



Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão  
Instituto de Física e Química  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



AIRTON MODESTO DA CUNHA

**MODELO PEDAGÓGICO DE RESISTORES ELÉTRICOS PARA DESCREVER  
FRATURAS EM SISTEMAS FÍSICOS**

CATALÃO  
2018



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:                     Dissertação         Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

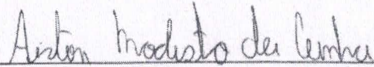
Nome completo do autor: *Airton Modesto da Cunha*

Título do trabalho: *Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever fraturas em sistemas físicos*

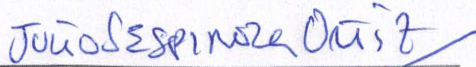
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM                     NÃO<sup>1</sup>

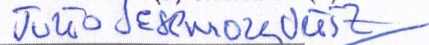
Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>



Data: 28/08/2018

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.  
Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

**Airton Modesto da Cunha**

**Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever  
fraturas em sistemas físicos**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em Ensino de  
Física, pelo Programa de Pós-Graduação em en-  
sino de física da Universidade Federal de Goiás  
- UFG.

Orientador: Prof. Dr. Julio Santiago Espinoza  
Ortiz

Catalão

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Modesto da Cunha, Airton

Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever fraturas em sistemas físicos [manuscrito] / Airton Modesto da Cunha. - 2018. CXXVII, 128 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Santiago Espinoza Ortiz.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Física e Química, Catalão, Programa de Pós Graduação em Ensino de Física, Catalão, 2018.

Bibliografia. Anexos.

Inclui fotografias, gráfico, tabelas.

1. Fraturas em sólidos. 2. Lei de Hooke. 3. Rede de resistores. 4. Sistemas ôhmicos. 5. Fenômenos críticos. I. Santiago Espinoza Ortiz, Julio, orient. II. Título.

CDU 53



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação  
Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



Relatório de Defesa de Dissertação  
Candidato: **Airton Modesto da Cunha**

Aos 09/08/2018 às 14:00 horas, realizou-se na Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão a Defesa de Dissertação de Mestrado sob o título: **MODELO PEDAGÓGICO DE RESISTORES ELÉTRICOS PARA DESCREVER FRATURAS EM SISTEMAS FÍSICOS**, pelo candidato: **Airton Modesto da Cunha**. Ao final dos trabalhos a banca examinadora reuniu-se em sessão reservada para o julgamento tendo os membros chegado ao seguinte resultado:

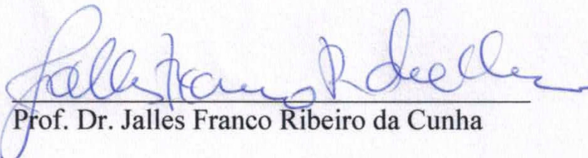
Participantes da Banca:	Função	Instituição
Profª. Drª. Ana Rita Pereira	Presidente	UFG
Prof. Dr. Jalles Franco Ribeiro da Cunha	Titular	UFG
Profª. Drª. Lara Fernandes dos Santos Lavelli	Titular	Externo UFSC

Resultado Final: Aprovado.


Parecer da Comissão Julgadora:

Encerrada a sessão reservada, o presidente informou ao público presente o resultado. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada e, para constar eu Camila Regina Silva representante do Programa de Pós Graduação em Ensino de Física lavrei o presente relatório que será assinado por mim e pelos membros da banca examinadora.

  
Profª. Drª. Ana Rita Pereira

  
Prof. Dr. Jalles Franco Ribeiro da Cunha

  
Profª. Drª. Lara Fernandes dos Santos Lavelli

  
Representante do PPG Camila Regina Silva

*Este trabalho é dedicado à todos aqueles  
que durante toda uma existência sonharam em se tornar cientistas.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha esposa, meus pais, amigos e orientador que não mediram esforços para que este trabalho fosse perfeito e trouxesse algo de novo ao ensino de ciências nesse país. País este, que ainda possui grande parte da população sem acesso a educação de qualidade.



## RESUMO

A presente dissertação é resultado de nosso produto educacional, “Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever fraturas em sistemas físicos”, trabalhado em uma turma do terceiro ano do ensino médio da Escola Estadual Prof. Marcolino de Barros do município de Patos de Minas-MG. No qual, apresentamos um modelo pedagógico simples com a finalidade de estudar o complexo processo de rupturas em sistemas físicos. Para tanto, desenvolvemos um modelo experimental munido de sua contraparte teórica onde consideramos um sistema de resistores elétricos sujeito a uma diferença de potencial e analisamos a corrente que passa através do sistema em função da remoção aleatória dos componentes resistivos. Usamos uma placa de circuitos, fonte de tensão estabilizada em uma diferença de potencial pré-estabelecida e uma malha de resistores com algumas unidades de ohms cada. Realizadas as experiências propostas obtivemos apropriados dados experimentais e a partir destes foram gerados gráficos com os quais são mostrados a dependência da corrente através do circuito com a interrupção das junções. Levando em consideração que este sistema se comporta como um sistema ôhmico, o modelo é usado para estudar vários conceitos físicos relevantes. Como é o caso de um sólido elástico sujeito a deformações do tipo lei de Hooke, sendo este então um modelo de caráter bem amplo.

**Palavras-chaves:** Fraturas em Sólidos. Lei de Hooke. Rede de resistores. Sistemas ôhmicos. Fenômenos críticos.



## ABSTRACT

The present dissertation is the result of the educational, “Teaching model of electrical resistors to describe fractures in physical systems”, product worked in a class of the third year of high school of the State School Prof. Marcolino de Barros of the municipality of Patos de Minas-MG. In which, we present a simple pedagogical model with the purpose of studying the complex process of ruptures in physical systems. For this, we developed an experimental model together with its theoretical counterpart where we consider a system of electric resistors network subject to a potential difference and analyze the current that passes through the system as a function of the random removal of their resistive components. We use a circuit board, voltage source stabilized at a pre-established potential difference, and a resistor network with a few ohms units each. After the proposed experiments are executed, we obtained appropriate experimental data and from these graphs are generated with which the dependence of the current through the circuit with the interruption of the joints is shown. Taking into account that this system behaves as an ohmic system, the model is used to study several relevant physical concepts. As is the case of an elastic solid subject to Hooke’s law-like deformations, this is then a very broad model.

**Key-words:** Fractures in solids. Hooke’s Law. Resistor’s networks. Ohmic systems. Critical phenomena.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manuscrito de Leonardo Da Vinci sobre resistências de fios de ferro . . . . .	23
Figura 2 – Desenho de Galileu representando a resistência de uma corda . . . . .	24
Figura 3 – Ilustração de Galileu sobre a resistência mecânica de vigas . . . . .	25
Figura 4 – Desenho de Galileu sobre dependência da forma nas fraturas . . . . .	25
Figura 5 – Ilustração representando forças axiais e tensão . . . . .	26
Figura 6 – Esquema ilustrativo de tensão em pequena área . . . . .	27
Figura 7 – Desenho representando as tensões de cisalhamento . . . . .	28
Figura 8 – Diagrama representando tensões por flexão . . . . .	28
Figura 9 – Gráfico da força interatômica em função do deslocamento . . . . .	29
Figura 10 – Desenho esquemático representando a deformação por tração . . . . .	30
Figura 11 – Curva Tensão-deformação . . . . .	31
Figura 12 – Gráfico de tensão-deformação . . . . .	32
Figura 13 – Gráfico representando as curvas de tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis . . . . .	34
Figura 14 – Representação de três diferentes tipos de fraturas: a) fratura dúctil, b) semi-dúctil e c) frágil . . . . .	34
Figura 15 – Esquema demonstrando o processo de fratura em um material dúctil . . . . .	35
Figura 16 – Diagrama representando cinco falhas pontuais . . . . .	36
Figura 17 – Defeito de linha em cunha . . . . .	37
Figura 18 – Ilustração esquemática de uma discordância helicoidal . . . . .	38
Figura 19 – Desenho representando uma discordância mista . . . . .	38
Figura 20 – Micrografia eletrônica de alta resolução . . . . .	39
Figura 21 – Foto do local do aquecimento na nave Challenger instantes antes do desastre	40
Figura 22 – Imagem do navio-tanque que se quebrou de maneira frágil . . . . .	40
Figura 23 – Esquema e Fotografia eletrônica da propagação de trinca transgranular . . . . .	41
Figura 24 – Esquema e Fotografia eletrônica da propagação de trinca intergranular . . . . .	41
Figura 25 – Desenho esquemático representando aglomerados e linhas de percolação . . . . .	43
Figura 26 – Ilustração representando a percolação e gráfico do limiar de percolação . . . . .	44
Figura 27 – Esquema elétrico mostrando o limiar de percolação em rede de resistores simulada em computador . . . . .	44
Figura 28 – Fraturas: dúctil e frágil feitas pelos alunos . . . . .	47
Figura 29 – Placa com resistores em rede . . . . .	48
Figura 30 – Alunos realizando o experimento . . . . .	49
Figura 31 – Alunos realizando o experimento . . . . .	49
Figura 32 – Alunos realizando o experimento . . . . .	50
Figura 33 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 1 . . . . .	50

Figura 34 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 2 . . .	51
Figura 35 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 3 . . .	51
Figura 36 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 4 . . .	52
Figura 37 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 5 . . .	52
Figura 38 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 6 . . .	53
Figura 39 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 7 . . .	53
Figura 40 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 8 . . .	54
Figura 41 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 9 . . .	54
Figura 42 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 10 . . .	55
Figura 43 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 11 . . .	55
Figura 44 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 12 . . .	56
Figura 45 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 13 . . .	56
Figura 46 – Gráfico representando as curvas de tensão deformação para diferentes metais	57
Figura 47 – Esquema representando uma placa e seu gráfico de condutividade e ruptura .	58
Figura 48 – Gráfico com as curvas de todos os grupos . . . . .	59
Figura 49 – Gráfico de todos os parâmetros com respectivos desvios padrões . . . . .	59
Figura 50 – Respostas do aluno-1 . . . . .	66
Figura 51 – Respostas da página 2 do aluno-1 . . . . .	67
Figura 52 – Respostas do aluno-2 . . . . .	68
Figura 53 – Respostas da página 2 do aluno-2 . . . . .	69
Figura 54 – Respostas do aluno-3 . . . . .	70
Figura 55 – Respostas da página 2 do aluno-3 . . . . .	71
Figura 56 – Respostas do aluno-4 . . . . .	72
Figura 57 – Respostas da página 2 do aluno-4 . . . . .	73
Figura 58 – Respostas da página 1 do aluno1 - Errata: na questão (1) a termo “rede” deve ser entendido como uma malha composta por todos os resistores . . . . .	74
Figura 59 – Respostas da página 2 do aluno1 . . . . .	75
Figura 60 – Respostas da página 1 do aluno2 . . . . .	76
Figura 61 – Respostas da página 2 do aluno2 . . . . .	77
Figura 62 – Respostas da página 1 do aluno3 . . . . .	78
Figura 63 – Respostas da página 2 do aluno3 . . . . .	79
Figura 64 – Respostas da página 1 do aluno4 . . . . .	80
Figura 65 – Respostas da página 2 do aluno4 . . . . .	81

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Resultado quantitativo da sondagem . . . . .	45
Tabela 2 – Resultado do questionário final . . . . .	60



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>APRENDIZAGEM . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>FÍSICA DAS FRATURAS . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Primeiras percepções sobre resistências dos materiais . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Causas e processo de fraturas . . . . .</b>	<b>26</b>
3.2.1	Tensões $\sigma$ . . . . .	26
3.2.2	Tensão axial . . . . .	26
3.2.3	Tensões de cisalhamento . . . . .	27
3.2.4	Tensão por flexão . . . . .	28
3.2.5	Deformação $\varepsilon$ . . . . .	28
3.2.6	Módulo de Elasticidade $M_\varepsilon$ . . . . .	29
3.2.7	Relevância da lei de Hooke . . . . .	29
3.2.8	Módulo de Young . . . . .	30
3.2.9	Curva de tensão-deformação . . . . .	30
3.2.10	Ductilidade e fragilidade . . . . .	33
<b>3.3</b>	<b>Defeitos em sólidos . . . . .</b>	<b>35</b>
3.3.1	Defeito de ponto . . . . .	35
3.3.2	Defeito de linha . . . . .	37
3.3.3	Defeitos Planares . . . . .	37
<b>3.4</b>	<b>Processo de fraturas . . . . .</b>	<b>39</b>
3.4.1	Percolação . . . . .	42
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Sondagem . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Sobre as aulas teóricas e práticas . . . . .</b>	<b>46</b>
4.2.1	Resistores em rede . . . . .	46
4.2.2	Fratura frágil e dúctil . . . . .	46
<b>4.3</b>	<b>Ruptura de resistores em rede quadrada . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>Aula experimental com os alunos . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>Aprendizagem . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>61</b>

<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>62</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO A – RESPOSTAS DA SONDAAGEM</b> . . . . .	<b>66</b>
<b>ANEXO B – QUESTIONÁRIO FINAL</b> . . . . .	<b>74</b>
<b>ANEXO C – PRODUTO EDUCACIONAL</b> . . . . .	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Propomos despertar nos estudantes a curiosidade e ou interesse científico em física, através de experimentos nos quais usamos um circuito composto de resistores elétricos para analisar a variação da corrente elétrica que passa através do mesmo com a remoção aleatória dos componentes. Visando estabelecer sua semelhança com o fenômeno de tensão-deformação e desagregações em sólidos, isto é, os processos de fraturas em meios elásticos.

Ressaltamos que a propagação de dano em materiais apresenta-se de maneira bem similar em diversas áreas interdisciplinares, tais como: resistência dos materiais, fenômenos de ruptura em sistemas desordenados, desagregação dielétrica, transições condutor-isolante e rupturas em estruturas ósseas. Note-se que de maneira geral os processos de ruptura são irreversíveis e são caracterizados por apresentarem transições de fase de primeira ordem (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997) e (DUXBURY; KIM, 1990). O presente modelo estabelece que, em redes planas de condutores fundidos a corrente elétrica de ruptura de cada elemento é proporcional à sua respectiva condutância, no qual, a ruptura de um condutor ocorre quando a corrente elétrica alcança um certo valor crítico. Em particular, na situação mais simples, todos os condutores são considerados iguais. Considerando estas premissas, propomos estudar como uma corrente externa introduzida em um certo nó e removida em outro adjacente se redistribui na rede de resistores. Aqui é importante determinar quantitativamente como a corrente, em uma rede de condutores fundidos, é reduzida devido ao tamanho da desagregação do sistema (ORTIZ; RAJAPAKSE, 2002). Assim, verificaremos experimentalmente os efeitos das remoções aleatórias dos elementos em uma rede elétrica bidimensional que, em nosso caso, é apresentada como uma treliça de segmentos resistivos associados em forma de rede quadrada.

