a 15T, e podemos perceber o comportamento semelhante da resistividade para todos os valores de H, bem diferente das densidades próximas a densidade crítica para a temperatura de 1,4 K, onde a resistividade aumentava se submetida a um campo magnético mais intenso.

Essa diferença na resistividade para as densidades próximas a densidade crítica se dá devido ao fenômeno de magnetorresistência, propriedade que certos materiais têm de alterar seu valor de resistência elétrica sob a aplicação de um campo magnético externo, sendo maior a magnetorresistência para 1.4K. Para a análise do expoente crítico (t), utilizamos a mesma equação usada na análise das amostras à temperatura de 1,4 K, a Equação 9, com o mesmo valor da densidade crítica encontrado, já que as amostras submetidas a uma temperatura de 1.4K foram as mesmas submetidas à temperatura de 100K. Para a confecção dos gráficos do $\ln(\text{resistividade})$ em função do $\ln(\text{Densidade} - 0.03802)$, foi feita a Tabela 5, e confeccionados os gráficos para as amostras submetidas a um campo magnético de intensidades de 0 a 15 T, que seguem na seção Anexo 4 deste trabalho. Como exemplo segue a figura 8, mostrando a linearização feita para o $H = 15 \text{ T}$.

Tabela 5 – Dados convertidos da Tabela 4, com a aplicação de \ln em $(d-0.03802)$ e ρ .

$\ln[d - d_c]$ (g/cm^3)	$\ln[\rho(\Omega\text{cm})]$							
	H = 0	H = 2	H = 4	H = 6	H = 8	H = 10	H = 13	H = 15
-3.507	5.299	5.299	5.299	5.299	5.299	5.298	5.297	5.296
-3.353	4.863	4.862	4.862	4.862	4.861	4.860	4.859	4.859
-2.064	2.105	2.104	2.105	2.104	2.104	2.103	2.102	2.101
-1.551	0.703	0.706	0.705	0.705	0.705	0.704	0.703	0.703
-1.197	0.122	0.122	0.120	0.119	0.118	0.115	0.114	0.113
-0.989	-0.502	-0.502	-0.502	-0.504	-0.504	-0.504	-0.506	-0.506
-0.816	-0.732	-0.732	-0.732	-0.733	-0.734	-0.734	-0.735	-0.736

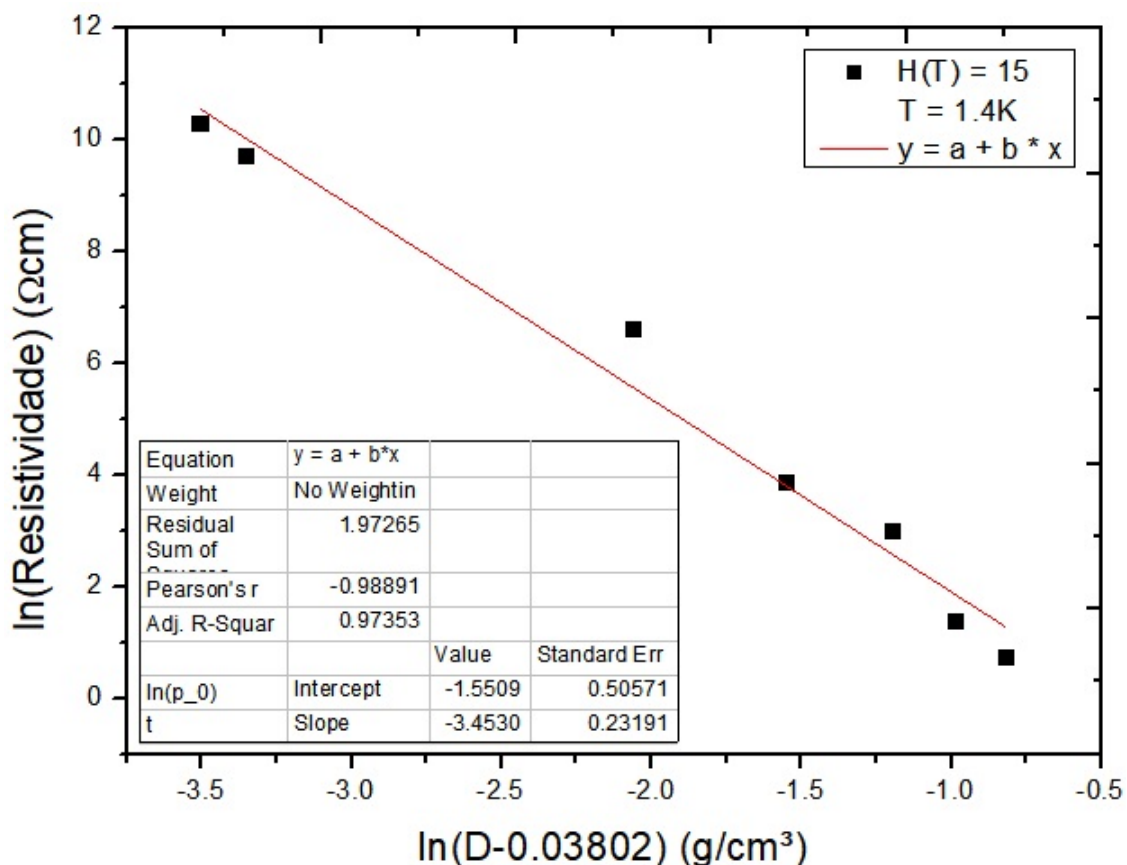


Figura 8 – Gráfico de $\ln(\rho)$ em função de $\ln(d - 0,03802)$, com os valores dos coeficientes linear (t) e o coeficiente angular (ρ_0), para um campo magnético com intensidade de $H = 15$ T e submetido a temperatura de 100 K.

Com os valores dos coeficientes lineares dos gráficos, que correspondem ao expoente crítico (t), foi feita a Tabela 6, com os valores do campo magnético H e seus respectivos valores de t .

Tabela 6 – Tabela da intensidade do campo magnético aplicado às amostras e seus respectivos valores de t

H(T)	t
0	2.2554
2	2.2552
4	2.2535
6	2.2559
8	2.2557
10	2.2559
13	2.2560
15	2.2559

Com os valores da Tabela 6, foi confeccionado o gráfico na figura 9, para analisar o comportamento de da variação percentual de t em função da intensidade do campo magnético aplicado as amostras.

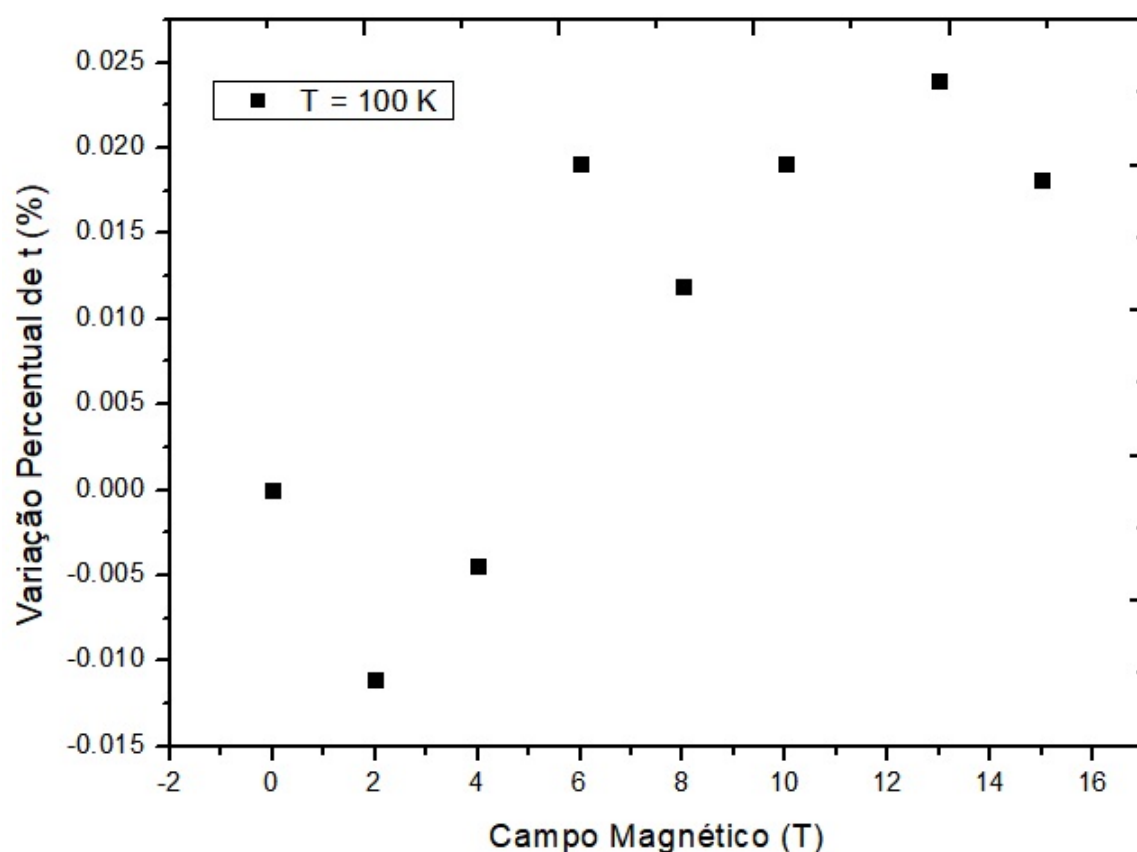


Figura 9 – Gráfico da variação percentual do expoente crítico (t) em função da intensidade do campo magnético aplicado às amostras a uma temperatura de 100 K.

Com o gráfico podemos ver uma variação muito pequena de t , então como no caso anterior da temperatura de 1,4 K, assume-se a constância do expoente crítico (t), e a não dependência com a intensidade do campo magnético. Com os conjuntos de dados à temperaturas de 1,4 K e 100 K, podemos concluir também, que o expoente crítico muda somente com a temperatura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi fazer uma comparação de um conjunto de amostras submetidas a duas temperaturas diferentes (1,4 K e 100 K), e perceber semelhanças e diferenças no regime de percolação dos sistemas, na qual foi possível constatar que o único fator que tem influência no expoente de percolação é a temperatura a qual a amostra foi submetida. Para temperaturas mais baixas, como a de 1,4 K utilizada no estudo, devemos levar em conta o efeito Hopping na amostra, e modelos como o do “queijo suíço invertido”, que explica o valor do coeficiente t ser menor que para temperaturas mais altas, como a de 100 K, também estudada nesse trabalho. Temos que levar em conta, também, que devido a pandemia de Sars-Cov 2 e o fato de todo esse trabalho ser desenvolvido de maneira remota, isso dificultou o acesso aos laboratórios da Universidade, então esse estudo não pode ser feito com um maior conjunto de dados, e uma análise a temperaturas superiores a 100 K não foi possível.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para a continuação desse estudo, será necessário fazer uma nova coleta de dados para temperaturas diferentes das utilizadas, e a análise do coeficiente de percolação para uma conclusão definitiva da sua independência com a intensidade do campo magnético.