Com ajuda desse modelo objetivamos também mostrar ao estudante mais conteúdo prático. Visto que, apesar de muitas mudanças normativas na educação, é quase unânime o desinteresse pela física por parte do aluno. Isso nos obriga a procurar maneiras ou alternativas de criar e reinventar métodos de ensino com a finalidade de mudar este paradigma. O cenário atual torna-se necessário e urgente a introdução de práticas experimentais no currículo de todas as escolas de ensino fundamental e médio. Pois, sua ausência dificulta nossa interação e compreensão das atividades cotidianas que evoluem cada vez mais rápido (BORGES, 2002). Outro problema, relata Borges, abrange as próprias instituições de ensino, nas quais, mesmo com espaços e laboratórios especializado, que por outros motivos, raramente são utilizados. Junto a isso, podem ser acrescentados os seguintes fatos corriqueiros: ausência de recursos e materiais de reposição, reduzido tempo para o professor planejar, testar e entender com profundidade os experimentos, o que faz com que os espaços permaneçam fechados e sem a manutenção apropriada. No entanto, disserta Borges, há um grande equívoco em afirmar que as atividades práticas tenham que ocorrer somente em ambientes altamente equipados e assessorados para se

ter resultados de sucesso. As vezes podemos, inclusive fazê-lo em sala de aula, prescindindo de modernos aparatos, como ocorre com nosso trabalho que foi realizado sem requerer de muito espaço físico e recursos elevados.

## 2 APRENDIZAGEM

Durante todo o processo de desenvolvimento desta dissertação, fomos norteados pela Aprendizagem Significativa proposta pelo pesquisador norte-americano David Paul Ausubel (1918-2008) (AUSUBEL, 2003), no qual apresenta uma teoria cognitiva que valoriza a maneira como aprendemos “intuitivamente” a realidade. Ausubel propõe aquisição e retenção de conceitos como resultado de um processo mentalmente ativo, integrador e interativo entre disciplinas e ideias relevantes da cognição, que por sua vez, são relacionadas de forma pessoal.

Damos importância à participação dos discentes em experimentações, como argumenta Ausubel, evitando a memorização mecânica, a pesar de sua importância complementar, buscando ações práticas que façam claro sentido para o aluno, trabalhando a autoaprendizagem e ao mesmo tempo, criando conceitos prévios, subsunçores, ou “facilitadores” (MOREIRA, 1999), que, em conjunto contribuem para uma compreensão generalizada. E com isso, possa interiorizar o tema de forma autônoma sendo possível a qualquer momento o retomar.

Foram desenvolvidas aulas teóricas, valorizando o conhecimento básico e o uso inevitável da memorização mecânica que, nas palavras de Ausubel, inicialmente são conteúdos sem nenhuma ou mínima relação com os conhecimentos prévios e, ao que parece acabam ficando sem conexão na mente do indivíduo. Entretanto, vão servir de “âncora” para novas compreensões. Nos últimos encontros, trabalhamos com aulas práticas, tornando possível o uso da aprendizagem que requer uma reorganização de memórias anteriormente fixadas, criando novos subsunçores ou “ligações”, possibilitando outros acessos a estrutura cognitiva que, segundo aquele Ausubel, quanto maior o número de subsunçores, mais consolidado é o conhecimento.

A aprendizagem significativa defende a vivência pessoal e coloca o professor como agente fundamental, promovendo e incentivando a aprendizagem. Para tanto é necessário contar com um conteúdo relevante que tenha semelhança com o contexto do aprendiz. Motivo pelo qual exemplificamos, durante as aulas, os tipos de fraturas e resistências de alguns materiais que estão presentes no cotidiano, para depois estabelecer sua relação com nosso modelo de resistores elétricos.

Abordamos os chamados organizadores prévios, sugeridos por Ausubel, que, são as “ligações cognitivas” que manipulam a estrutura mental do aluno e ocupam uma área já conhecida ou que ainda irá reter. Assim, apresentamos através de textos introdutórios, imagens de estruturas, rupturas e esquemas elétricos, ao longo da aplicação da sequência didática para facilitar a ativação dos subsunçores. E exemplificamos as interpretações de nosso modelo de rupturas de condutores e sua similaridade com as fraturas presentes em materiais rígidos, igualmente como, os resultados e análise decorrentes dos experimentos através de gráficos e equações da física para que todos possam melhor compreender, dominar e usá-las em sua área de interesse.

## 3 FÍSICA DAS FRATURAS

As fraturas são resultado de quando um sólido é levado para além de seus limites mecânicos. Portanto, é importante conhecer esse limite ou o comportamento dos materiais à medida que se aproximam deste, assim como os fatores que os influenciam. As propriedades de falha dos materiais são muito diferentes de outras como, elasticidade, no sentido de que suas previsões nem sempre são simples. Por exemplo, tipicamente, a resistência à fratura de um sólido tem uma distribuição dependente do volume, e um corpo maior tem menos resistência à ruptura do que outro menor com a mesma composição, devido ao maior número de micro lacunas presentes na estrutura cristalina. Em materiais frágeis, a fratura é catastrófica, ou seja, o sólido não tem um precursor e, essa natureza intrigante dos fenômenos de falha levou os cientistas a se debruçarem sobre esse problema ao longo dos séculos (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997).

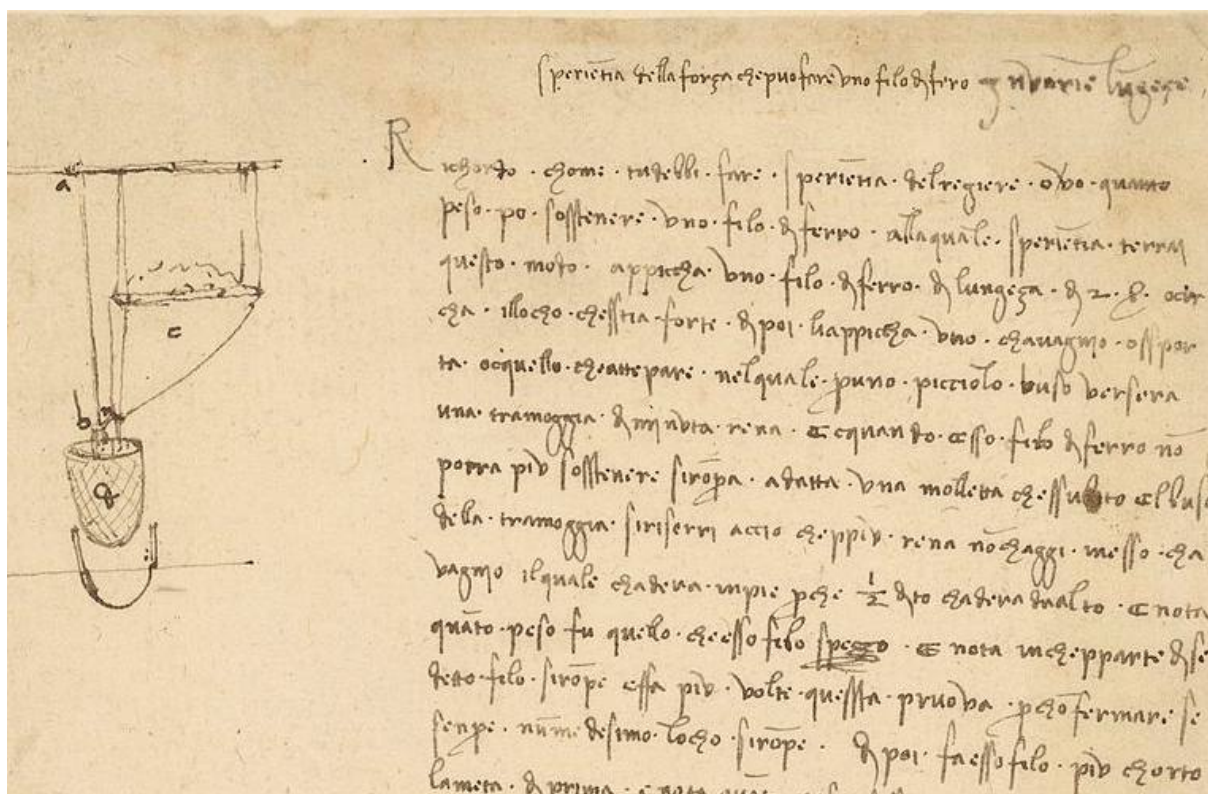
### 3.1 Primeiras percepções sobre resistências dos materiais

Muito antes da era cristã os engenheiros perceberam falhas imprevisíveis nas construções, como argumentou o grande arquiteto romano Marcus Vitruvius Pollio (~70-25 a.C.), quando disse: “Há algumas coisas que, quando aumentadas, imitando modelos pequenos, são efetivas; outras não podem ter modelos” (PENNEREIRO, 2010). Este problema chamado de “fraqueza dos gigantes”, teve alguns avanços como relata Chakrabarti e Benguigui (1997), no experimento pioneiro de Leonardo Da Vinci (1452-1519), um grande renascentista que compreendia muitas áreas do conhecimento como artes, engenharias, física, anatomia e outros. E que realizou os primeiros testes de resistência dos materiais em um experimento, o qual chamou de “Testando as forças de fios de ferro de vários comprimentos”. Conforme a Figura 1, ele suspendeu uma cesta pelos mencionados fios que, lentamente era preenchida por areia vinda de um outro recipiente pendurado mais acima. Com o tempo a cesta vai ganhando massa, que por sua vez tracionam os arames até se romperem. Em seguida, um fio de 1/2 do comprimento anterior é testado e o peso adicional registrado; depois, um fio de 1/4 de comprimento, e assim por diante repetindo o teste várias vezes para cada comprimento e observando e anotando os pontos de ruptura nos respectivos fios, junto com a força máxima suportada e a localização da fratura. E finalmente ele concluiu que os fios de menor comprimento resistiram mais.

Porém, verifica-se que o experimento de Da Vinci não foi aceito pelo seu contemporâneo Galileu Galilei (1597-1642), que através dos diálogos entre o personagem *Salviati* e *Simplicio*, na obra clássica “Duas novas ciências” apresenta uma aparente impossibilidade do fato com auxílio da Figura 2 no seguinte trecho:

*Simplicio* - E assim constatamos que uma corda muito comprida é muito menos capaz de sustentar um grande peso, que se fosse curta; e de onde acredito que uma vara de madeira ou ferro poderá sustentar muito mais peso se for curta

Figura 1 – Manuscrito de Leonardo Da Vinci sobre resistências de fios de ferro



Fonte: VINCI, L. D. Da Vinci Codex Atlanticus. 1492. Disponível em: <http://www.gettyimages.com/detail/photo/resistance-of-metal-wire-from-atlantic-high-res-stock-photography/103727928>

que se for muito comprida, supondo tendo em conta também seu próprio peso que na mais comprida é maior[...], [...] *Salviati* - Suspeito, Sr. Simplicio, que neste ponto esteja enganado, como em tantos outros, se é que entendi bem sua argumentação; desejaria dizer que uma corda com um comprimento, por exemplo, de quarenta braças não pode sustentar tanto peso quanto uma corda com uma ou duas braças? *Simplicio* - É isto o que queria dizer e, até o momento, parece-me uma proposição muito provável.[...] *Salviati* - Tomemos uma corda AB, atada pela extremidade A, tendo na outra extremidade o peso C, cuja força deve poder romper a corda: mostrai-me, Sr. Simplicio, o lugar exato no qual a ruptura deverá acontecer. *Simplicio* - Digamos no ponto D. [...] [...] *Salviati* - Dizei-me agora: se atássemos o mesmo peso não ao final da corda B, mas próximo ao ponto D, por exemplo em E, ou ainda se fixássemos a corda não por sua extremidade A, senão mais perto e sobre o ponto D, por exemplo em F, dizei-me, repito, se o ponto D seria submetido ao mesmo peso pelas cem libras? *Simplicio* - Sim, desde que o pedaço de corda EB seja acrescentado à pedra C. *Salviati* - Se, portanto, a corda sofrer no ponto D o efeito das mesmas cem libras de peso, romper-se-á, segundo vossa suposição; e contudo, FE é um pequeno pedaço do comprimento AB, como então podeis dizer que a corda comprida é mais fraca que a curta? Consolai-vos, pois, de ter caído num erro no qual caíram muitos outros, que também eram inteligentes, e sigamos adiante[...] (GALILEI, 1935, p. 97 e 98).

A lógica de Galileu não está errada, porém, a conclusão experimental de Da Vinci foi mal interpretada, e muito refutada pela teoria clássica ao longo do tempo, em que argumenta-se que, o comprimento do fio não pode influenciar na resistência, mas apenas seu diâmetro. Se

Figura 2 – Desenho de Galileu representando a resistência de uma corda



Fonte: GALILEI., G. *Dois Novas Ciências*, 1935.

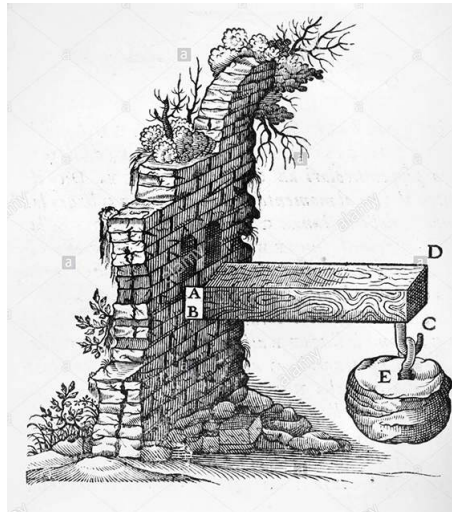
não tivesse sido obscurecido por falhas conceituais, o experimento poderia ter oferecido muitos avanços, como por exemplo, mostrando um princípio estatístico relevante para mecânica das fraturas e resistência dos materiais. Por outro lado, é muito provável que arames com diferentes seções transversais se rompam no maior comprimento, e isso concordaria com as descobertas de Da Vinci, e portanto, devemos seguir suas recomendações, que é de repetir várias vezes o experimento para que o resultando apresente comprimentos diferentes para fios mais fortes (LUND JAY E P. BYRNE, 2001).

Este fenômeno foi estudado recentemente em engenharia, começando nas décadas de 20 e 30, conforme relata Timoshenko (1956) apud Lund e Byrne (2001). A importância das imperfeições dos materiais foi publicada pela primeira vez por Griffith (1921) apud Lund e Byrne (2001). Os estudos estatísticos sobre os efeitos do diâmetro ou comprimento e o aumento da probabilidade e reduções de força, foi feito por Weibull (1939) apud Lund e Byrne (2001). Os experimentos de Davidenkov, (1947) apud Lund e Byrne (2001), mostraram que o aço com alto teor de fósforo se comportava semelhantemente com os resultados de Da Vinci, assim também, como a redução da tensão de ruptura em amostras longas. Atualmente as propriedades deste material são um pouco heterogêneas. Assim como no período do renascimento, a técnica de fabricação usada poderia ter introduzido heterogeneidades nos fios de ferro. Desta maneira é comum, ao realizar testes de resistência à tração em ferro ou aço, obtermos diferentes resistências para o mesmo diâmetro de fio.

Infere-se de Chakrabarti e Benguigui (1997), portanto, que a dificuldade em afirmar qual fio ou objeto é mais resistente, se deve à natureza e propriedades microscópicas dos materiais ainda desconhecidas na época. Por outro lado, Galileu dá informações válidas no capítulo “Segunda jornada” em duas novas ciências, no qual ao longo tempo a fragilidade dos corpos em grande escala foi amplamente comprovada. Nestes argumentos, Galileu retoma os conceitos de

Arquimedes (287-212 a.C.) sobre alavancas e relaciona resistência mecânica e sua dependência da forma e tamanho. Como se verifica na proposição I, sobre vigas ou prismas de pedra, madeira ou aço, presas horizontalmente em paredes, como é apresentada na Figura 3, esta facilmente se rompe na região próxima de AB, quando aumenta-se o comprimento ou por causa de um acréscimo de alguma massa considerável no ponto D (GALILEI, 1935).

Figura 3 – Ilustração de Galileu sobre a resistência mecânica de vigas

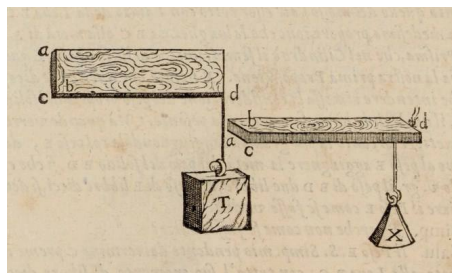


Fonte: GALILEI., G. Duas Novas Ciências, 1935.

Nesta proposição, Galileu expõe os limites mecânicos do sólido, que são superados por um aumento de torque no ponto (C), mesmo que este tenha peso nulo.

Ainda segundo Galileu (1935), podemos analisar outro caso em que a resistência à fratura é subordinada a dimensões ou maneiras em que são aplicadas as forças. Se tomarmos uma tábua (Figura 4), verifica-se que ela suportará uma massa **T** duas vezes maior que **X** quando colocada no ponto **d**, em posição de maior altura  $\overline{ac}$ , que na configuração mais fina  $\overline{bc}$ .

Figura 4 – Desenho de Galileu sobre dependência da forma nas fraturas



Fonte: GALILEI., G. Duas Novas Ciências, 1935.

Podemos entender portanto, que os estudos de Leonardo Da Vinci e Galileu mostraram em quais configurações ou proporções os materiais eram mais resistentes, porém, não encontram

ou não deixaram registros sobre as causas destas fragilidades nos sólidos. Talvez, porque danos e falhas são dependentes de sua estrutura atômica, difíceis de prever ou precaver-se com exatidão, devido a sua natureza crítica e irreversível. No entanto, estudos e cálculos estatísticos recentes apontam para uma dependência do volume, no qual a força de coesão diminui com  $1/\ln(V)$  (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997) e (HANSEN; STÉPHANE, 2000).

## 3.2 Causas e processo de fraturas

A fim de uma análise mais completa das causas de rupturas e fissuras em sólidos, é importante abordarmos alguns conceitos como: tensão, deformação, módulo de elasticidade, ductilidade, fragilidade, defeitos cristalinos e outros.

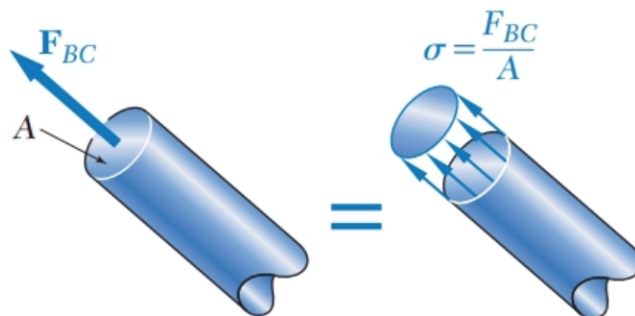
### 3.2.1 Tensões $\sigma$

Tensão ou estresse é uma grandeza tensorial <sup>1</sup>, como expõe Medrano (1989) e Teodor (2012). E encontramos no estudo da mecânica dos contínuos auxiliando a análise dos efeitos relacionados às forças atômicas ou moleculares, e sua secção superficial de interação causadas por um agente externo. Na ausência de tensão, as únicas forças existentes são as que atuam entre os pontos microscópicos, necessárias para manter seu formato sólido. Isto é, um corpo é livre de tensões quando atuam nele apenas forças interatômicas (TEODOR; GURAN, 2012).

### 3.2.2 Tensão axial

Conforme Figura 5, são causas por forças que esticam, tracionam (tensão de dilatação) ou comprimem o material (tensão de compressão). Matematicamente, a tensão é a razão da força pela área de secção reta  $A$ , causando uma deformação ou ruptura (HALPERN, 1988) e (BEER; JOHNSTON; RUSSELL, 1982).

Figura 5 – Ilustração representando forças axiais e tensão



Fonte: Beer; Jornston e Russell (1982)

<sup>1</sup> As grandezas tensoriais são governadas por tensores, que por sua vez, são mais gerais que os vetores, podendo ter mais de 3 dimensões (MEDRANO-B, 1989).

Logo a tensão axial é

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

A equação 1 representa a tensão média sobre uma determinada seção e não a tensão em um ponto específico da seção. Como representada na Figura 6, considerando uma pequena área  $A$  ao redor de ponto  $Q$ , a intensidade  $F$  da força exercida sobre  $A$ , é melhor definida segundo Beer, Johnston e Russell (1982). como:

Figura 6 – Esquema ilustrativo de tensão em pequena área



Fonte: Beer; Jornston e Russell (1982)

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2)$$

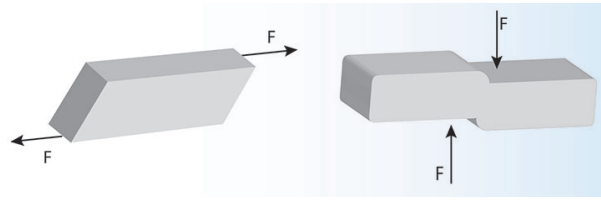
Em muitos casos o valor de  $\sigma$  não é idêntico ao valor médio dado pela equação (1) e sabe-se que ele varia ao longo da seção. No entanto, essa variação é pequena nos pontos mais afastados da aplicação das forças. Na prática, a distribuição da tensão normal em um corpo é dada pela equação (2). Entretanto, para que a distribuição das tensões seja uniforme em uma dada seção, é necessário que a linha de ação das forças passe pelo centroide da seção da área. Cargas desse tipo são referidas como carga axial centrada, por outro lado, no caso de uma carga axial excêntrica, a distribuições das tensões não são uniformes (BEER; JOHNSTON; RUSSELL, 1982).

As tensões por tração são muito utilizadas nos ensaios de resistência dos materiais e são comumente analisados através dos gráficos de tensão-deformação de por exemplo: vigas de concreto, metais usados em estruturas, cabos de aço e outros.

### 3.2.3 Tensões de cisalhamento

Segundo Gandhi (2017), esta ocorre quando forças são aplicadas em sentidos opostos e na mesma direção, porém em pontos diferentes do plano como ilustra a Figura 7.

Figura 7 – Desenho representando as tensões de cisalhamento

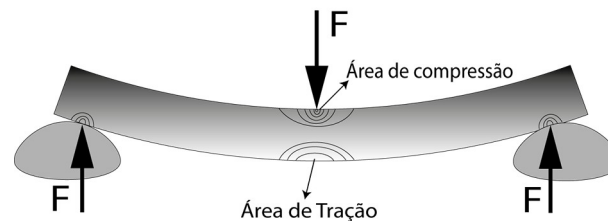


Fonte: Próprio autor

### 3.2.4 Tensão por flexão

Como apresentado na Figura 8, um corpo quando flexionado está sujeito a forças em vários pontos em que possuem tensões de compressão e alongação (GANDHI, 2017). Para evitar excessivas flexões e fraturas, as vigas devem ser dimensionadas e posicionadas adequadamente para minimizar estes estresses como também evitar rupturas (SEARS; ZEMANSKY; YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Figura 8 – Diagrama representando tensões por flexão



Fonte: Próprio autor

Uma viga de concreto é um bom exemplo de uma estrutura que suporta uma grande compressão, mas não resiste bem às tensões por tração. Por isso, devem possuir em seu agregado, armações de aço que suportam com segurança maiores trações (SEARS; ZEMANSKY; YOUNG; FREEDMAN, 2008).

### 3.2.5 Deformação $\varepsilon$

A deformação é expressa matematicamente como sendo a razão da área deformada pela área inicial, i.e., antes da deformação.

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_o} = \frac{[m^2]}{[m^2]} \quad (3)$$

Conforme equação 3, a deformação é uma grandeza adimensional.

### 3.2.6 Módulo de Elasticidade $M_\epsilon$

É a razão entre tensão e a deformação (HALPERN, 1988).

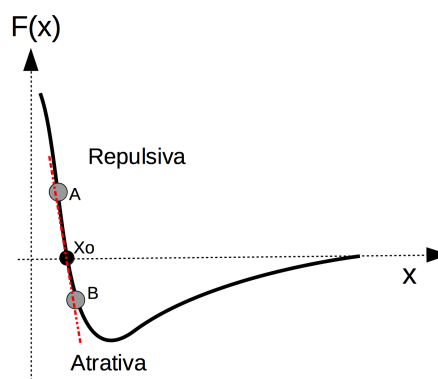
$$M_\epsilon = \frac{\text{Tensão}}{\text{Deformação}} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{[N/m^2]}{[1]} \quad (4)$$

Comenta Beer, Jornston e Russell (1982), que a unidade de medida do módulo de elasticidade é idêntica à que usamos nas tensões. Já a elasticidade, é a propriedade que alguns sólidos têm de retornar ao seu estado original quando retiradas todas as forças que causam sua deformação, razão pela qual, torna válida a lei de Hooke, na qual a força que comprime ou traciona um mola é diretamente proporcional ao seu deslocamento até seu limite de elasticidade.

### 3.2.7 Relevância da lei de Hooke

A linearidade da lei de Hooke está relacionada com as interações Coulombianas e forças de *Van Der Waals*. Quando comprimimos um material, a tendência é de que distância interatômica diminua, dessa aproximação surgem forças repulsivas e na situação oposta, se esticamos o corpo, forças atrativas vão impedir esse afastamento dos átomos. Portanto, as forças internas tendem a manter o equilíbrio. No gráfico da Figura 9, está representada a força em função da distância interatômica  $x$ , onde  $x_0$  é a posição de equilíbrio; forças atrativas estão na região negativa do eixo das ordenadas, e as repulsivas na parte positiva, as forças de *Van Der Waals* diminuem mais rapidamente do que a lei de Coulomb. Observe que, de acordo com o gráfico, se comprimimos os átomos até o ponto A, as forças de repulsão se opõem de maneira quase intransponível. Por outro lado, se tentamos tracionar o objeto até o ponto B da curva, as forças de atração tenderão manter o átomos unidos. Logo, o segmento de reta AB nas vizinhanças do ponto de equilíbrio  $x_0$ , é linear e se comporta semelhante a uma mola, na qual, a força aplicada é diretamente proporcional ao deslocamento (NUSSENZVEIG, 2013).

Figura 9 – Gráfico da força interatômica em função do deslocamento



Fonte: Próprio autor

Isto é

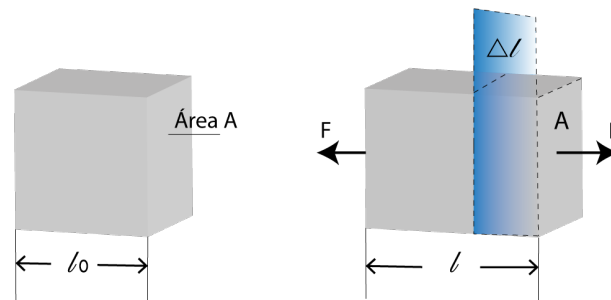
$$\vec{F} = -kx_i \quad (5)$$

### 3.2.8 Módulo de Young

Em termos de tensão e deformação, disserta Chakrabarti e Benguigui (1997), se o sistema obedece a lei de Hooke, Eq. 5, então a tensão será proporcional à deformação. Para que isto seja válido, definimos uma constante chamada de módulo de elasticidade. No caso da tensão pura, quando somente há tensões perpendiculares à seção reta, este é chamado de Módulo de Young. O limite elástico é o menor valor do estresse necessário para produzir uma distorção permanente em um corpo. Quando a tensão for superior a esse limite, o corpo não mais retornará ao seu estado inicial, mesmo após o estresse ter sido removido. Diante disso, define-se a força máxima como o menor valor de tensão necessário para quebrar o corpo.

O módulo de Young, Eq. 6, descreve a elasticidade do material ao longo do comprimento. Como mostrado na Figura 10, suponha que um corpo ou haste de comprimento inicial  $l_0$  e área de seção transversal  $A$ , alonga-se por uma quantidade  $\Delta L$  sob tração do par de forças  $F$ , aplicadas nas extremidades. O valor de  $Y$  depende apenas da constituição física e não das dimensões do objeto (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997).