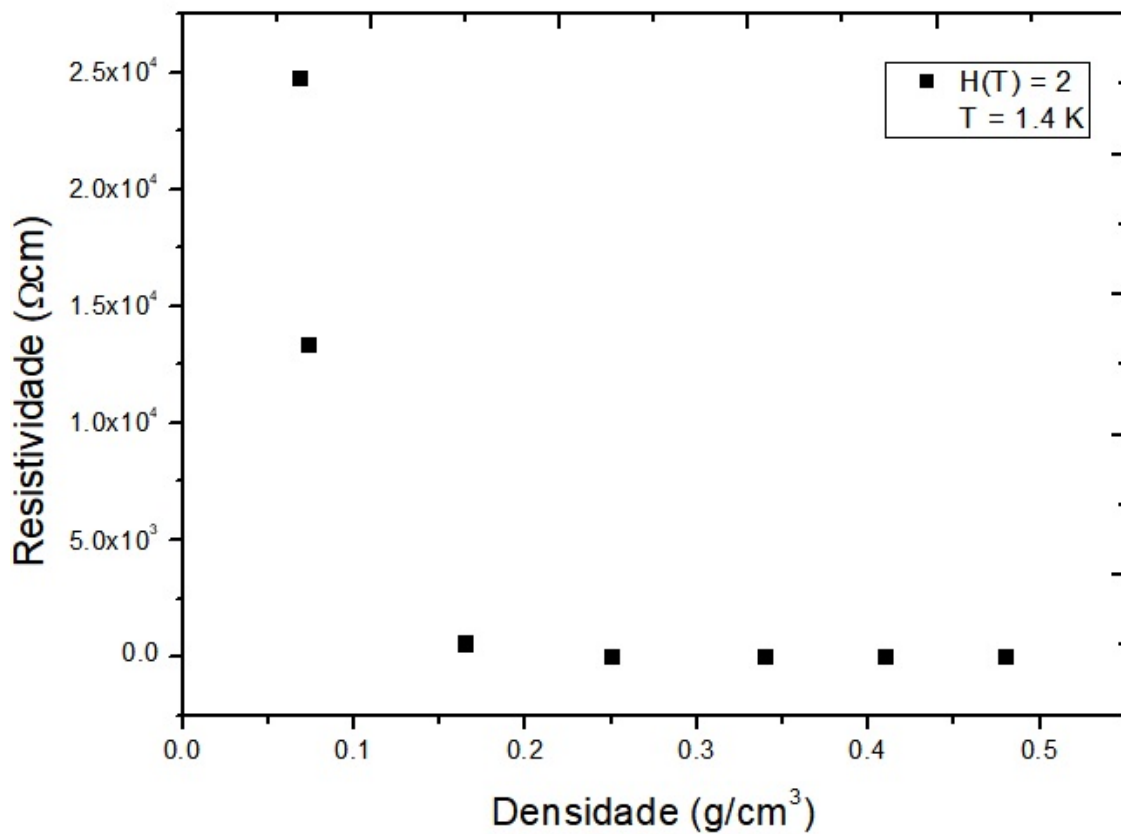
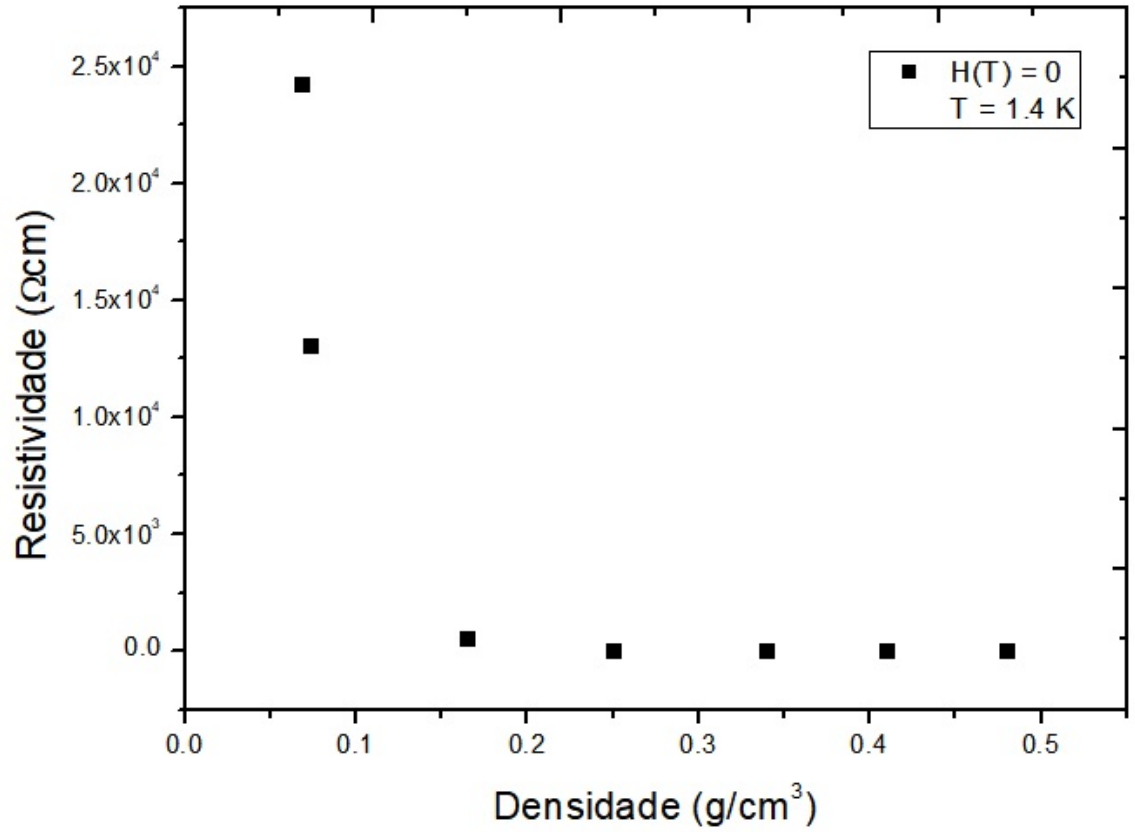
6 REFERÊNCIAS

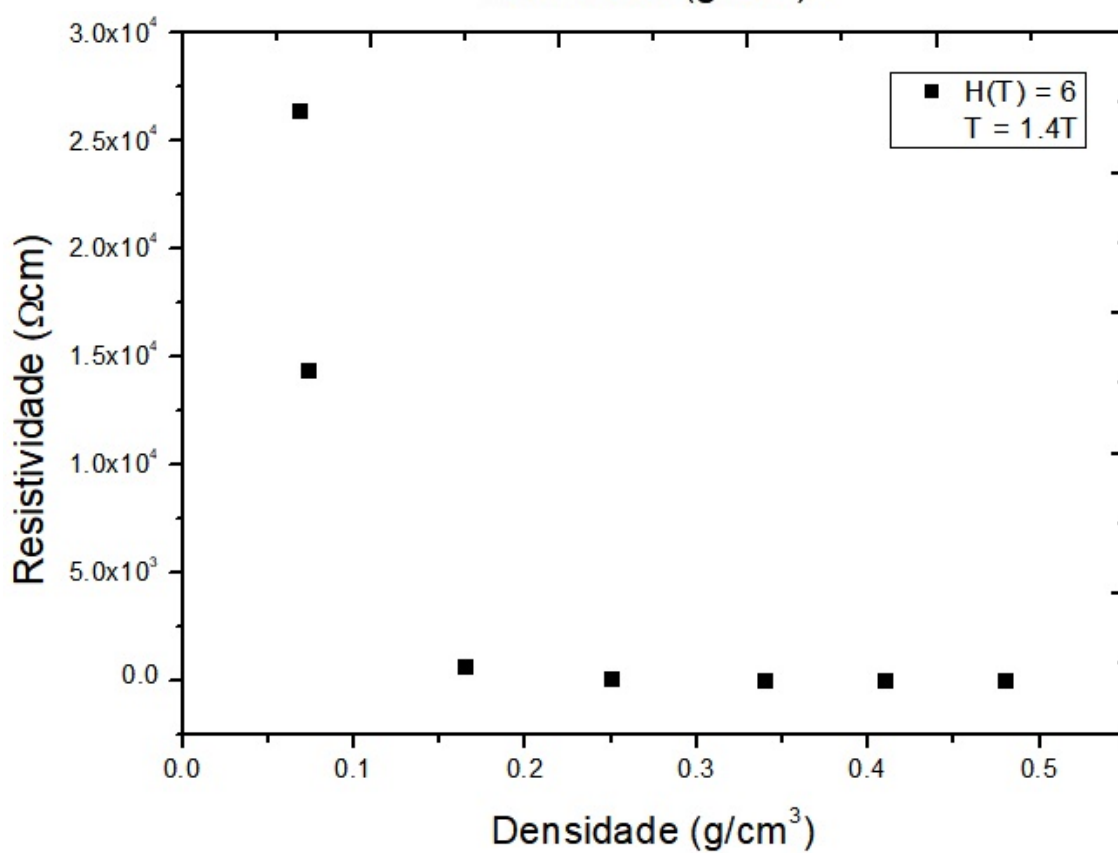
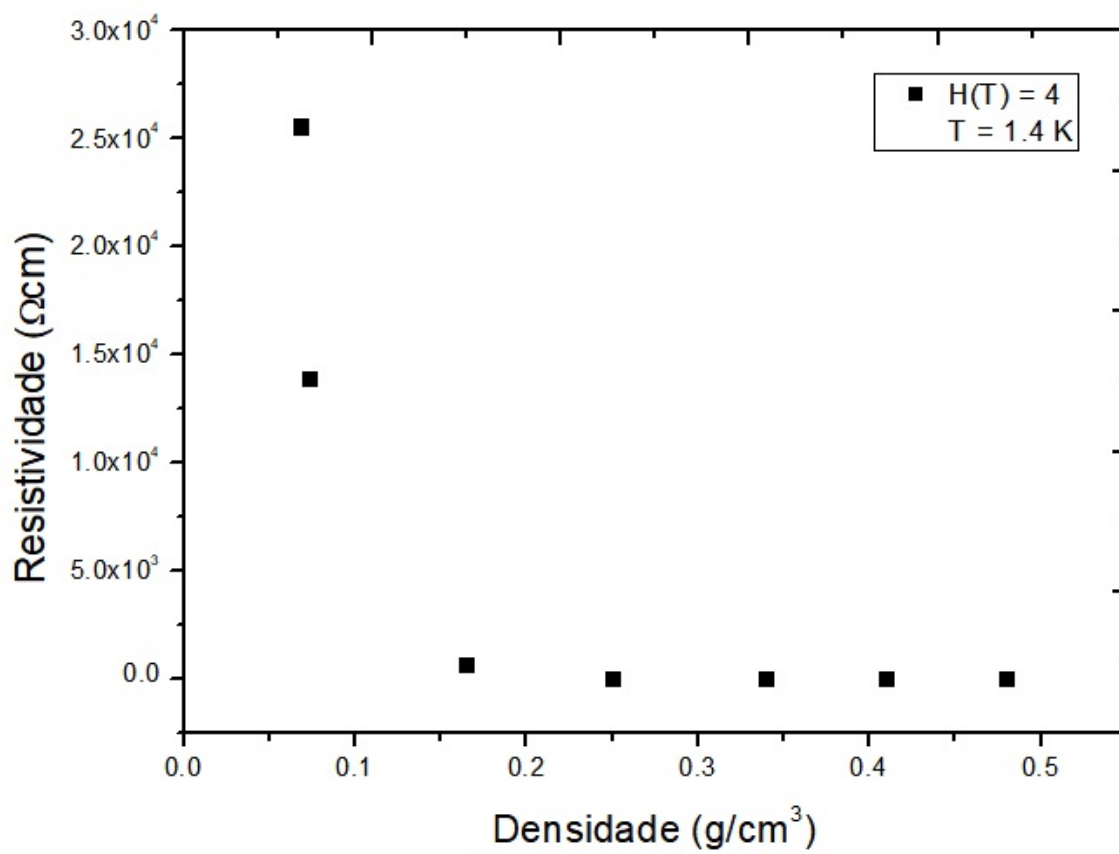
1. Carbon Black: Science And Technology, 2nd Ed. Revised And Expanded, Edited By Jean-Baptiste Donnet, Rood Chand Bansal And Meng-Jiao Wang: New York, Usa; Marcel Dekker, Inc (1993).
2. Cabot Corp. International Carbon Black Association. (2016). Guia Do Utilizador Do Negro De Fumo. Pdf. Disponível Em: <[Http://Www.Cabotcorp.De/ /Media/Files/Product-Stewardship/Industry-User- Guides/International-Carbon-Black-Association-Icba-User-Guide-Portuguese.Pdf](http://www.cabotcorp.de/media/files/product-stewardship/industry-user-guides/international-carbon-black-association-icba-user-guide-portuguese.pdf)> Acesso Em: 20 De Jul. De 2021.
3. Kurzböck, M., Wallner, G. M., Lang, R. W. (2012). Black Pigmented Polypropylene Materials For Solar Absorbers. *Energy Procedia*, 30, 438–445.
4. Khodabakhshi, S., Fulvio, P. F., Andreoli, E. (2020). Carbon Black Reborn: Structure And Chemistry For Renewable Energy Harnessing. *Carbon*. 5. Hori, M., Aoki, T., Ohira, Y., Yano, S., Hori, M., Aoki, T., Ohira, Y., Yano, S. (2001). New Type Of Mechanical Damping Composites Composed Of Piezoelectric Ceramics, Carbon Black And Epoxy Resin. *Composites. Part A, Applied Science And Manufacturing*, 32(2), 287-290.
6. Marcq, F., Demont, P., Monfraix, P., Peigney, A., Laurent, C., Falat, T., Courtade, F., Jamin, T. (2011). Carbon Nanotubes And Silver Flakes Filled Epoxy Resin For New Hybrid Conductive Adhesives. *Microelectronics And Reliability*, 51(7), 1230-1234.
7. Li, C., Liang, T., Lu, W., Tang, C., Hu, X., Cao, M., Liang, J. (2004). Improving The Antistatic Ability Of Polypropylene Fibers By Inner Antistatic Agent Filled With Carbon Nanotubes. *Composites Science And Technology*, 64(13-14), 2089-2096.
8. Chung, D. D. L. (2001). Review: Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness Of Carbon Materials. *Carbon*, 39(2), 279-285.
9. Ryan, M. A., Shevade, A. V., Zhou, H., Homer, M. L. (2004). Polymer-Carbon Black Composite Sensors In An Electronic Nose For Air-Quality Monitoring. *Mrs Bulletin*, 29(10), 714-719. Pmid:15991400.
10. Al-Saleh, M. H., Sundararaj, U. (2008). Nanostructured Carbon Black Filled Polypropylene/Polystyrene Blends Containing Styrene–Butadiene–Styrene Copolymer: Influence Of Morphology On Electrical Resistivity. *European Polymer Journal*, 44(7), 1931-1939.
11. Broadbent, S. And Hammersley, J. (1957) Percolation Processes I. Crystals And Mazes. *Proceedings Of The Cambridge Philosophical Society*, 53, 629-641.
12. Bruggeman, D. A. G. (1935). Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten Von Heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten Und Leitfähigkeiten Der Mischkörper Aus Isotropen Substanzen. *Annalen Der Physik*, 416(7), 636- 664.
13. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation And Conduction. *Reviews Of Modern Physics*, 45(4), 574-588.
14. Kogut, P. M., Straley, J. P. (1979). Distribution-Induced Non-Universality Of The Percola-

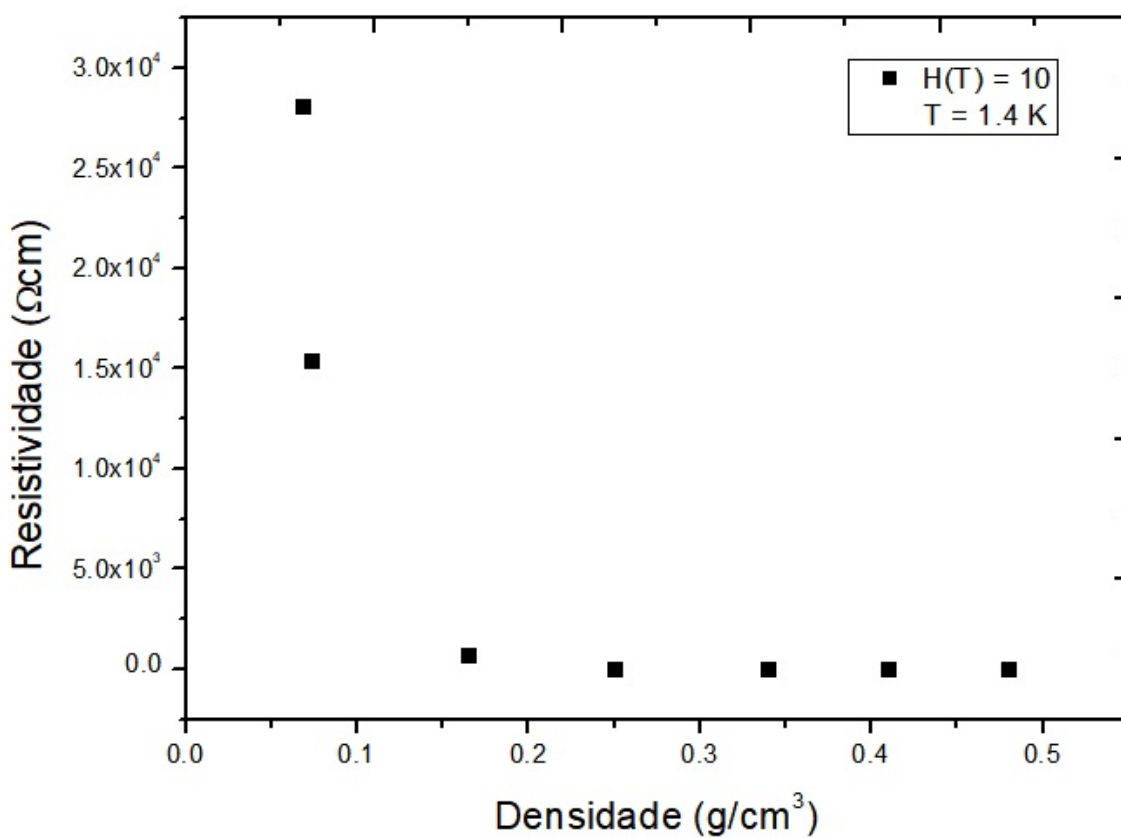
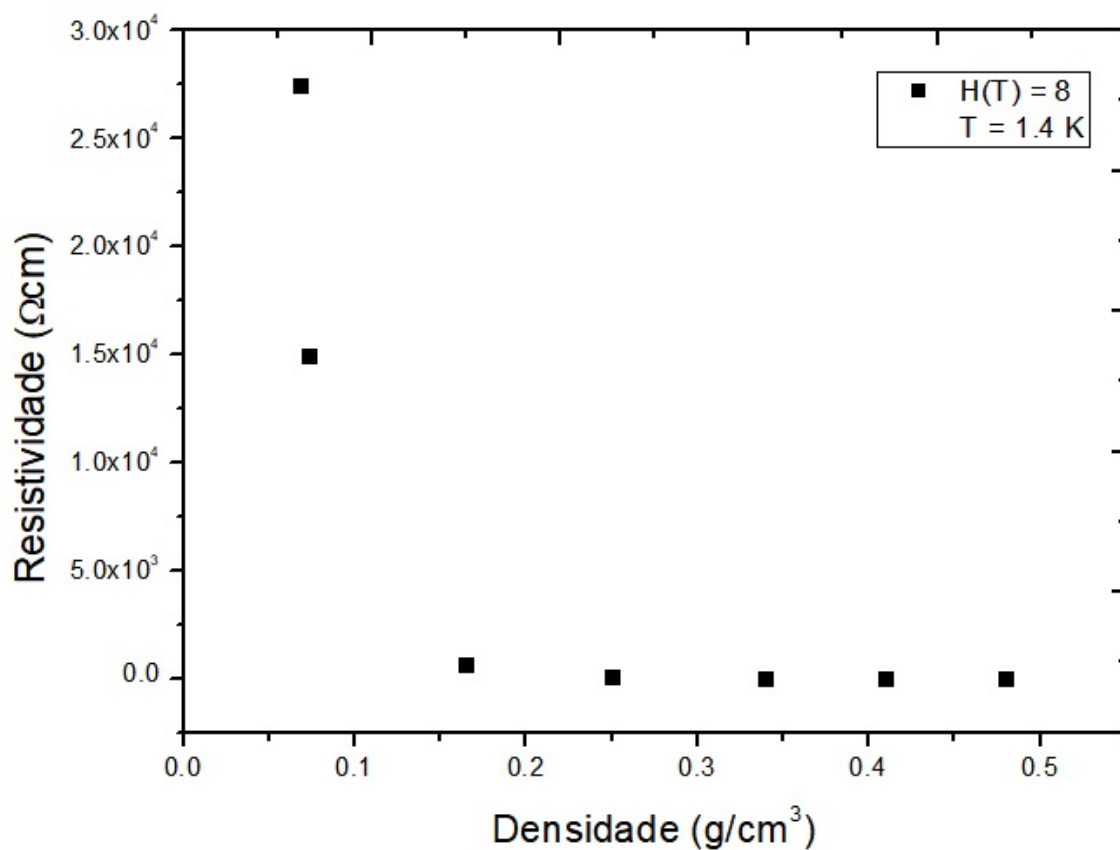
- tion Conductivity Exponents. *Journal Of Physics C: Solid State Physics*, 12(11), 2151–2159.
15. Straley, J. P. (1982). Threshold Behaviour Of Random Resistor Networks: A Synthesis Of Theoretical Approaches. *Journal Of Physics C: Solid State Physics*, 15(11), 2333–2341.
 16. Halperin, B. I., Feng, S., Sen, P. N. (1985). Differences Between Lattice And Continuum Percolation Transport Exponents. *Physical Review Letters*, 54(22), 2391– 2394.
 17. D. Stauffer, A Aharony. *Introduction To Percolation Theory*: London, United Kingdom, Taylor Francis (1992)
 18. Kogut, P. M., Straley, J. P. (1979). Distribution-Induced Non-Universality Of The Percolation Conductivity Exponents. *Journal Of Physics C: Solid State Physics*, 12(11), 2151–2159.
 19. Feng, S., Halperin, B. I., Sen, P. N. (1987). Transport Properties Of Continuum Systems Near The Percolation Threshold. *Physical Review B*, 35(1), 197–214.
 20. Van Der Putten, D., Moonen, J. T., Brom, H. B., Brokken-Zijp, J. C. M., Michels, M. A. J. (1992). Evidence For Superlocalization On A Fractal Network In Conductive Carbon-Black–Polymer Composites. *Physical Review Letters*, 69(3), 494– 497.
 21. Balberg, I., Bozowski, S. (1982). Percolation In A Composite Of Random Stick- Like Conducting Particles. *Solid State Communications*, 44(4), 551–554.
 22. Heaney, M. B. (1997). Electrical Transport Measurements Of A Carbon-Black— Polymer Composite. *Physica A: Statistical Mechanics And Its Applications*, 241(1-2), 296–300.
 23. Balberg, I. (2002). A Comprehensive Picture Of The Electrical Phenomena In Carbon Black–Polymer Composites. *Carbon*, 40(2), 139–143.
 24. Rubin, Z., Sunshine, S. A., Heaney, M. B., Bloom, I., Balberg, I. (1999). Critical Behavior Of The Electrical Transport Properties In A Tunneling-Percolation System. *Physical Review B*, 59(19), 12196–12199.
 25. Miller, A., Abrahams, E. (1960). Impurity Conduction At Low Concentrations. *Physical Review*, 120(3), 745–755.
 26. N. Mott, *Conduction In Non-Crystalline Materials*, Oxford Science Publications 1993.
 27. B. I. Shklovskii, A. L. Efros, *Electronic Properties Of Doped Semiconductors*, (Springer-Verlag Series In Solid-State Sciences, 1984)
 28. *Carbon Black: Science And Technology*, 2nd Ed. Revised And Expanded, Edited By Jean-Baptiste Donnet, Rood Chand Bansal And Meng-Jiao Wang: New York, Usa; Marcel Dekker, Inc (1993)
 29. *Carbon Black For Plastics Applications*, Cabot Corp, Cd - Catálogo De Produtos (2006); Site: [Www.Cabot-Corp.Com](http://www.Cabot-Corp.Com)
 - 30 Coelho, Letícia Gonçalves Nunes. *Modelo De Percolação E Condutividade Elétrica De Compostos De Poliuretana-Negro De Fumo*. Dissertação De Mestrado. Minas Gerais. 53p. 2004.
 31. Mitsubishi Carbon Black. Mitsubishi Chemical: Application Examples Of Carbon Black, C2006. Página Inicial. Disponível Em: <[Http://Www.Carbonblack.Jp/En/Cb/Youto.Html](http://www.carbonblack.jp/en/cb/youto.html)>. Acesso Em: 20 De Jul. De 2021
 32. Ferreira, Alex Aparecido. *Comportamento Percolativo Do Transporte Elétrico Em Negro*