Figura 10 – Desenho esquemático representando a deformação por tração



Fonte: Próprio autor

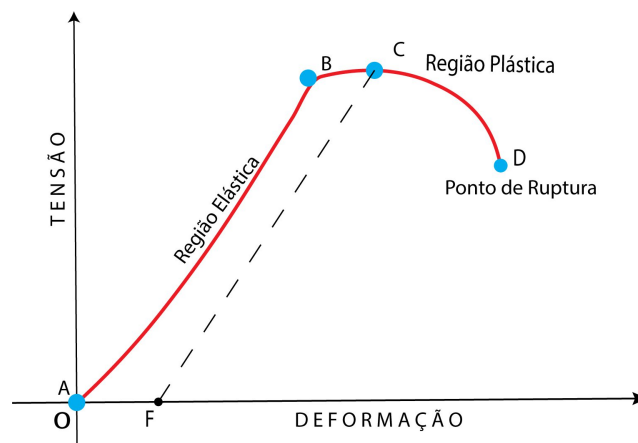
$$Y = \frac{\text{Tensão Pura}}{\text{Deformação}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F_{\perp} \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (6)$$

### 3.2.9 Curva de tensão-deformação

Na Figura 11 é mostrada a curva de tensão-deformação. De acordo com Chakrabarti e Benguigui (1997), quando aplicamos sobre o objeto uma carga de tração e em seguida retiramos essa carga, sua resposta refaz a curva AB, onde o corpo retorna ao seu estado original no ponto A. Essa região muda linearmente com a tensão, obedecendo à lei de Hooke e, portanto,

é denominada região elástica. Em seguida, se começamos a descarregar o sistema após atingir o ponto C, o comportamento gráfico mostra que a resposta é não-linear, então o sistema não irá percorrer o caminho original AB, e sim o caminho CF. No ponto F, a tensão é zero porque agora estamos na região plástica da curva, onde o material permanece deformado, mesmo quando a tensão é removida. A redução da tensão de C para F, na Figura 11, seria a última deformação recuperável. Uma vez que a verdadeira curva dá a tensão necessária para fazer “fluir” o material plasticamente, a curva CF é chamada de “curva de fluxo”, quando o sistema mostra histerese. Nos materiais frágeis a curva AB termina em um ponto muito próximo a B, isto é, quebram-se repentinamente após esse ponto. Ainda no mesmo gráfico, se o sistema é descarregado seguindo o caminho CF, a sistema não se recupera da deformação e inevitavelmente quebrará.

Figura 11 – Curva Tensão-deformação



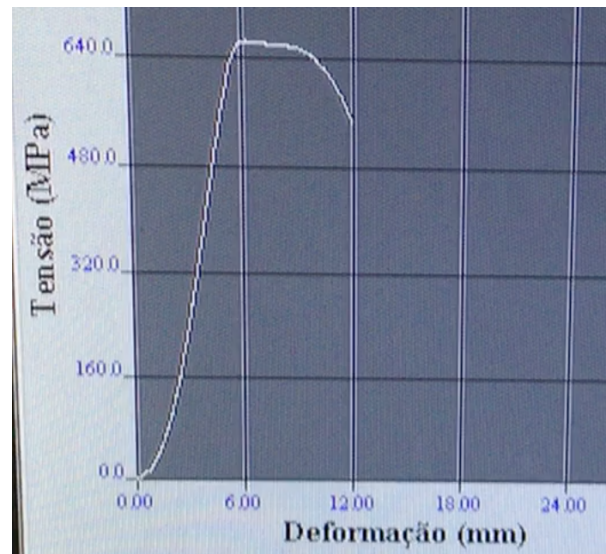
Fonte: Próprio autor

É mostrado um gráfico da Figura 12, uma situação real, no qual foi observado durante nossa visita aos laboratórios de ensaio de materiais no Centro Universitário de Patos de Minas. Onde foi realizada na máquina de trações um teste de tensão-deformação em um vergalhão de aço com diâmetro de 1/2 polegada, usado na armação para concreto em construção civil.

Na região que caracteriza a deformação plástica, o comportamento é não-linear e não há uma constante facilmente mensurável relacionando a tensão e módulo de Young, como de fato é possível de ser feito na região elástica. Com isso, no caminho CD fica evidente a dificuldade de uma formulação matemática apropriada., esta deformação não é um processo reversível. Porém, depende do caminho de carregamento pelo qual o estado final é alcançado e por isso é importante analisar o caso separadamente. Em contraste, note-se que no caso elástico a informação sob o material apenas depende de seu estado inicial e final, e este processo de deformação é reversível.

A expressão matemática mais comum usada para ajustar a iminência desse comportamento crítico, expõe Chakrabarti e Benguigui (1997), pode ser ajustada à lei de potência,

Figura 12 – Gráfico de tensão-deformação



Fonte: Próprio autor/Cortesia Unipam

expressada através da equação 7.

$$\sigma = K e^n \quad (7)$$

Sendo K é uma constante que depende do material e  $n$  é o coeficiente de rigidez, uma espécie de resistência a deformação. Uma vez que a deformação plástica é muito grande e não segue mais a linearidade com a tensão, a definição convencional de deformação, como descrita anteriormente na equação 2, não é mais justificada, e quantidades como tensão pura e deformação verdadeiras são frequentemente usadas. Então a definição de deformação ou variação de comprimento é comparada com o comprimento instantâneo da amostra, em vez do seu comprimento original (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997). E podemos deduzir com as seguintes equações:

$$\xi = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \dots,$$

$$\xi = \int_{L_0}^L \left( \frac{dL}{L} \right),$$

$$\xi = \ln \left\{ \frac{L}{L_0} \right\}. \quad (a)$$

De acordo com a deformação temos que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_0},$$

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0},$$

$$1 + \varepsilon = \frac{L}{L_0}. \quad (b)$$

Substituindo o lado direito de (b) em (a), resulta que:

$$\xi = \ln(1 + \varepsilon). \quad (8)$$

A tensão real, explica Chakrabarti e Benguigui (1997), é definida pela razão entre a carga e a área da seção transversal em que esta atua. A tensão convencional é a relação entre a carga e a área inicial. Ao considerar o comportamento elástico, não é necessário fazer essa distinção. Por outro lado, denotando a tensão verdadeira por  $\sigma$  e a convencional por  $s$ , em que a tensão ou estresse verdadeiro é  $\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} = s \frac{A_0}{A}$ . E pela relação de consistência de volume  $\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = (\varepsilon + 1)$ , e isso nos dá a relação entre o estresse verdadeiro e convencional como

$$\sigma = s(\varepsilon + 1). \quad (9)$$

Substituindo a equação (9) em (7) e evidenciando  $s$ , teremos uma equação em função da tensão convencional e portanto mais adequada para trecho não linear ,

$$s = \frac{Ke^n}{(\varepsilon + 1)}. \quad (10)$$

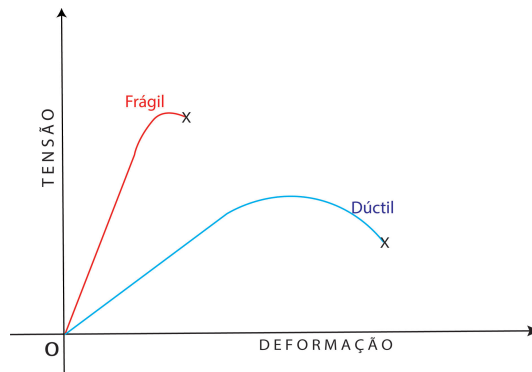
### 3.2.10 Ductilidade e fragilidade

As curvas tensão-deformação, como apresentadas nas Figuras 11 e 12, terminam no chamado ponto de ruptura, em que a tensão desenvolvida no sistema não pode equilibrar com a deformação extrema, causando a ruptura. No gráfico da Figura 13, observam-se diferentes tensões em relação à deformação entre os materiais frágeis e dúcteis; a temperatura e pressão normais (CALLISTER, 2016).

A natureza das fraturas difere por meio dos elementos que as constituem, frequentemente afetados por fatores como: estresse aplicado, características geométricas, condições de temperatura e taxa de deformação. Em geral, as fraturas são classificadas em: dúctil, semidúcteis e frágeis, como mostradas em respectiva ordem na Figura 14. Sob uma análise mais detalhada podem observar-se suas diferenças e seus efeitos em nível macroscópico e microscópico (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997).

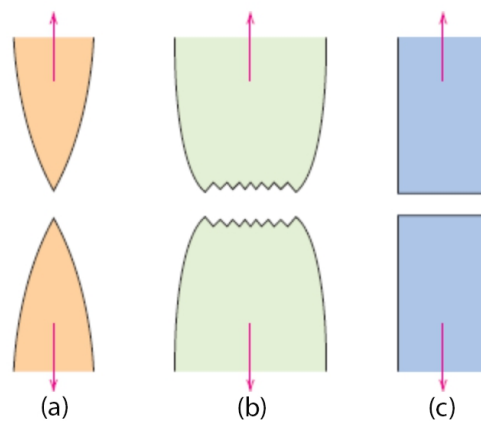
Nos materiais dúcteis, explica Callister (2016), há tanto uma deformação elástica como plástica mais alongada. E por isso, esta é mais parecida com o modelo de remoção de componentes resistivos, o qual trabalhamos na execução de nosso produto educacional. A fratura dúctil ocorre após uma enorme deformação plástica que, muitas vezes, é associada ao formato de

Figura 13 – Gráfico representando as curvas de tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis



Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Representação de três diferentes tipos de fraturas: a) fratura dúctil, b) semidúctil e c) frágil



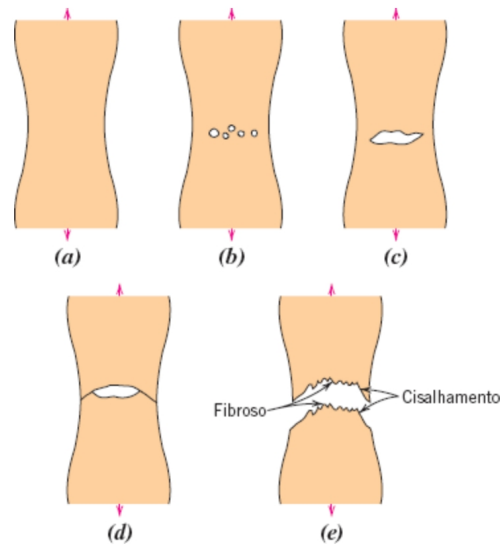
Fonte: (CALLISTER, 2016)

“pescoço” no ponto de instabilidade plástica. Em geral, a fratura dúctil em ensaios de engenharia, como mostra a Figura 15, tem três estágios distintos:

- a) A amostra começa a estreitar e as cavidades se formam na região do pescoço;
- b) as cavidades se fundem para formar uma rachadura no centro da amostra e a rachadura cresce perpendicularmente ao estresse aplicado;
- c) a rachadura se espalha para a superfície da amostra em uma direção de  $45^\circ$  que, então começa a formar partes semelhante ao copo-cone na fratura.

De acordo com Callister (2016), o resultado dessa série de processos é chamado de fraturas “corpo-cone” que são efeitos da desassociação dos grãos simples ou hexagonais fechados que escorregam em planos basais sucessivos até se separarem por cisalhamento. As espécies policristalinas de metais dúcteis, como o ouro ou o chumbo, possuem curvas ainda mais longas

Figura 15 – Esquema demonstrando o processo de fratura em um material dúctil



Fonte: (CALLISTER, 2016)

até um ponto de ruptura. Por outro lado, nos materiais compactos, uma deformação plástica apreciável não ocorre.

### 3.3 Defeitos em sólidos

As propriedades dos materiais como: resistência, pureza, ductilidade, fragilidade e outros, explana Callister (2016), são influenciadas amplamente pela presença de defeitos ou imperfeições na rede cristalina. Logo, é extremamente relevante conhecer os tipos de imperfeições existentes e as funções que exercem ou afetam o comportamento destes corpos sob tensões. Os metais puros, quando transformados em ligas, sofrem transformações em nível molecular que alteram drasticamente suas características, tornando-as excelentes e funcionais dependendo da necessidade industrial.

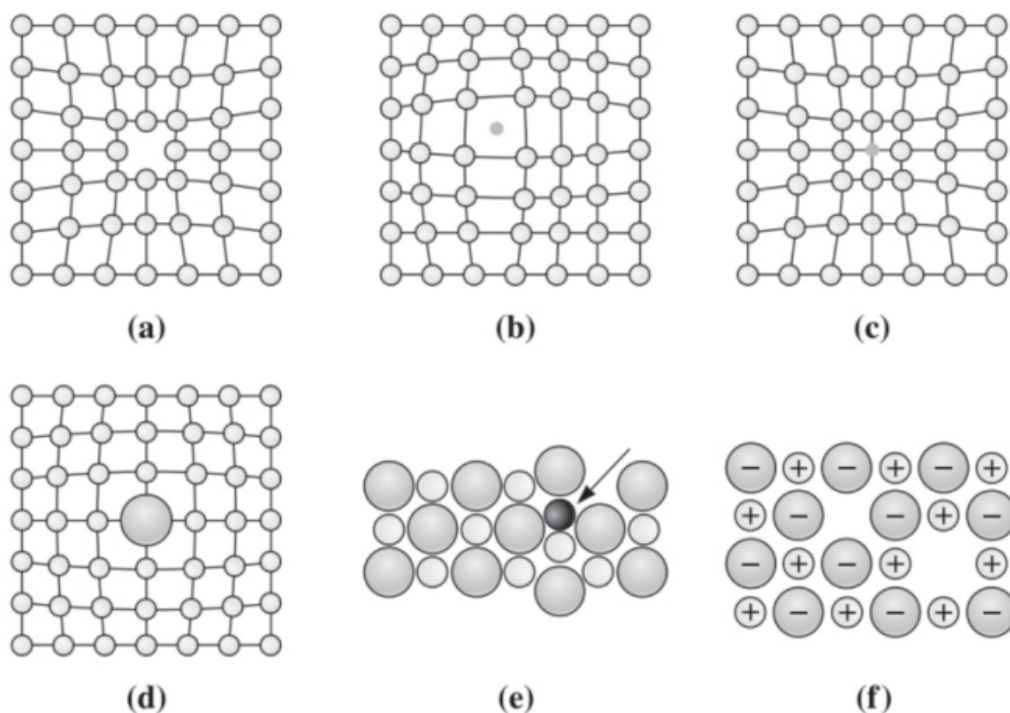
#### 3.3.1 Defeito de ponto

Chakrabarti e Benguigui (1997) descreve estes defeitos pontuais como desarranjos iônicos ou interatômicos de redes cristalinas. Estas falhas afetam todo o esquema geométrico da estrutura, e podem surgir pelo deslocamento iônico ou atômico, muitas vezes causados pelo aquecimento de materiais durante a fundição, forja, adição intencional ou não de impurezas de outros elementos e compostos químicos. Também, de acordo com Callister (2016), estas falhas tem causas termodinâmicas, basicamente um aumento de entropia dada pela aleatoriedade cristalina durante a conformação dos átomos.

Geralmente estes defeitos pontuais são classificados da seguinte maneira (BHATTACHARYA, 2014):

- 1 Por lacunas - que são ausências, espaços ou sítios vazios da rede que normalmente deveriam estar ocupados por átomos ou íons. De maneira geral, os sólidos cristalinos sempre apresentam algum defeito de ponto ou lacuna e são praticamente impossíveis de serem estruturados perfeitamente (Figura 16a).
- 2 Interstícios - que são átomos de outros elementos que ocupam os espaços interatômicos da rede (Figura 16b).
- 3 Defeito de impureza substitucional - são elementos ou compostos químicos diferentes da estrutura cristalina principal e ocupam uma posição normal, isto é, não afetam sua conformação. Também chamados de dopantes que podem ser prejudiciais ou benéficos, como no caso do silício usado como semicondutor eletrônico (Figura 16c e 16d).
- 4 Defeito de Frenkel - é um par lacuna-interstício formado devido ao salto de íons da posição original para uma intersticial deixando um espaço ou lacuna (Figura 16e).
- 5 Defeito de Schottky - é predominantemente iônico, encontrado em corpos cerâmicos. São lacunas que ocorrem devido a preservação do equilíbrio de cargas elétricas nas ligações iônicas (Figura 16f).

Figura 16 – Diagrama representando cinco falhas pontuais

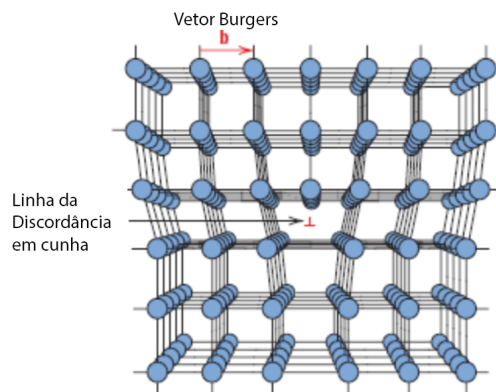


### 3.3.2 Defeito de linha

Também chamados de discordâncias unidimensionais, são desajustes que apresentam desalinhamentos dos átomos na rede como apresentado na Figura 17. Como explica Callister (2016), se apresentam de três maneiras: dissociação em cunha, helicoidal e mista.

O defeito em cunha é um defeito linear centralizado semelhante a um acréscimo de um novo plano atômico na rede. Ainda que, estejam presentes em todos os materiais, inclusive em cerâmicas e polímeros, estas discordâncias podem ser úteis para compreender a deformação e o aumento de resistência dos materiais metálicos Chakrabarti e Benguigui (1997). Esses desajustes são medidos pelo Vetor de Burgers, como apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Defeito de linha em cunha



Fonte: (CALLISTER, 2016)

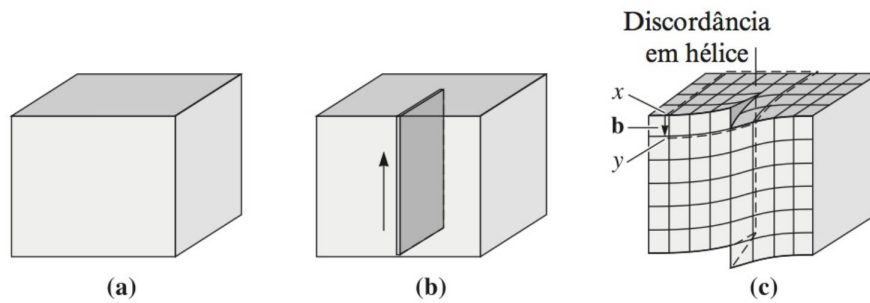
A discordância helicoidal ou em hélice, segundo Chakrabarti e Benguigui (1997), é uma torção muitas vezes causada por tensões de cisalhamento, especificamente, uma separação com tamanho de um átomo. Quando percorremos uma linha imaginária que volta ao ponto de partida em bloco visto em 3 dimensões, é possível perceber a distorção na posição atômica na magnitude de um Vetor de Burgers que é paralelo a discordância. Como expresso na Figura 18 vemos em: a) um cristal perfeito, b) corte do cristal, c) torção e deslocamento com tamanho de um átomo. Vetor de Burgers  $b$  para fechar o percurso ao redor da discordância em hélice.).

Discordância mista ou defeito de linha mista são caraterísticos dos materiais cristalinos que, apresentam discordâncias helicoidais e de cunha no mesmo bloco. Todas essas discordâncias são mostradas na Figura 19. As deformações definitivas ocorrem na maioria dos materiais cristalinos pelo movimento destas discordâncias e, o elemento principal para medir esse tipo de deformação é o Vetor de Burgers.

### 3.3.3 Defeitos Planares

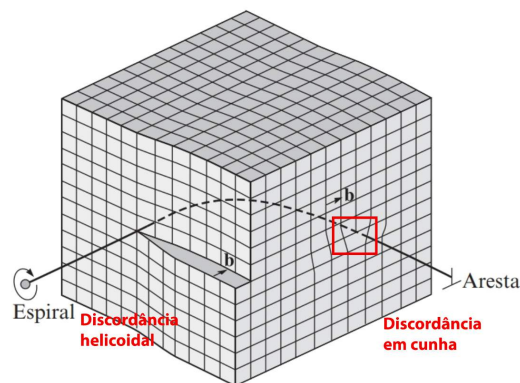
Verifica-se em Chakrabarti e Benguigui (1997), que defeitos planares são descontinuidades em duas dimensões que dividem regiões da rede em diferentes orientações nas estruturas

Figura 18 – Ilustração esquemática de uma discordância helicoidal



Fonte: (BHATTACHARYA, 2014)

Figura 19 – Desenho representando uma discordância mista



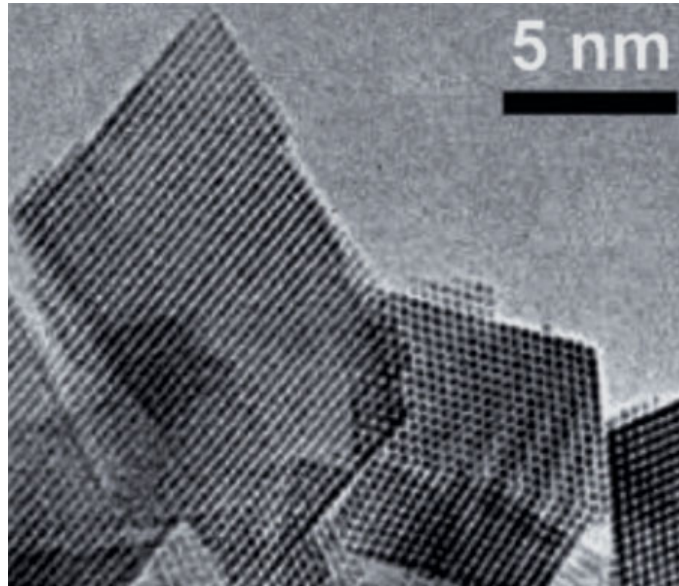
Fonte: (BHATTACHARYA, 2014)

crystalinas. Os átomos alocados no limite do grão não estão conformados em um arranjo cristalino perfeito. Os defeitos planares surgem quando os limites dos grãos crescem desigualmente durante sua cristalização. Em cristais habituais, os tamanhos dos grãos variam de  $1 \mu\text{m}$  a  $1 \text{mm}$ . Se o amortecimento na orientação cristalográfica ocorre em pequenos ângulos (tipicamente inferior a  $10^\circ$ ), o limite será semicoerente, chamado de limite de ângulo baixo. Os limites de grão de ângulo baixo são delimitados por paredes de deslocamento e são frequentemente representados como uma matriz de luxações de borda (limite de inclinação) ou luxação de parafuso (limite de torção). A presença de limites de grãos em materiais policristalinos afeta fortemente seu comportamento sob tensão-deformação. Complementa Bhattacharya (2014), que os limites mais evidentes são os da interface externa, onde termina o arranjo cristalino, ou seja, átomos presentes na parte mais externa da superfície possuem menos vizinhos de ligação que por sua vez, tem um estado de maior energia que aqueles dentro dos grãos. As ligações incompletas destes átomos induzem uma energia de superfície que leva a uma redução de área do material.

Outro defeito planar muito comum é o contorno de grãos que, de acordo com Callister (2016), são os limites que dividem dois ou mais grãos ou cristais com diferentes orientações. Os grãos de um monocristal usado em conversores catalíticos de automóveis são mostrados

na Figura 20, em que ficam evidentes várias falhas planares como: degraus, desalinhamentos, contornos de auto e baixo ângulo e de inclinação.

Figura 20 – Micrografia eletrônica de alta resolução



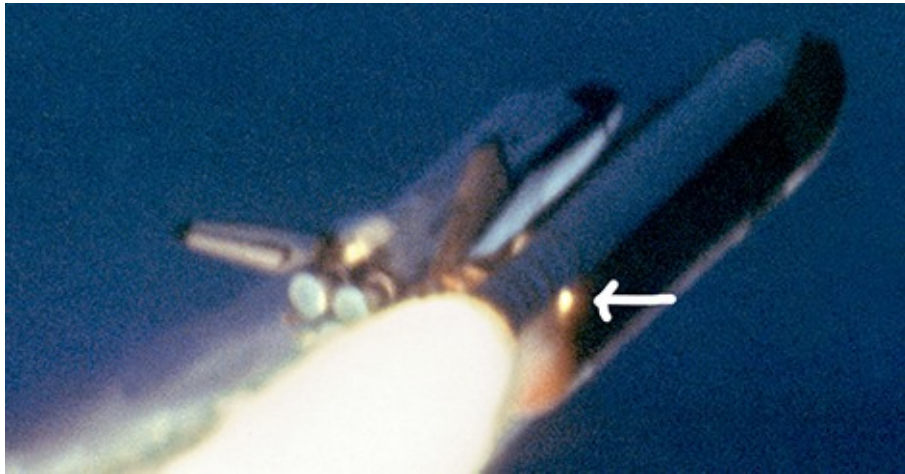
Fonte: (CALLISTER, 2016)

É fácil perceber, como explica Callister (2016), a presença de diferentes defeitos na estrutura. Por exemplo, átomos e grãos não estão unidos regularmente na rede, e dessa forma surgem energias potenciais superficiais com magnitude proporcional a desorientação angular entre grãos. Quando o material é submetido a altas temperaturas os grãos crescem para minimizar essa energia. Outros aspectos, são as fracas ligações entre os grãos, que ao longo da estrutura, criam defeitos interatômicos e intermoleculares, nos quais, causam danos e falhas mecânicas nos materiais.

### 3.4 Processo de fraturas

Existem ao longo da história fatos preocupantes de desastres aéreos, navais e espacial causados por pequenas falhas ou danos que apareceram inesperados e repentinamente. No acidente da aeronave *Challenger* em 28 de janeiro de 1986. Falha teve início em um pequeno anel de borracha usado na vedação do hidrogênio combustível, projetado para se dilatar ou comprimir-se conjuntamente à dinâmica da fuselagem. O físico americano Feynman participou da equipe que buscava as causas do acidente, no qual, explicou que abaixo de zero graus Celsius ou 32° F, o chamado “anel O”, perdeu sua elasticidade e tornou-se muito frágil, problema esse, agravado pelas condições climáticas onde se encontrava o foguete, que conseqüentemente liberou a substância, formando pequenas chamas na estrutura do tanque (Figura 21) e fatalmente explodiu matando todos tripulantes da missão (TUVA, 2016).

Figura 21 – Foto do local do aquecimento na nave Challenger instantes antes do desastre



Fonte: <https://www.nbcnews.com/feature/flashback/video/space-shuttle-challenger-disaster-609059907831>

Outro exemplo da importância de se conhecer ou prever fraturas é verificada na Figura 22, que apresenta um navio-tanque, como expõe Callister (2016), que desagregou-se de modo frágil em razão das forças marítimas que provocaram sucessivas e variadas tensões em sua estrutura. No entanto, esta falha grave começou com uma pequena fissura ou defeito que cresceu até a separação total do casco.

Figura 22 – Imagem do navio-tanque que se quebrou de maneira frágil



Fonte: (CALLISTER, 2016)

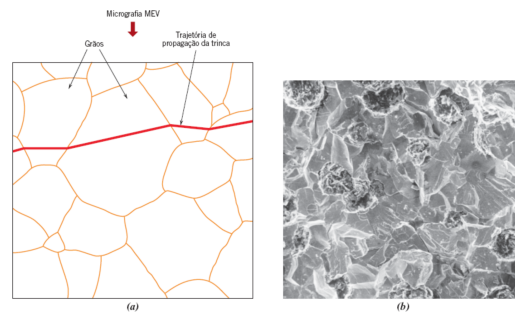
Então, conhecendo o processo de fraturas podemos classificar quais os tipos de materiais são mais apropriados para determinados usos, assim também qualificar sua integridade estrutural considerando a presença de trincas (BHATTACHARYA, 2014).

Bhattacharya (2014), afirma que as fraturas nos materiais têm início nas discontinuidades

ou imperfeições microscópicas sempre presentes nas estruturas internas ou quando estes são submetidos a variações de temperaturas podendo mudá-los entre dúcteis e frágeis. Porém, isso não inviabiliza e nem proíbe as aplicações destes materiais na engenharia. Portanto, basta conhecer o comportamento dos materiais sob a aplicação de tensões máximas, até no qual o corpo cheio de trincas pode resistir, ou seja, medindo sua “tenacidade”. Perceba que isso não implica que a deformação deva ser elevada, bastando para tanto, verificar a tenacidade à fratura por tração em um objeto com trinca ou entalhe de tamanho e geometria pré-determinados.

A maioria das fissuras ou rachaduras, quando submetidas a tensões, avançam rapidamente quase sempre perpendicular ao estresse. Esta se dá por uma ruptura atômica nas redes cristalinas, mostra-se na Figura 23a a propagação de uma trinca através do interior dos grãos em uma fratura transgranular e na Figura 23b a superfície de fratura transgranular.

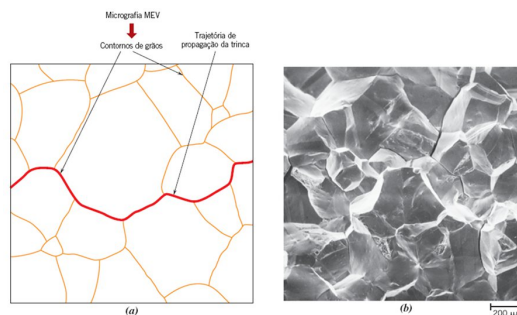
Figura 23 – Esquema e Fotografia eletrônica da propagação de trinca transgranular



Fonte: (CALLISTER, 2016)

Similarmente, afirma Callister (2016), na fratura intergranular, na qual a propagação ocorre entre os grãos (Figura 24). E na Figura 24b, uma fotografia eletrônica de varredura evidenciando a mesma fratura intergranular. Na parte externa não parece visível alguma deformação, porém é possível perceber com clareza uma certa camada deformada muito fina, vista através dos raios-X. As superfícies de fraturas quebradiças possuem menor rugosidade do que as fraturas dúcteis, conclusão extraída ao comparar as Figuras 23b e 24b.