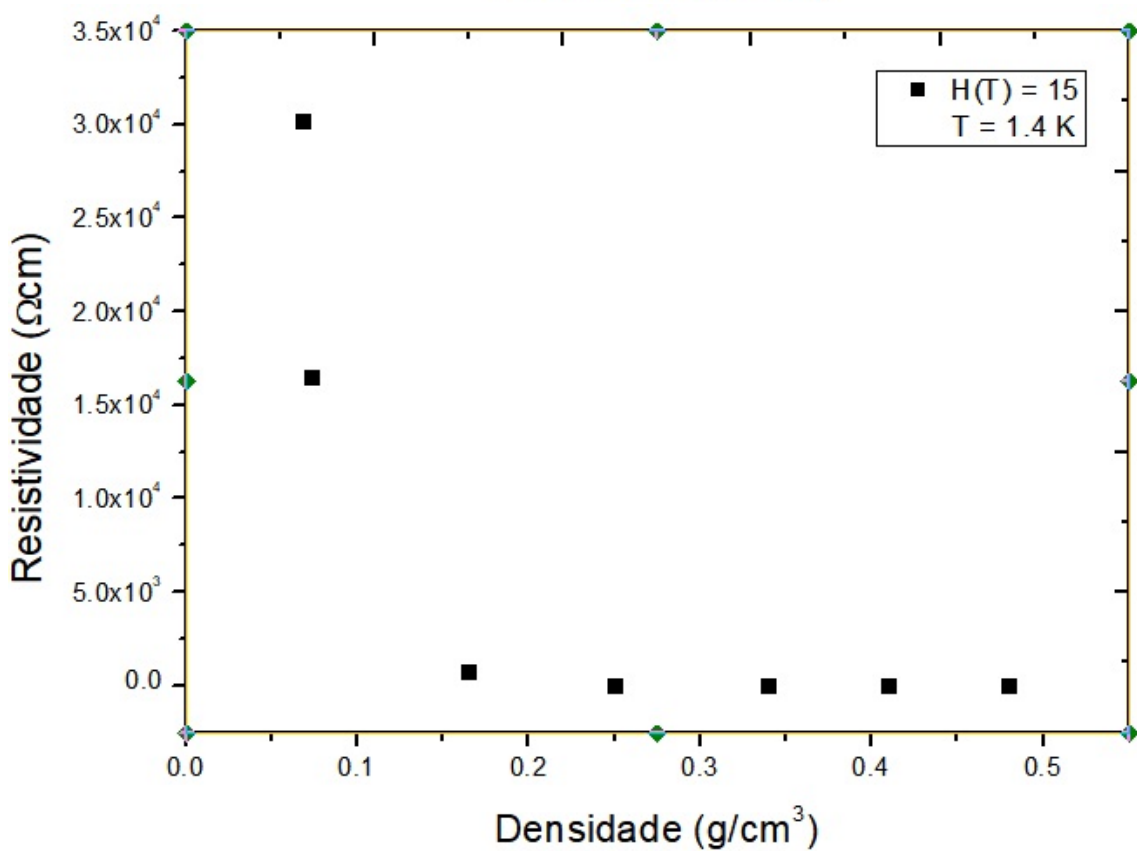
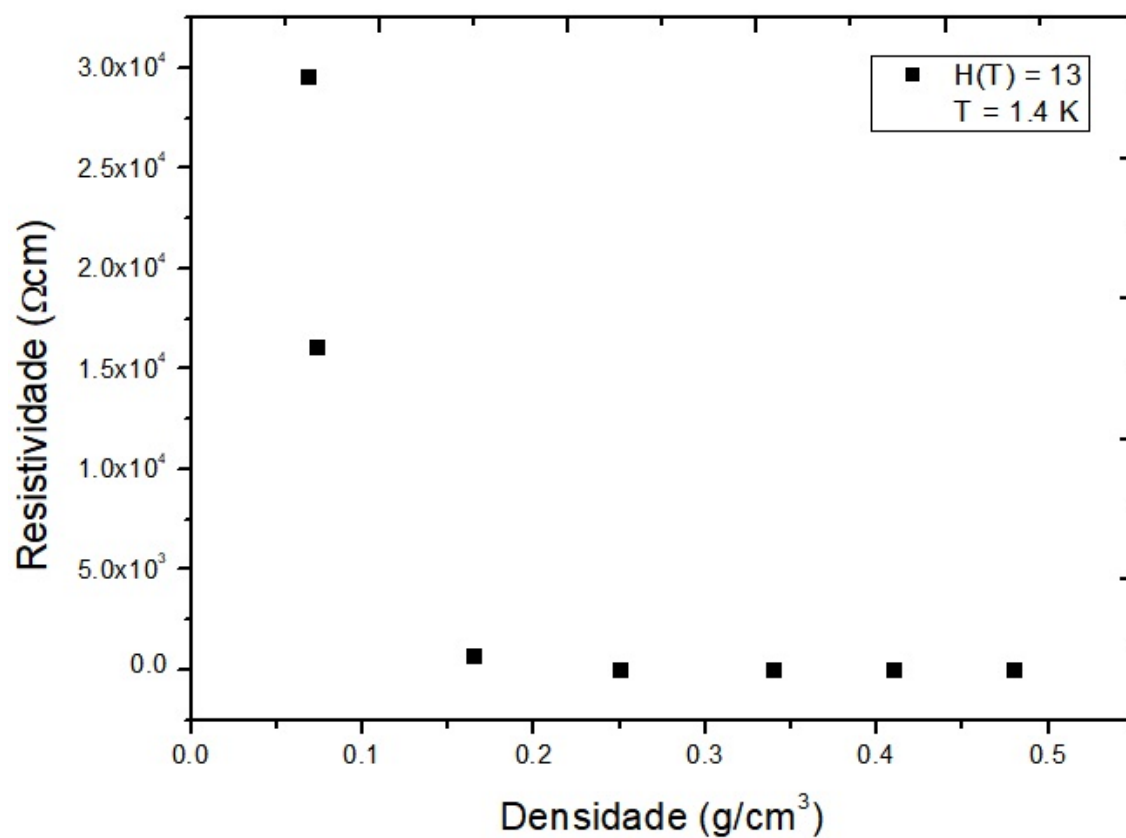
- De Fumo. Dissertação De Mestrado. Minas Gerais. 68p. 2007
33. Coelho, Paulo Henrique Da Silva Leite; Morales, Ana Rita. Modelos De Percolação Elétrica Aplicados Para Compósitos Poliméricos Condutores. *Polímeros*, [S.L.], V. 27, N., P. 1-13, 13 Mar. 2017. Fapunifesp (Scielo).
34. Beer, T., Enting, I. G. (1990). Fire Spread And Percolation Modelling. *Mathematical And Computer Modelling*, 13(11), 77–96.
35. Hunt, A. G., Sahimi, M. (2017). Flow, Transport, And Reaction In Porous Media: Percolation Scaling, Critical-Path Analysis, And Effective Medium Approximation. *Reviews Of Geophysics*, 55(4), 993–1078. Doi:10.1002/2017rg000558
36. Bonasera A And Zhang S(2020) Chaos, Percolation And The Coronavirus Spread. *Front. Phys.* 8:171.
37. Oliveira, G. Early Epidemic Spread, Percolation And Covid-19. *J. Math. Biol.* 81, 1143–1168 (2020).