Figura 24 – Esquema e Fotografia eletrônica da propagação de trinca intergranular



Fonte: (CALLISTER, 2016)

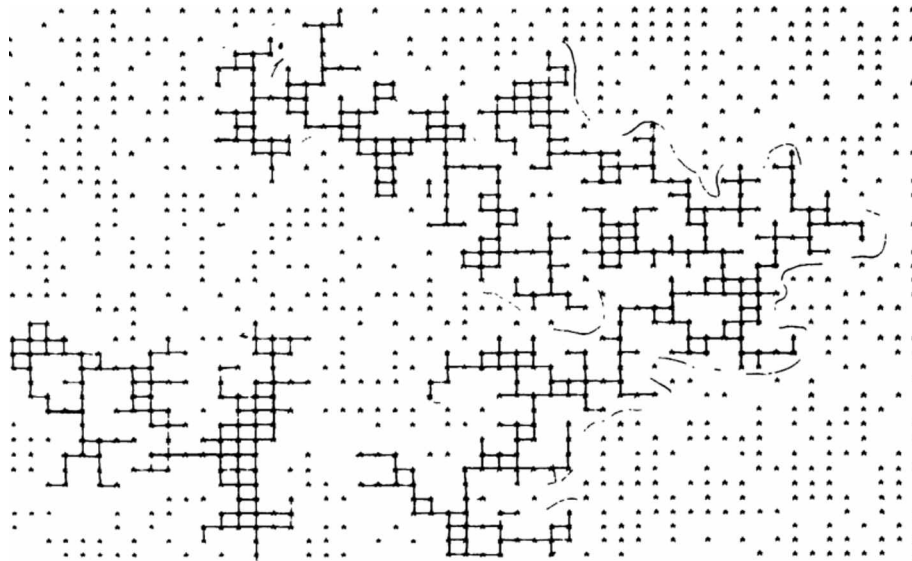
### 3.4.1 Percolação

Os estudos da percolação remontam a Flory e Stockmayer (1923) apud Stauffer (1993), durante a Segunda Grande Guerra, que foi usada para descrever o processo em que pequenas moléculas ramificam-se formando macromoléculas ainda maiores. Processo que pode levar à formação de um gel, ou melhor, uma rede de ligações químicas que alcançam todo o sistema. Flory e Stockmayer desenvolveram uma teoria que hoje se denomina teoria da percolação de rede Bet (a árvore Cayley). Entretanto, ainda é controverso se estes estados críticos de gelificação são descritos corretamente por percolação e se a suposição de que as ligações químicas são formações aleatórias Gennes (1976), Kolb e Axelos (1990) apud Stauffer (1993).

Esta fenomenologia é nosso tema principal no qual baseamos nossa experiência de remoção aleatória de resistores e com a qual estabelecemos sua semelhança com as fraturas. O fenômeno de percolação também é conhecido e estudado em várias outras áreas da ciência como: fluidodinâmica em materiais sólidos, redes de computadores, sistemas desordenados, resistências dos materiais entre outros. Em particular, no estudo das fraturas, esta representa uma excelente metodologia devido sua natureza estocástica de percorrer diferentes caminhos as vezes em forma de fractal. Podemos entender a percolação tomando uma rede ou matriz dividida por quadrados, triângulos ou polígonos iguais de tamanhos arbitrários. Quando estas pequenas partes são preenchidas aleatoriamente por variados meios; dependendo do estudo; seja tinta, condutores ou dissociações moleculares e atômicas, aparecerão pequenos aglomerados ou *clusters* que irão crescer numericamente, ao longo do tempo. No caso da gelificação, as moléculas seriam os pequenos quadrados e os aglomerados as grandes ligações. Sendo assim, a teoria da percolação agora lida com o números e propriedades desses aglomerações. Com isso, podemos fazer uso da estatística, onde  $(p)$  é probabilidade do sítio estar ocupado, isto significa que se temos  $N$  sítios, então  $pN$  destes sítios serão ocupados, e os restantes  $(1 - p) N$  destes sítios estarão vazios. Este é o caso de percolação aleatória que usamos em nosso modelo. Na figura 25 mostramos as treliças quadradas em um conjunto  $60 \times 50$  pontos, com vários aglomerados e linhas de condução (STAUFFER, 1993).

Ao se fazer uma analogia com a interrupção dos componentes resistivos, em que, a corrente através do sistema deve diminuir, ou também de maneira inversa, na qual a corrente através do circuito aumenta. Consideremos este último, e para tanto usemos uma placa plana não condutora que é lentamente preenchida com algum tipo de líquido condutor, enquanto aplicarmos uma diferença de potencial nas extremidades opostas da placa e medimos a corrente com um amperímetro conectado em série ao mesmo. Note que inicialmente não haverá corrente se nenhum líquido condutor estiver espalhado sobre os extremos da placa. Entretanto, se a área da placa for coberta totalmente pelo fluido, então, obviamente, a placa conduzirá uma certa quantidade de corrente. Observe que a corrente só começará se existir um certo percurso ligando os conjuntos de sobreposição dos grãos que conforma o líquido condutor espalhado através da placa e assim permitindo a passagem da corrente (ver gráfico da Figura 26). O ponto onde

Figura 25 – Desenho esquemático representando aglomerados e linhas de percolação

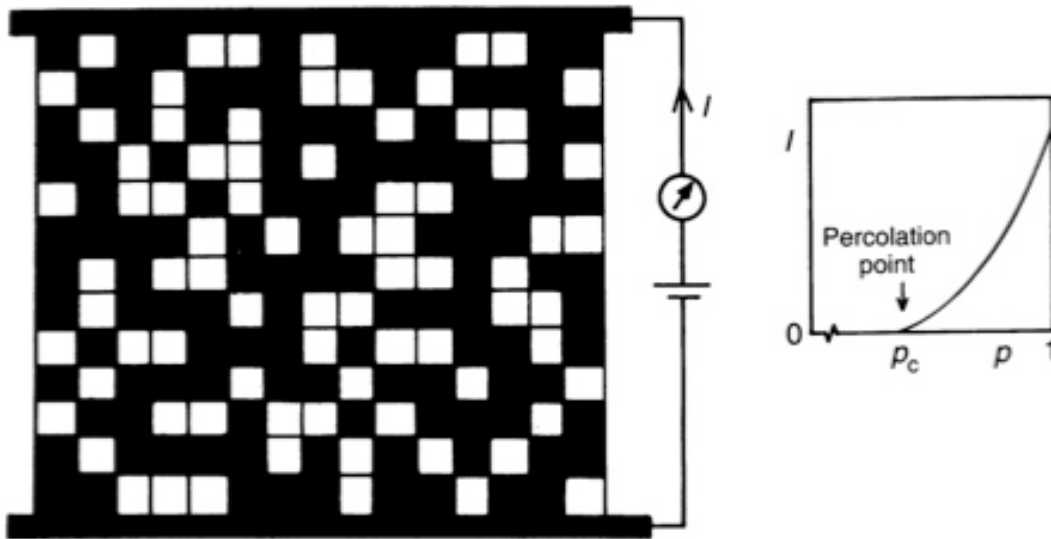


Fonte: (STAUFFER, 1993)

ocorre a condução pela primeira vez é chamado de limiar de percolação. Certamente que com o crescimento numérico de percursos a corrente elétrica também aumentará. Alternativamente, ainda no escopo da teoria da percolação é considerada um exemplo de criticidade, no experimento tratado aqui, esta particularidade emerge no momento em que ao retirarmos uma quantidade mínima de resistores faz-se com que o circuito desligue; anulando assim a corrente elétrica que na sua tentativa de percolar através de um sistema que apresenta cada vez menos caminhos para se propagar. Similarmente, esse fenômeno é uma característica relevante na ocorrência das rupturas, fornecendo um importante ingrediente para a elaboração de um modelo mais geral para fraturas. Com isso, podemos fazer uma analogia entre as rupturas e percolação, isto é, quando um sólido está sob tensão na iminência de desintegrar-se, um incremento no número de microfissuras ou saliências será assemelhado com a diminuição na quantidade de caminhos que facilitem a percolação da corrente no sistema de resistores elétricos.

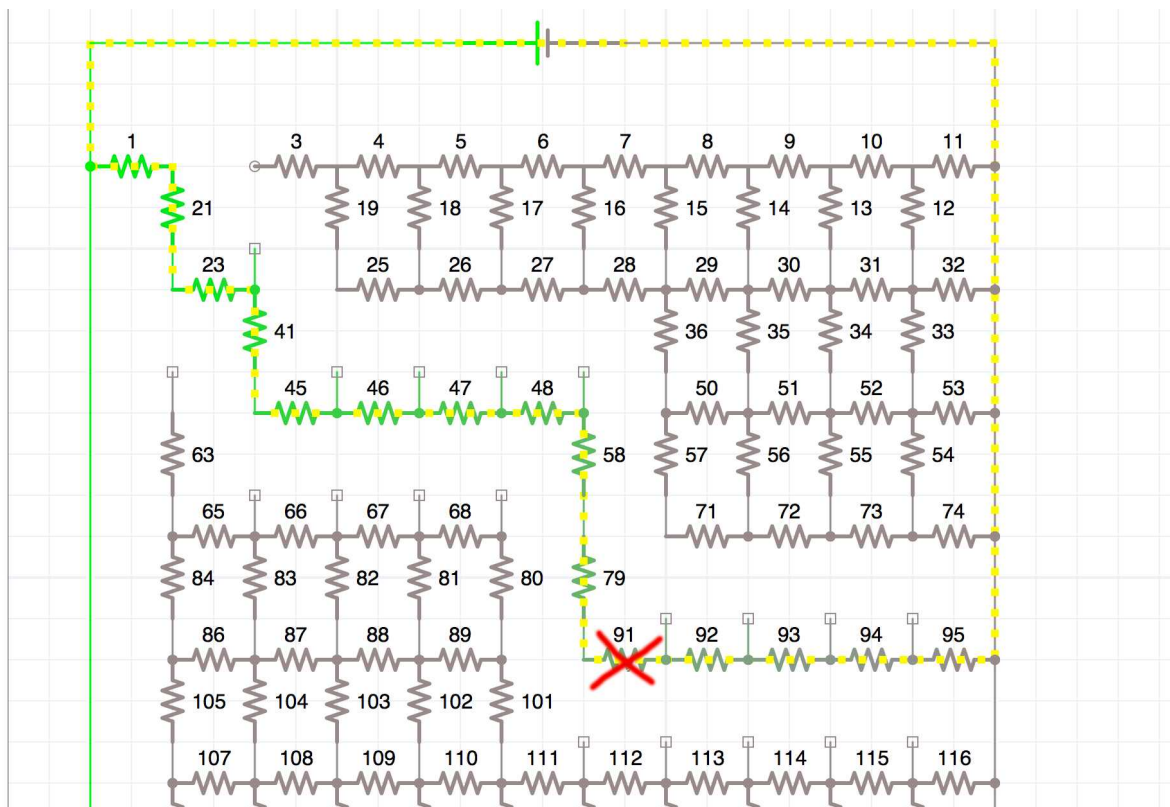
Observe que não será necessário cobrir toda a placa para que ocorra o limiar de percolação, assim também no caso de uma rede de resistores, na qual, não será preciso interromper aleatoriamente todos os componentes resistivos para que a corrente se anule. Na Figura 27, mostramos uma simulação feita usando o software *iCircuit* para uma treliça resistiva, nos quais, foram retirados alguns resistores restando apenas uma linha. Quando estamos prestes de interromper qualquer parte crítica do circuito, por exemplo, o componente de número 91, a corrente elétrica anular-se-á.

Figura 26 – Ilustração representando a percolação e gráfico do limiar de percolação



Fonte: (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997)

Figura 27 – Esquema elétrico mostrando o limiar de percolação em rede de resistores simulada em computador



Fonte: O próprio autor

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Sondagem

Para cumprir nossa meta de pesquisa e incentivo aos temas atuais da física, e por um ensino médio de qualidade, seguimos as orientações da sequência didática que elaboramos no produto educacional, “Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever fraturas em sistemas físicos”. Trabalhamos com uma turma do terceiro ano do ensino médio, em que o objetivo da sondagem, foi de pesquisar quantitativamente os conhecimentos prévios, ou seja, conhecer o quanto os alunos sabiam sobre resistores elétricos, leis físicas que os governam as fraturas e defeitos em redes cristalinas. Os alunos se mostraram muito receptivos e interessados com o novo tema das rupturas em redes resistivas, que gentilmente colaboraram em responder nossos questionários de sondagem e imediatamente os analisamos e obtivemos parâmetros e diagnósticos da classe. Implementados 38 questionários, nos quais apresentaram em sua maioria respostas semelhantes. No anexo A, Figuras 50 à 57, estão presentes quatro respostas escolhidas ao acaso.

Esta sondagem foi dividida em duas partes: Na primeira, uma abordagem sobre conceitos de resistores e resistência equivalente de malhas desenhadas em série e paralelo. Em seguida, questionamos sobre conceitos de fraturas e sua importância no cotidiano. Obtivemos os seguintes resultados.

Tabela 1 – Resultado quantitativo da sondagem

<b>Porcentagem</b>	<b>Conceitos prévios</b>
31,5% conhecem totalmente e 21% conhecem em parte	Sobre a utilidade de um resistor elétrico
65,7% souberam somente o arranjo e 52,6% souberam as equações e o arranjo	Sobre resistores em série ou paralelo
Não souberam responder	Questões: 3, 4, 5 e 6
39,5% responderam satisfatoriamente	Questão 11
Não souberam	Questões: 12, 13 e 14

Apesar de contarmos com presença de estudantes cursando eletrônica básica, o total desconhecimento e por isso sem nenhuma resposta sobre as questões de 3 à 6 e de 12 à 14, perguntas de conteúdos relacionados a: ponte de Wheatstone, desagregação em sólidos e a habilidade com aparelhos para medidas elétricas. Competências que não fazem parte da grade curricular desta série, que em geral estão somente em cursos técnicos.

## 4.2 Sobre as aulas teóricas e práticas

### 4.2.1 Resistores em rede

Apesar das práticas com circuitos estarem no planejamento, a pouca compreensão dos estudantes sobre estes nos motivou a dar mais detalhes e explicações importantes sobre os cálculos e simplificações destas malhas. Para tanto, dividimos os 38 alunos em 13 grupos, distribuímos as placas de montagens, os resistores e os multímetros e pedimos para que montassem uma Pontes de Wheatstone com (todos) os resistores com  $100\Omega$  cada: depois o mesmo foi feito para resistências diferentes, e em seguida uma rede retangular. Por último, pedimos para ligarem uma treliça simétrica. O objetivo foi mostrar na prática se os resultados calculados analiticamente para as resistências equivalentes estavam coerentes com as medidas experimentais. Também, esperamos medir e exemplificar a conexão de resistores em malhas e mostrar que nem sempre a simetria é garantia de uma imediata equivalência, a menos que todos os componentes tenham o mesmo valor ôhmico.