Anexos

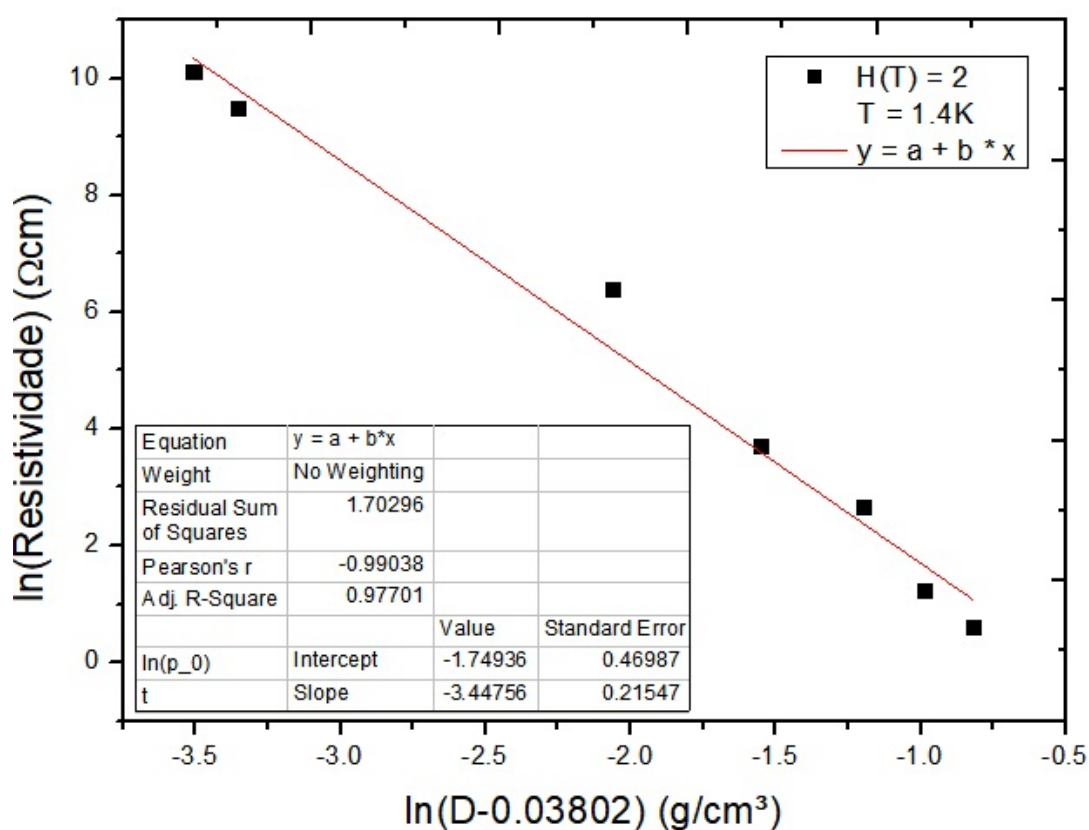
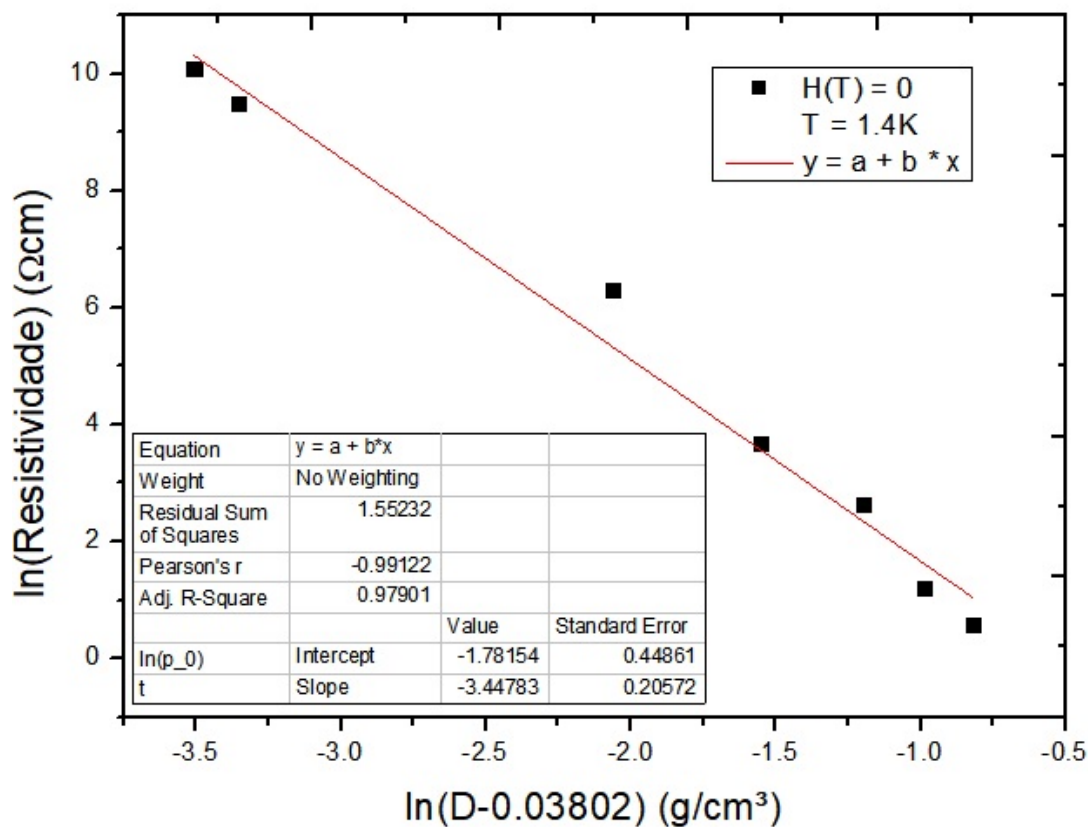
ANEXO A – Gráficos da resistividade em função da densidade para $T = 1,4$ K

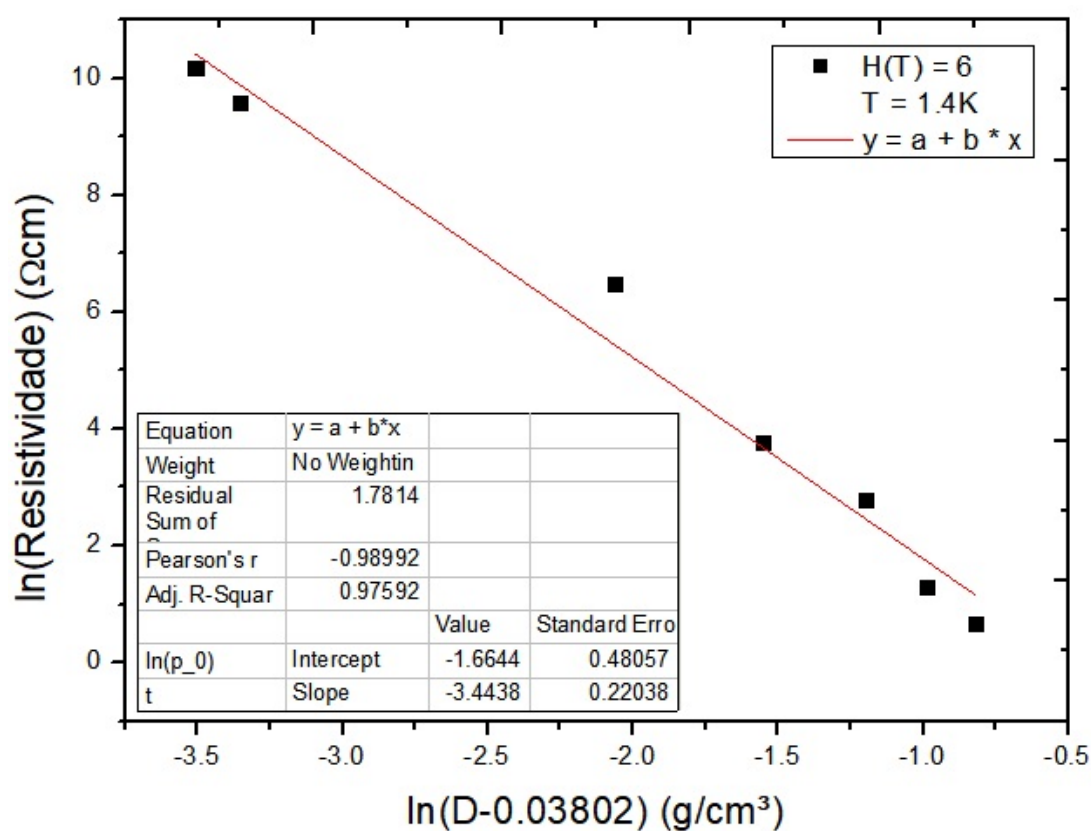
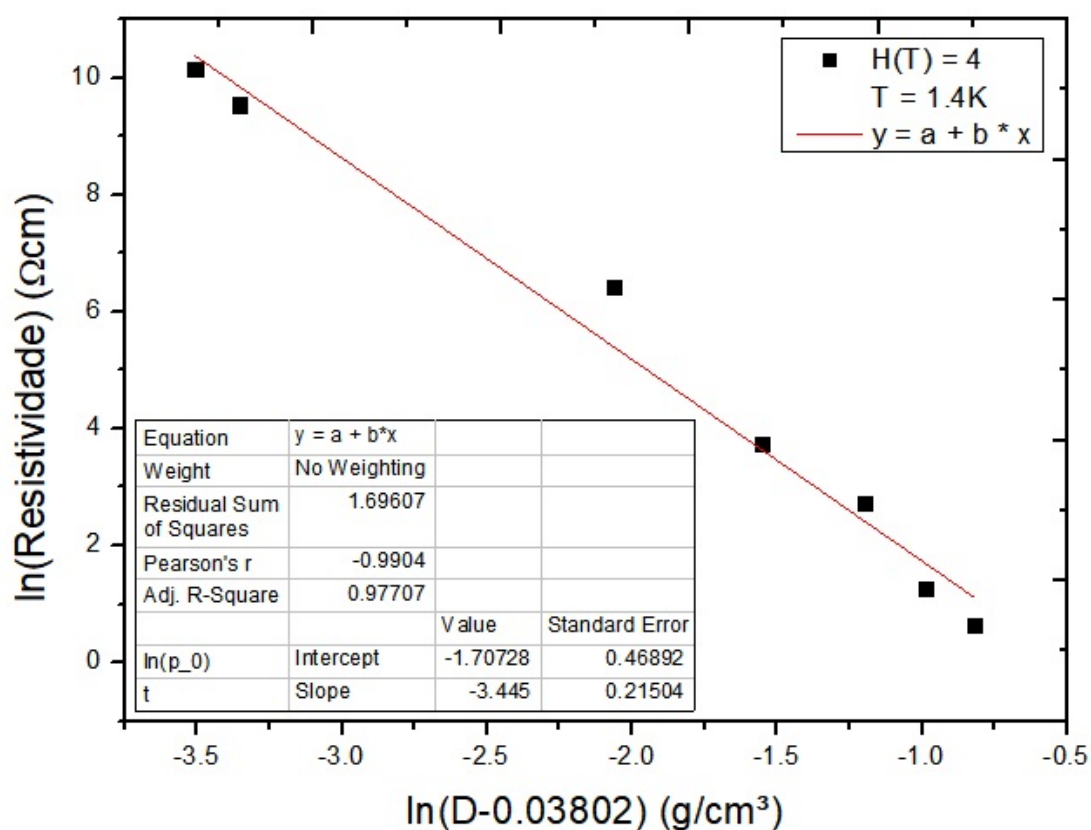


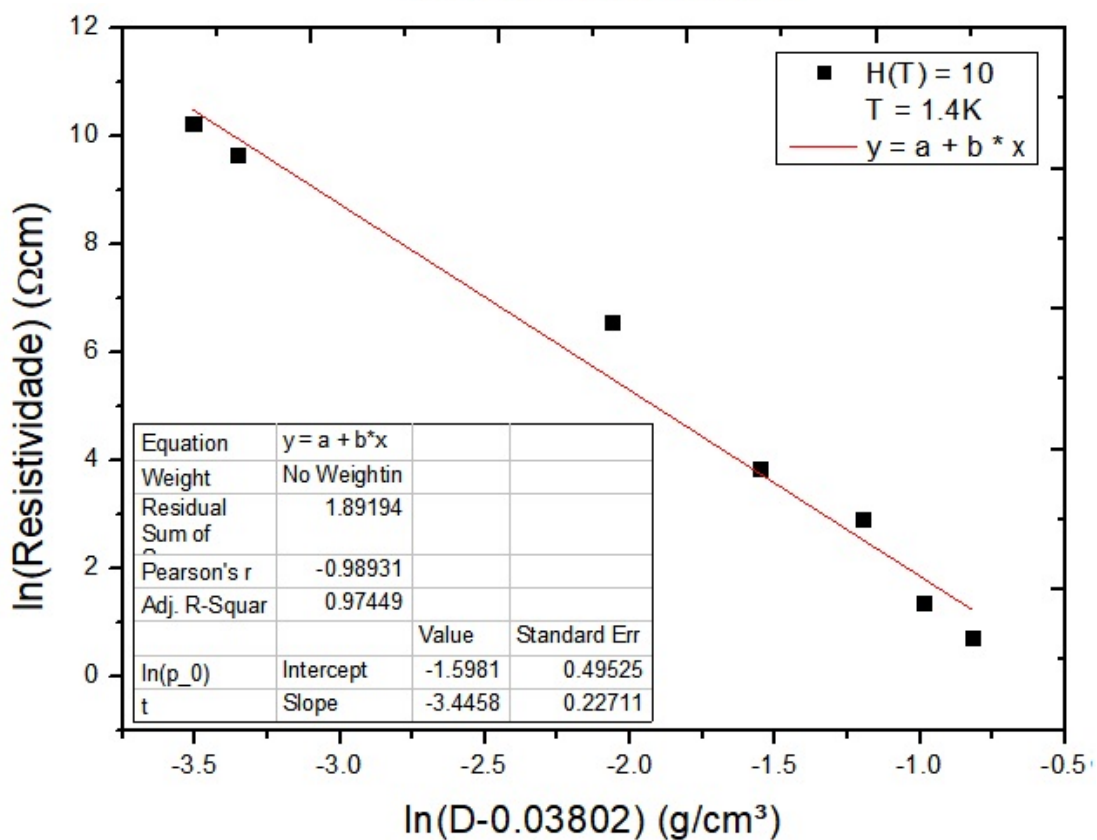
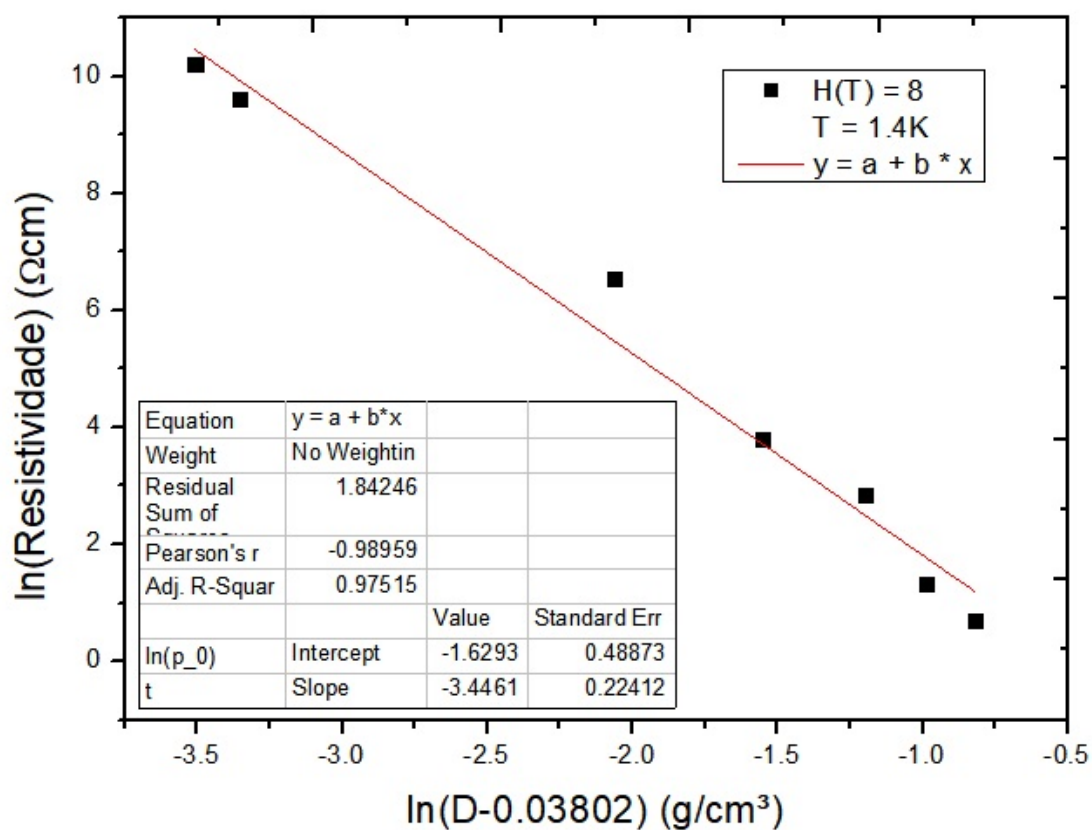


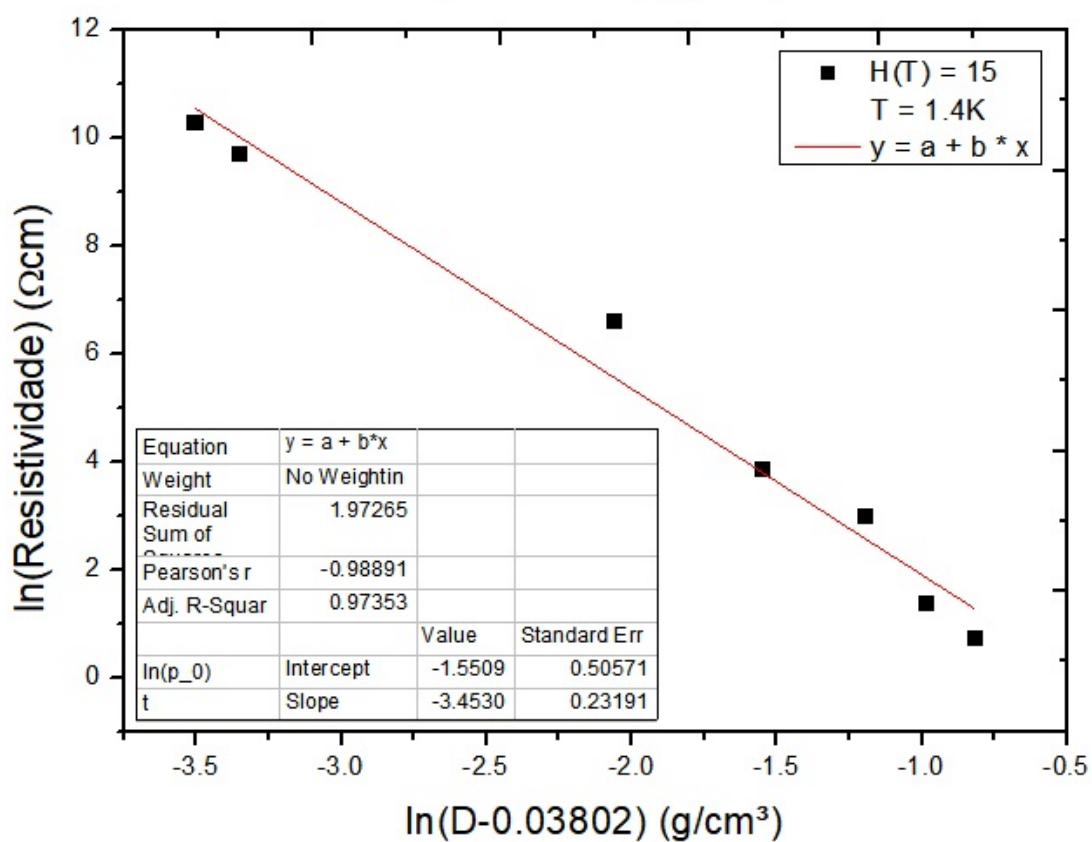
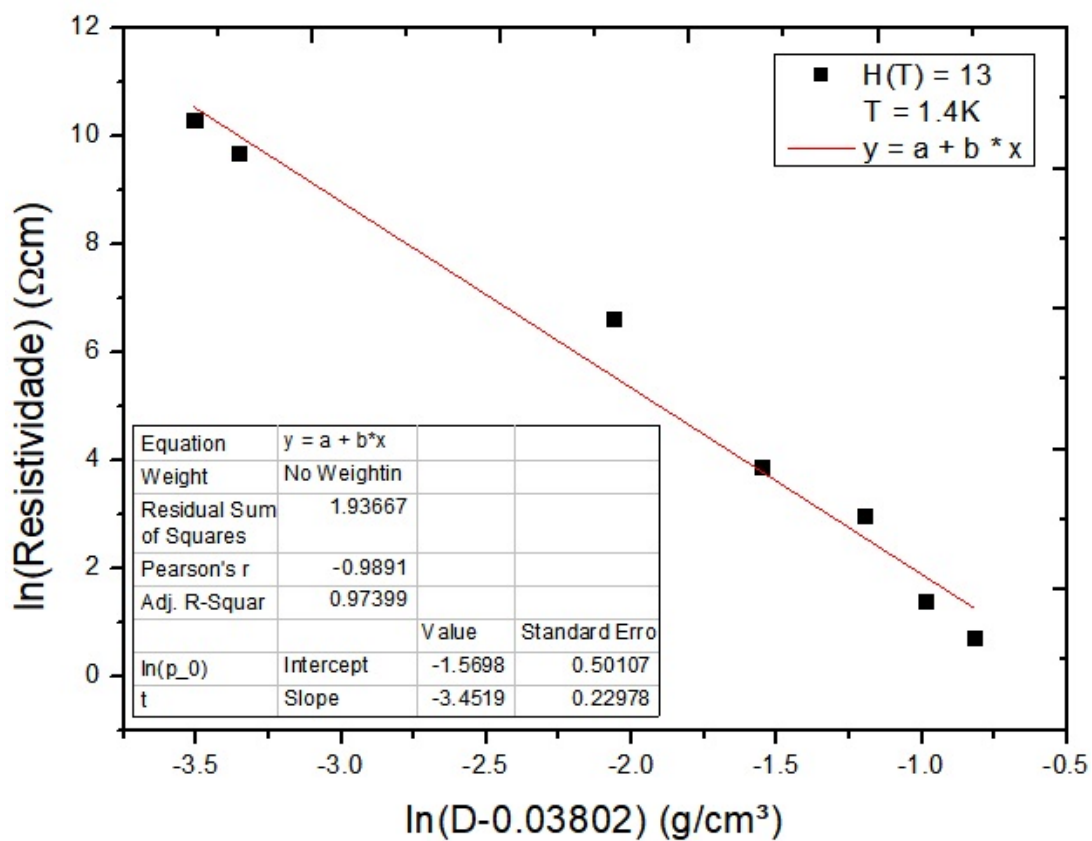