De posse destes conceitos acima expostos nos dois primeiros encontros, na terceira aula, pedimos para que os discentes calculassem a resistência equivalente da rede que iríamos usar na prática de rupturas e estimassem qual seria a corrente inicial antes de remover qualquer resistor. Em seguida os alunos ligaram o circuito e mediram a corrente para verificar se o valor encontrado ficou dentro da margem de erro experimental. Durante este processo prático alguns estudantes ficaram curiosos e ansiosos para ligar o circuito e ver se o aparelho mostraria o valor esperando, isto é, testar a hipótese, um incentivo e motivo para que continuassem a questionar e saber mais sobre o tema. Ficou evidente que, quando deixamos o indivíduo trabalhar a autoaprendizagem e tirar suas próprias conclusões, isso o torna mais confiante e o estimula a conhecer cada vez mais.

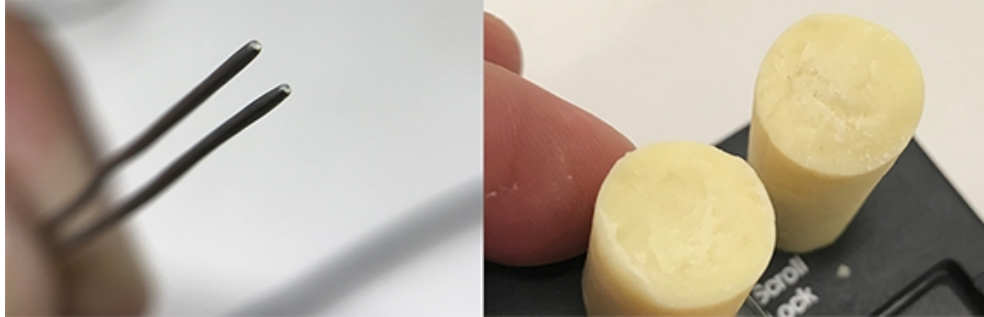
### 4.2.2 Fratura frágil e dúctil

No quarto encontro, após as explicações dos conceitos sobre as fraturas, com uso de imagens e representações na lousa, os estudantes reuniram-se novamente em grupos e pedimos que observassem os tipos de superfícies que deveríamos esperar nos dois tipos de fraturas frágeis e dúcteis. Pedimos que tracionassem o fio de estanho e em seguida uma barra de chocolate branco, lado direito da Figura 28. Por ser difícil de encontrar um tarugo de estanho de diâmetro considerável, optamos em usar aqueles comumente encontrados nas oficinas em reparo de eletrodomésticos, que são muito finos e para fotografá-los foi preciso adaptar uma lente extra no celular, imagem à esquerda da Figura 28. Deixamos claro que para alcançar o sucesso para tais resultados, deve-se levar em conta a temperatura ideal e evitar aquecimento por contato, este último foi muito crítico durante o teste com o chocolate, pois as mãos facilmente aqueciam a amostra sendo necessário recomeçar os testes com outras barras.

Na quinta aula, explicamos que estas características, defeitos e fraturas, são causadas devido a conformação ou arranjo atômico que, nos materiais quebradiços suas ligações fortes

impedem o afastamento até a iminência do rompimento. Enquanto que nos materiais dúcteis esta dissociação é mais elástica (CHAKRABARTI; BENGUIGUI, 1997).

Figura 28 – Fraturas: dúctil e frágil feitas pelos alunos



Fonte: O próprio autor

### 4.3 Ruptura de resistores em rede quadrada

A ruptura aleatória de junções resistivas é um excelente modelo para o estudo de fraturas em sólidos. Nas últimas décadas houve um grande empreendimento em fornecer modelos para fraturas de materiais reais e sistemas desordenados. Uma destas análises de sucesso, descreve o material como uma rede ligações, sendo cada uma dessas descrita por sua natureza elástica e de ruptura, que *a priori* expressam o sistema em nível mesoscópico. A seleção das características de ligações simples com as leis de ruptura e controle de falhas de um elemento específico do sistema, pode fornecer uma variedade de possibilidades para estabelecer modelos estatísticos mais ou menos similares com a ocorrência das fraturas em materiais reais. Naturalmente, comportamentos mais complexos poderiam ser consideradas para as características microscópicas, incluindo, por exemplo, efeitos de fadiga ou plasticidade (HERRMANN; ROUX, 2014).

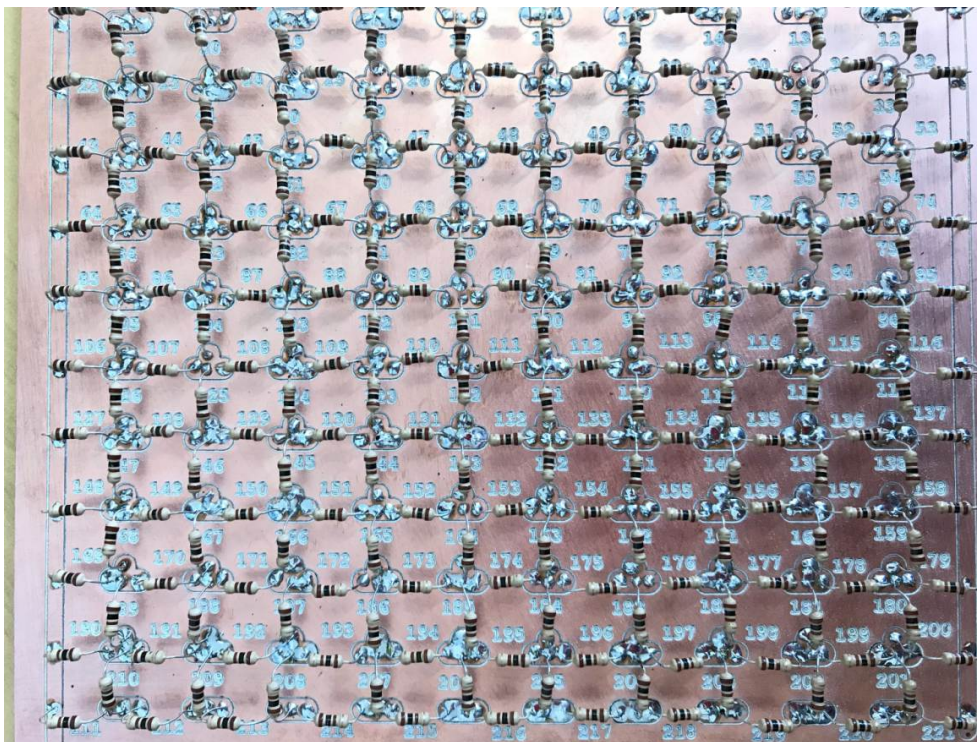
O processo de quebra pode então ocorrer desde que a probabilidade ( $P$ ) seja maior do que o limiar de percolação (meio elástico), para que o módulo de Young seja diferente de zero no sistema, sendo cada elemento da rede um fusível ou resistor elétrico considerado frágil, este possui características lineares de corrente-tensão até um certo limiar, que se transforma irreversivelmente em isolante. Ao aplicar uma tensão externa entre dois lados opostos da placa e ao longo de tempo um ou vários fusíveis são queimados quando a corrente passa do valor limite, até que a rede falha totalmente e não passe mais corrente no sistema (HERRMANN; ROUX, 2014).

A analogia entre a lei de Ohm e a lei de Hooke (corrente versus força, tensão elétrica versus deformação mecânica) pode ser usada para modelar fraturas em meios elástico como modelo escalar. Sendo expresso cada aglomerado da rede por uma única variável, por exemplo a  $ddp$ , cujos valores são encontrados usando as leis de Kirchhof, tendo em consideração as condições de contorno no sistema. Este modelo de rede de fusíveis que se queimam aleatoriamente está

intimamente relacionado ao conhecido Modelo de Quebra Dielétrica, no qual, o meio dielétrico é o resistor que, nos sólidos podem se transformar em junções supercondutoras com uma probabilidade proporcional ao gradiente do potencial elétrico. A evolução de quebra dá origem a um padrão de resistência zero passando pelo sistema. No caso da treliça quadrada, a rede de fusíveis aleatórios é um problema de Modelo de Quebra Dielétrica quando, substituindo-se a queda de tensão pela corrente, e a condutância pela resistência. Com isso, é provável que, mesmo que a rede de fusíveis aleatórios seja um modelo bastante simples, ela ainda possa apresentar uma fenomenologia com aspectos mais complicados. No entanto, podemos usar um modelo mais simples, mantendo a tensão elétrica constante e realizando várias vezes o experimento de desligamentos dos componentes resistivos (HERRMANN; ROUX, 2014).

Neste trabalho, a placa utilizada possui duzentos e vinte e um componentes resistivos, como mostrado na Figura 29. Apesar da quantidade de elementos não ser a ideal, como sugerido nos cálculos numéricos da referência Ortiz e Rajapakse (2002), nosso sistema realístico apresentou resultados dentro da margem razoável, conforme se verifica nos gráficos e resultados nas próximas seções.

Figura 29 – Placa com resistores em rede

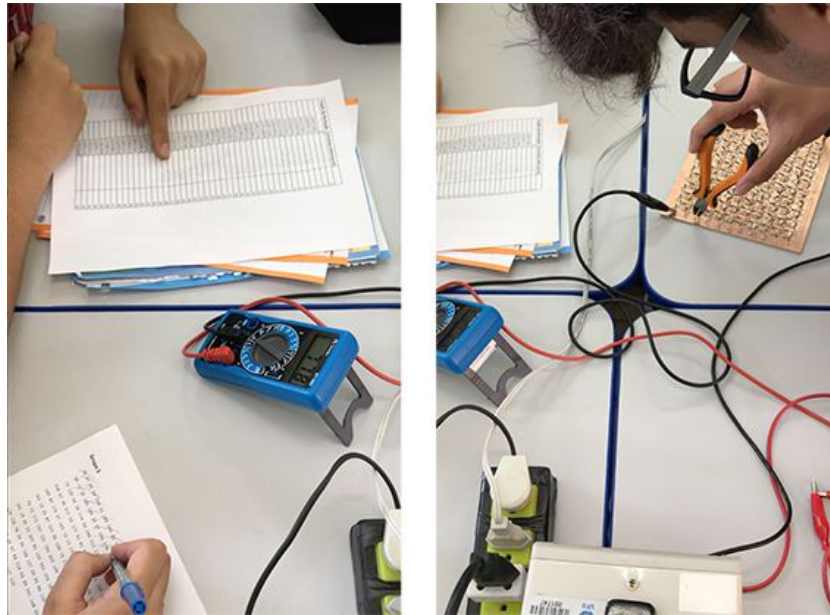


Fonte: O próprio autor

#### 4.4 Aula experimental com os alunos

Para a experiência de interrupções aleatórias da rede, distribuímos treze placas com as respectivas fontes de alimentação, amperímetros, alicate de corte e uma folha contendo números

Figura 30 – Alunos realizando o experimento



Fonte: O próprio autor

Figura 31 – Alunos realizando o experimento

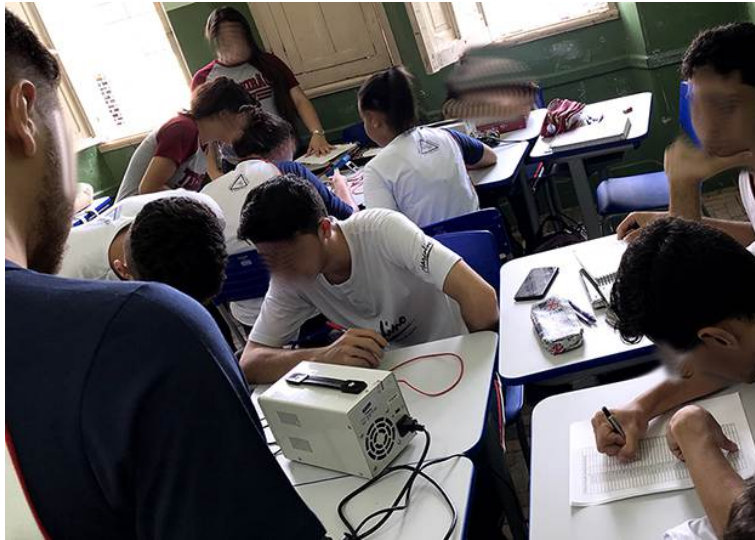


Fonte: O próprio autor

aleatórios. Com a fonte colocada em 10V, os alunos então foram interrompendo os resistores e registrando a fração de elementos removida e a corrente elétrica em miliampères em uma planilha. Ver Figuras 30, 31 e 32.

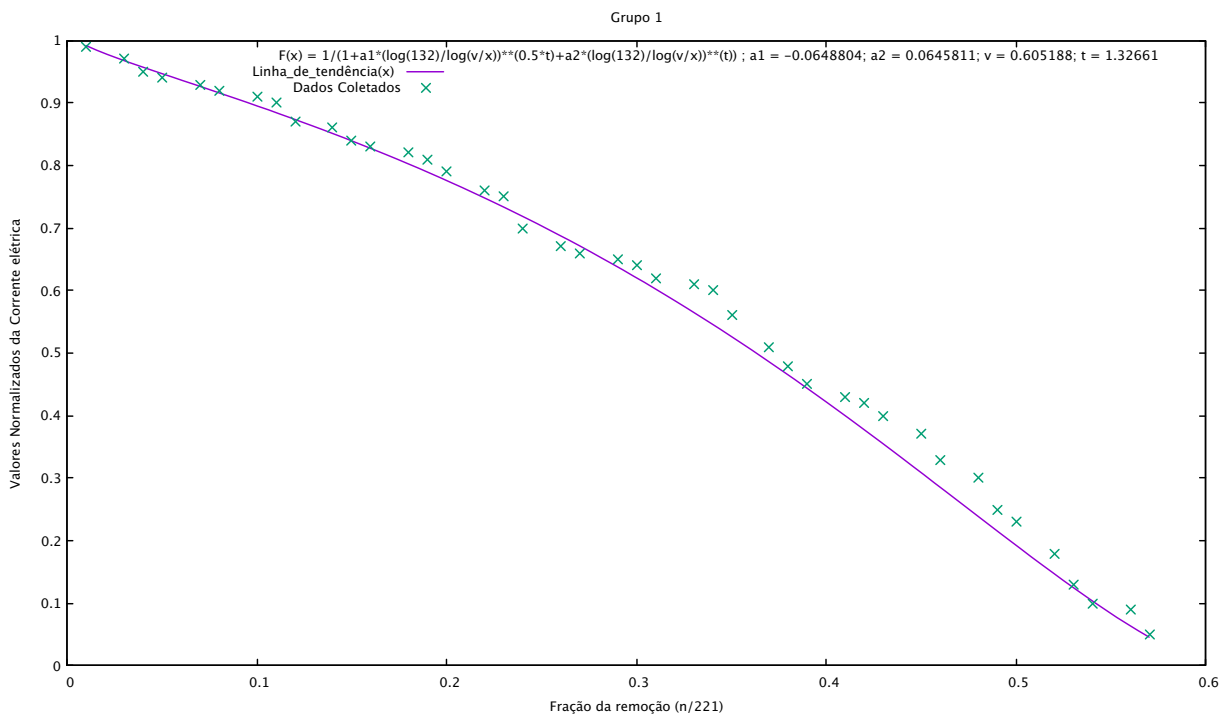
Finalizada a prática, reunimos todos os dados coletados pelos alunos e em seguida computamos e posteriormente os tratamos; ajustamos, normalizamos os valores das correntes e suavizando os pontos conforme detalhes já explicados no produto educacional. Finalmente, através do *software* Gnuplot foram gerados os gráficos das figuras 33 à 44.