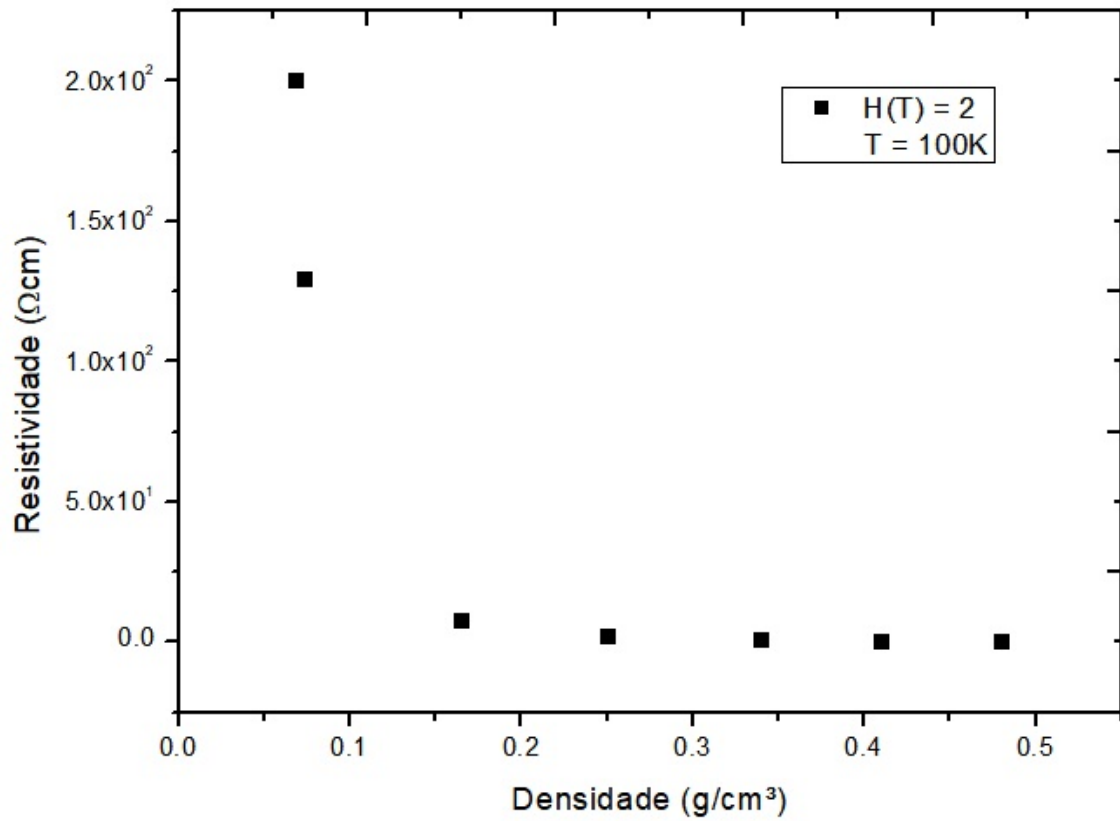
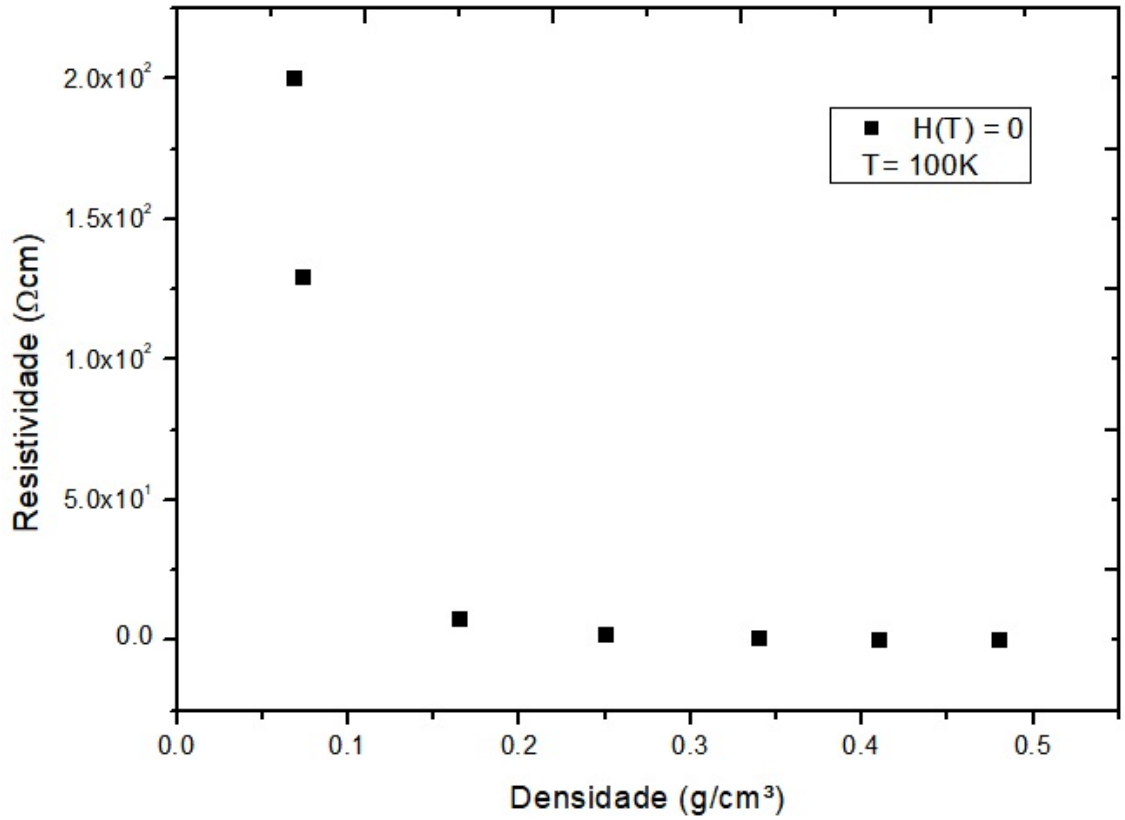
ANEXO B – Gráficos de $\ln(\text{resistividade})$ em função do $\ln(\text{densidade} - 0,03802)$ para $T = 1,4$ K

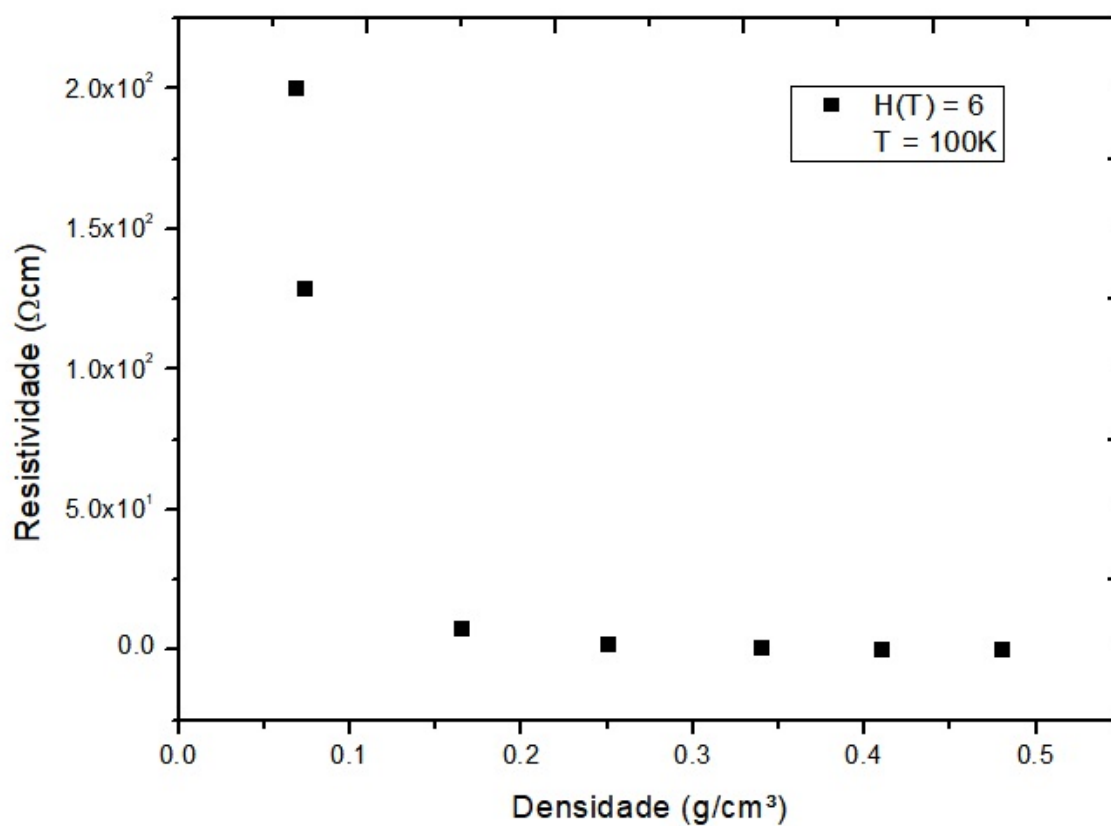
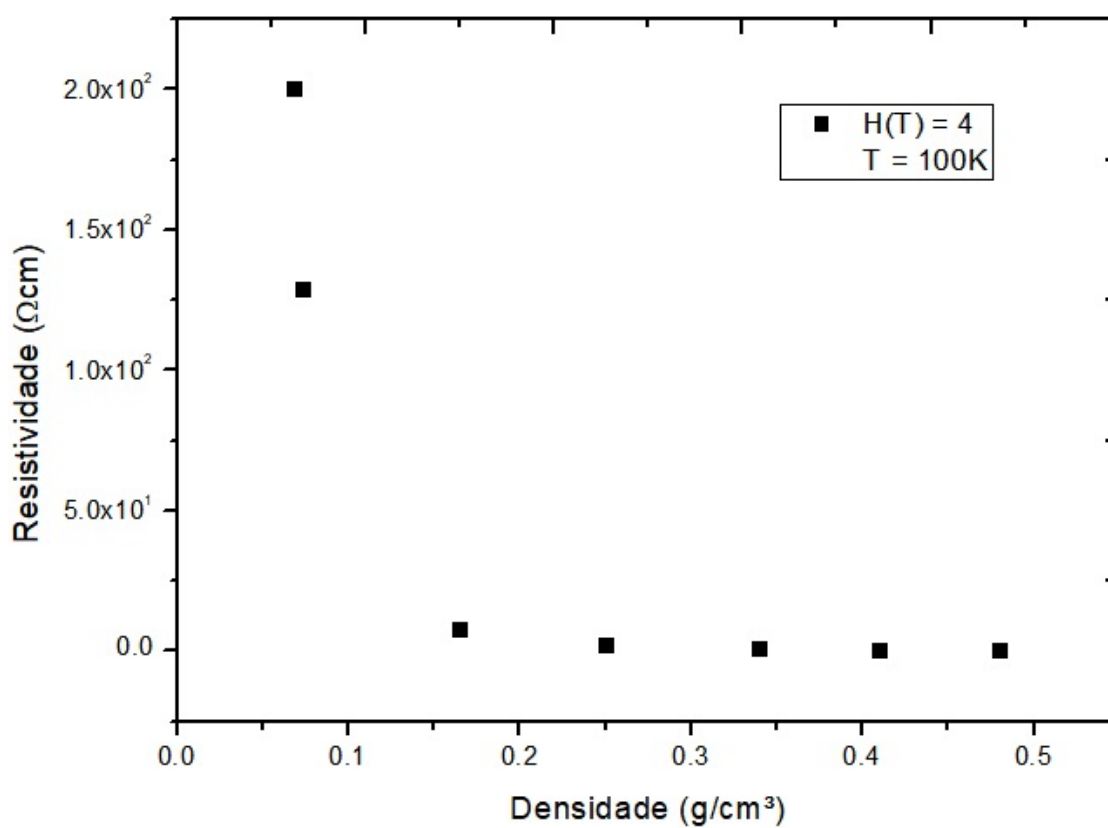


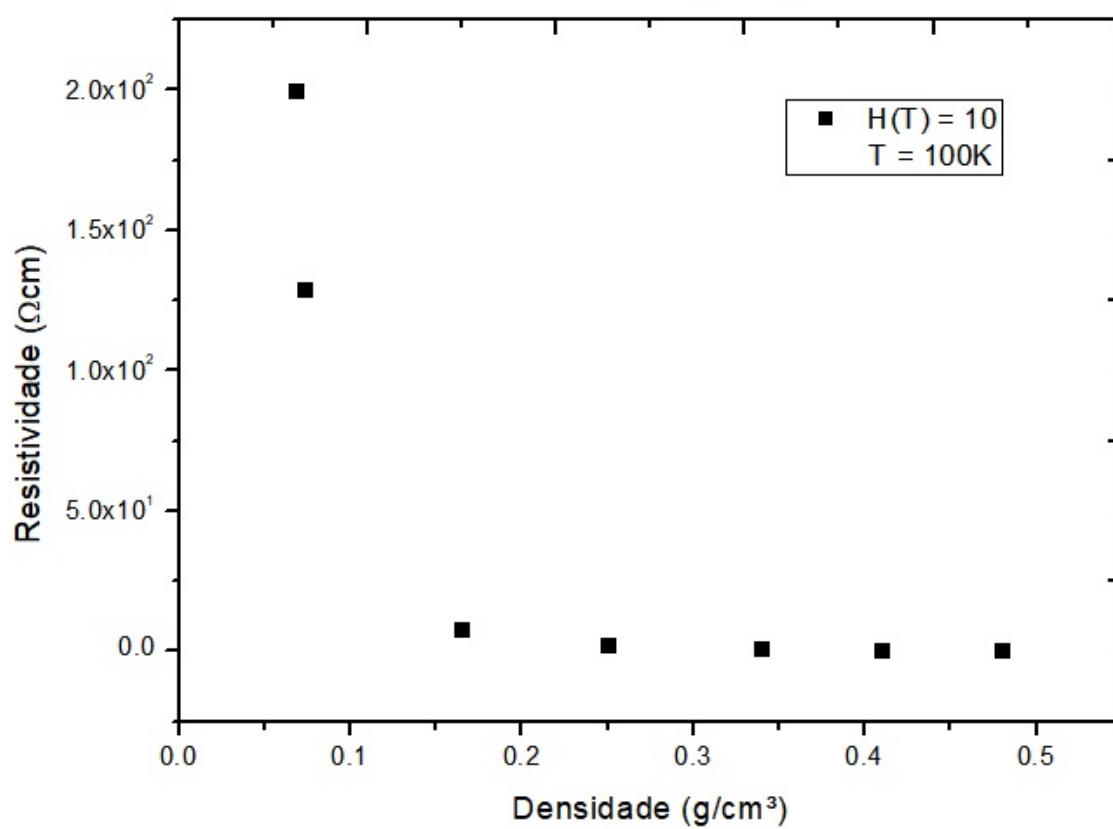
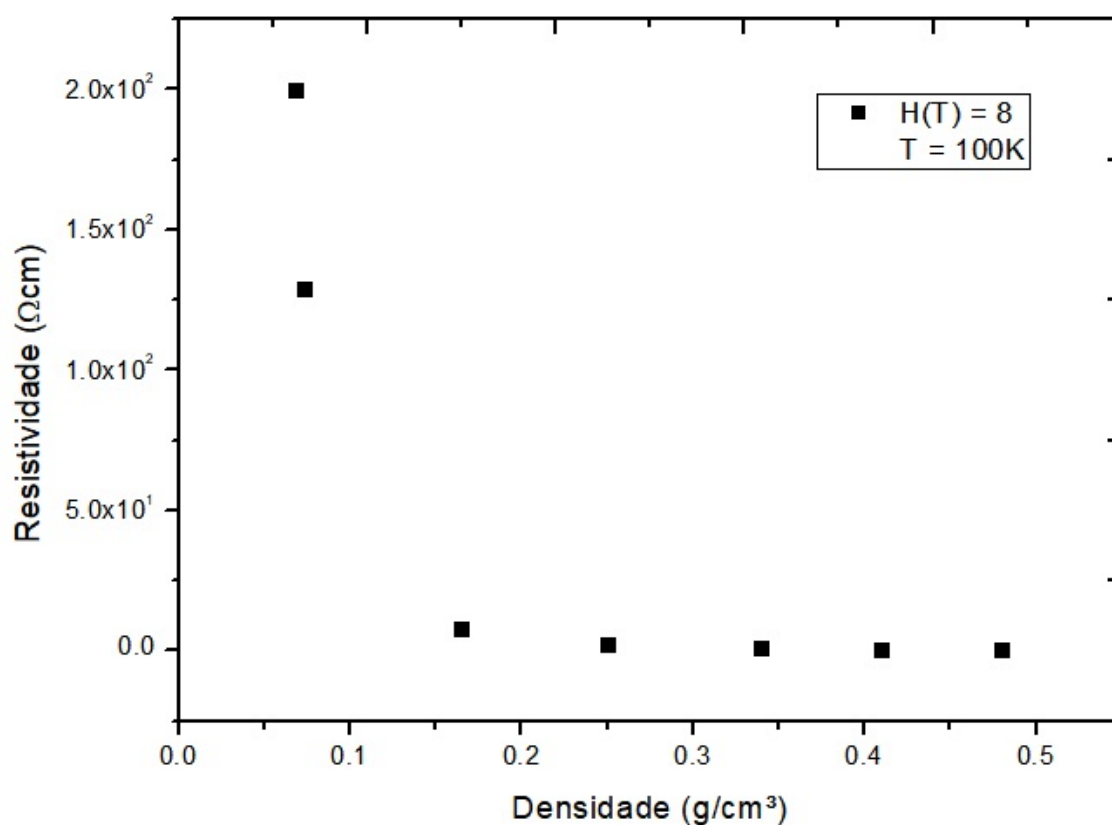


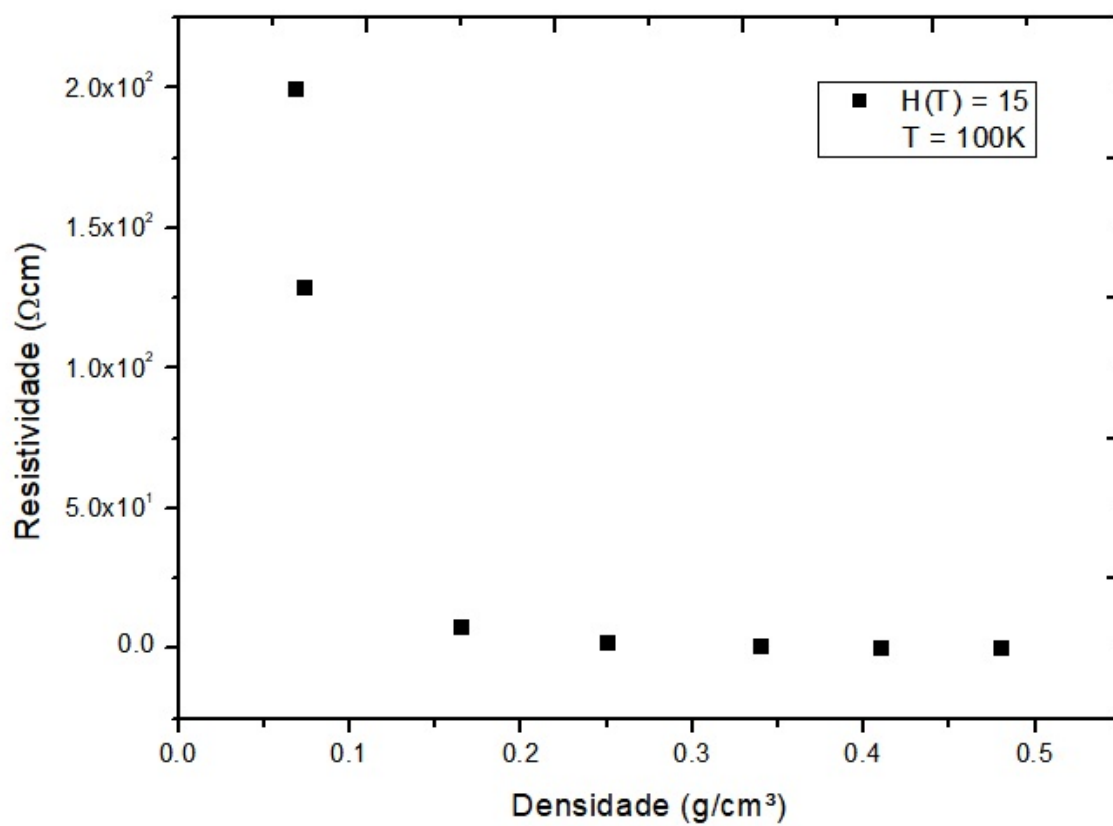
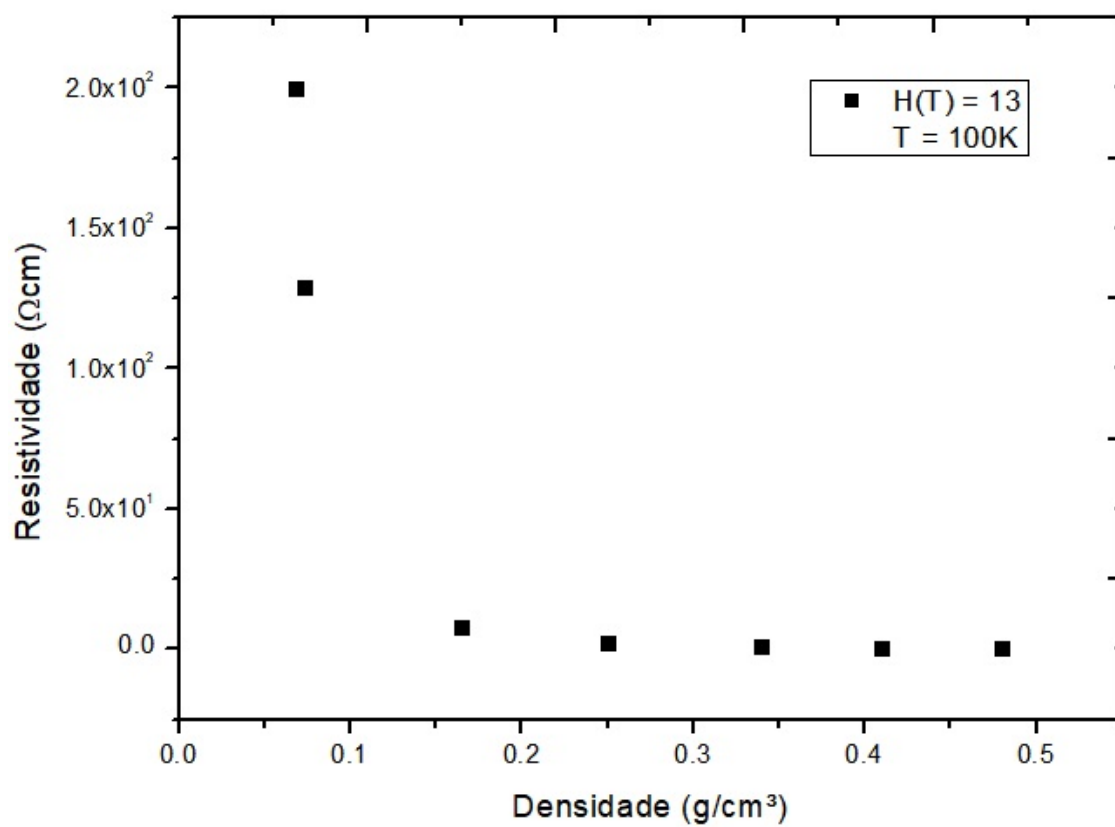




ANEXO C – Gráficos da resistividade em função da densidade para $T = 100\text{ K}$ 







ANEXO D – Gráficos de $\ln(\text{resistividade})$ em função do $\ln(\text{densidade} - 0,03802)$ para $T = 100\text{ K}$