Figura 32 – Alunos realizando o experimento



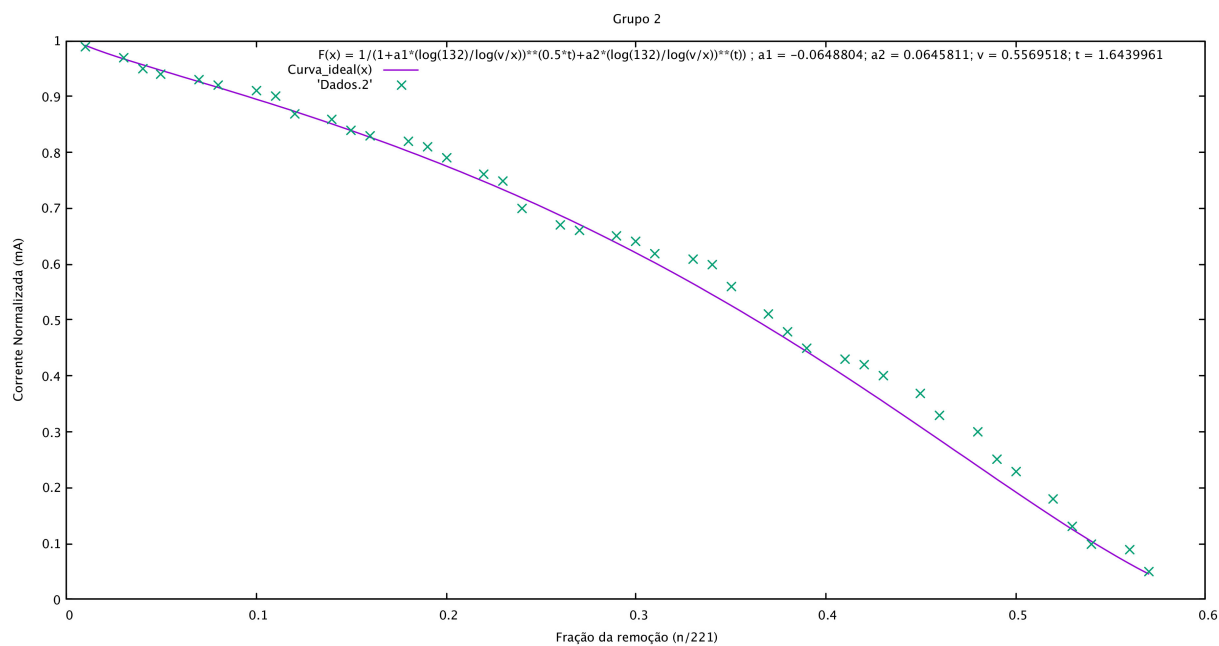
Fonte: O próprio autor

Figura 33 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 1



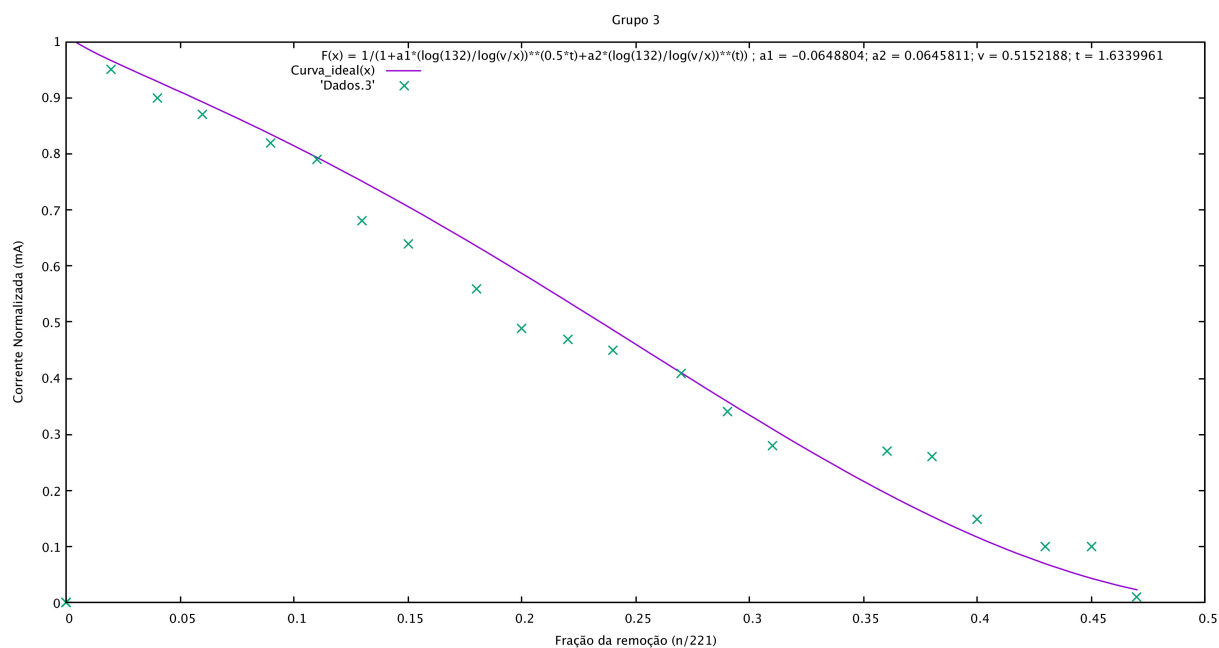
Fonte: O próprio autor

Figura 34 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 2



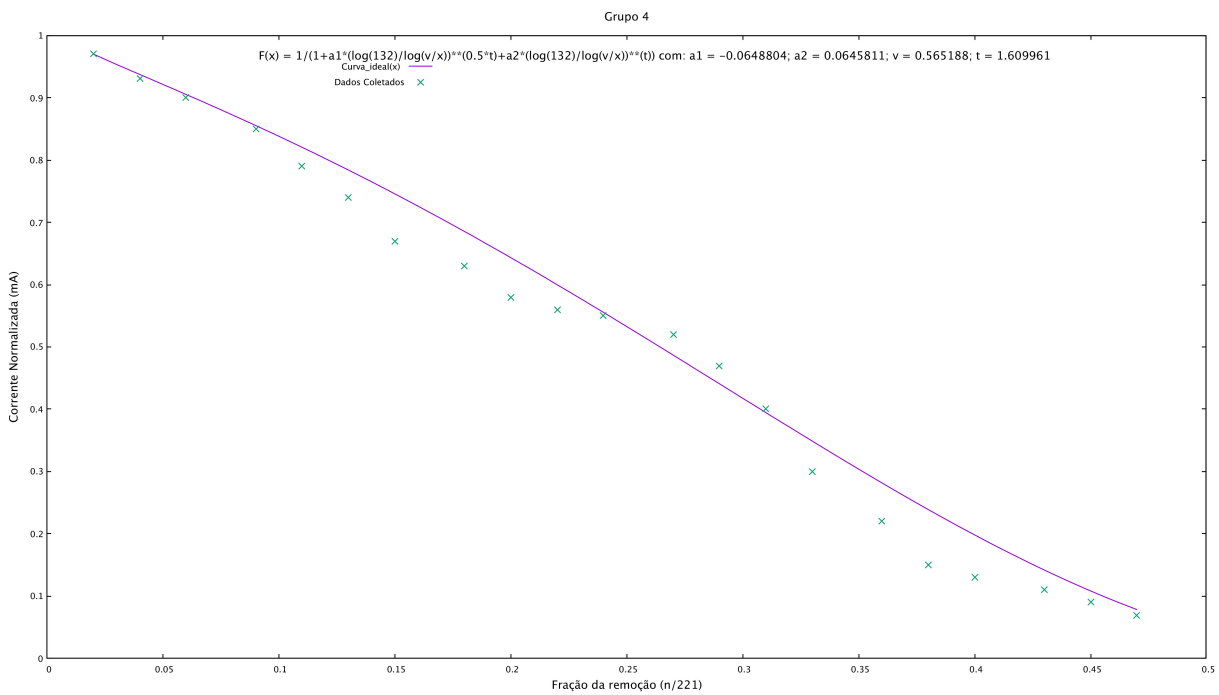
Fonte: O próprio autor

Figura 35 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 3



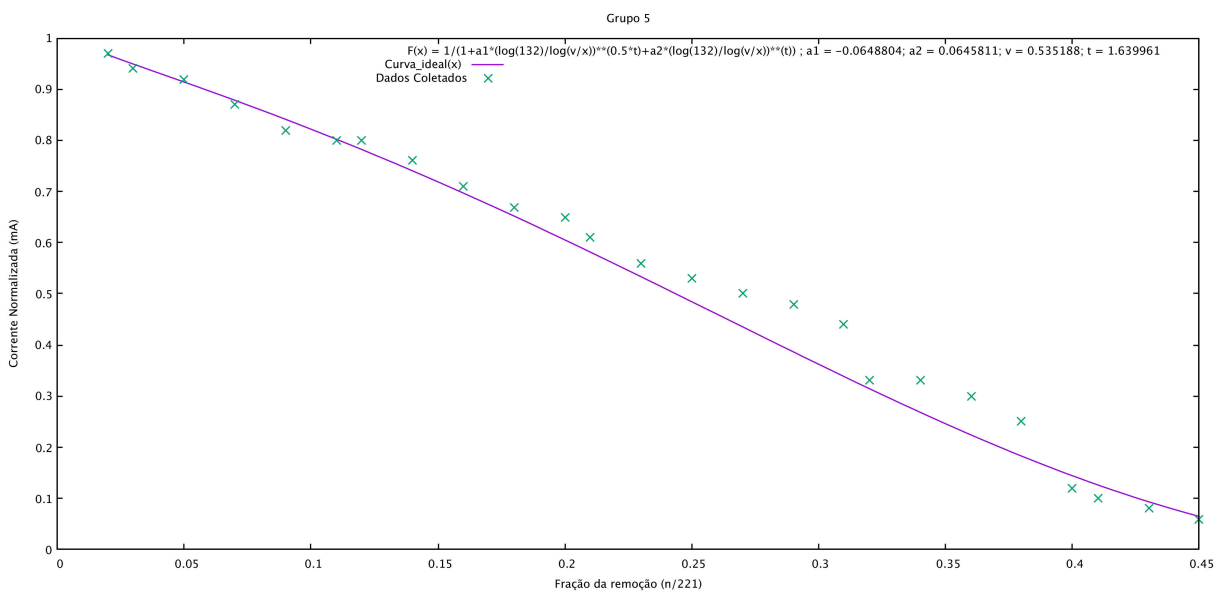
Fonte: O próprio autor

Figura 36 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 4



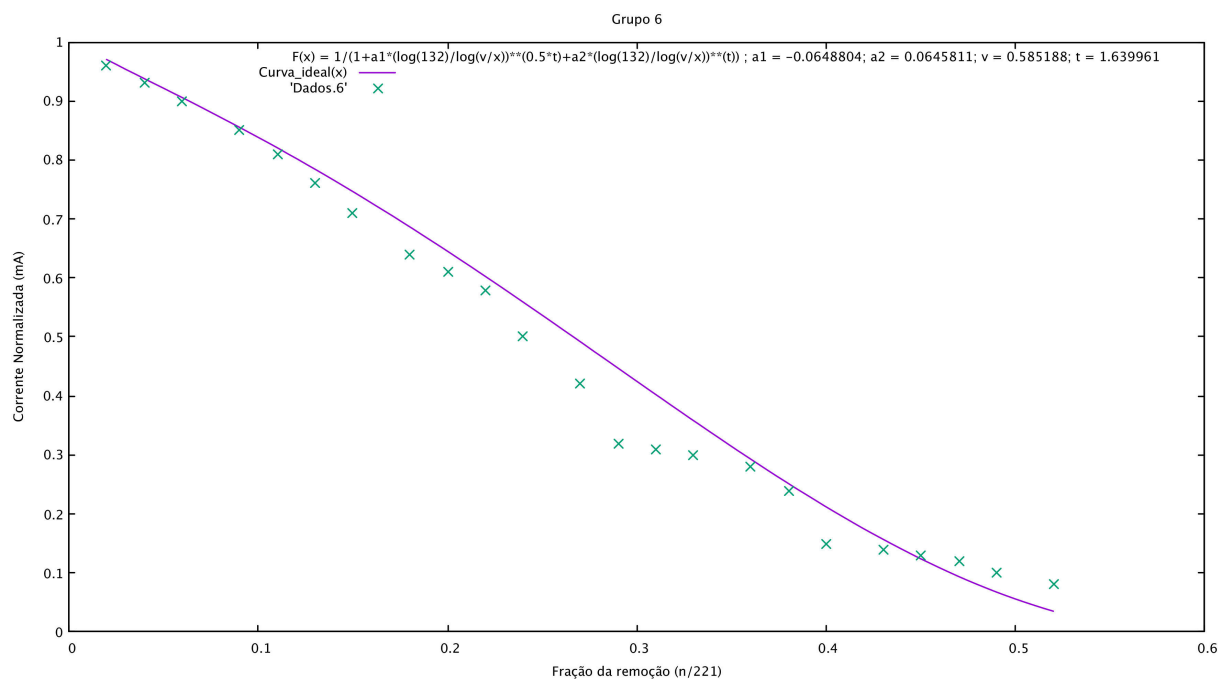
Fonte: O próprio autor

Figura 37 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 5



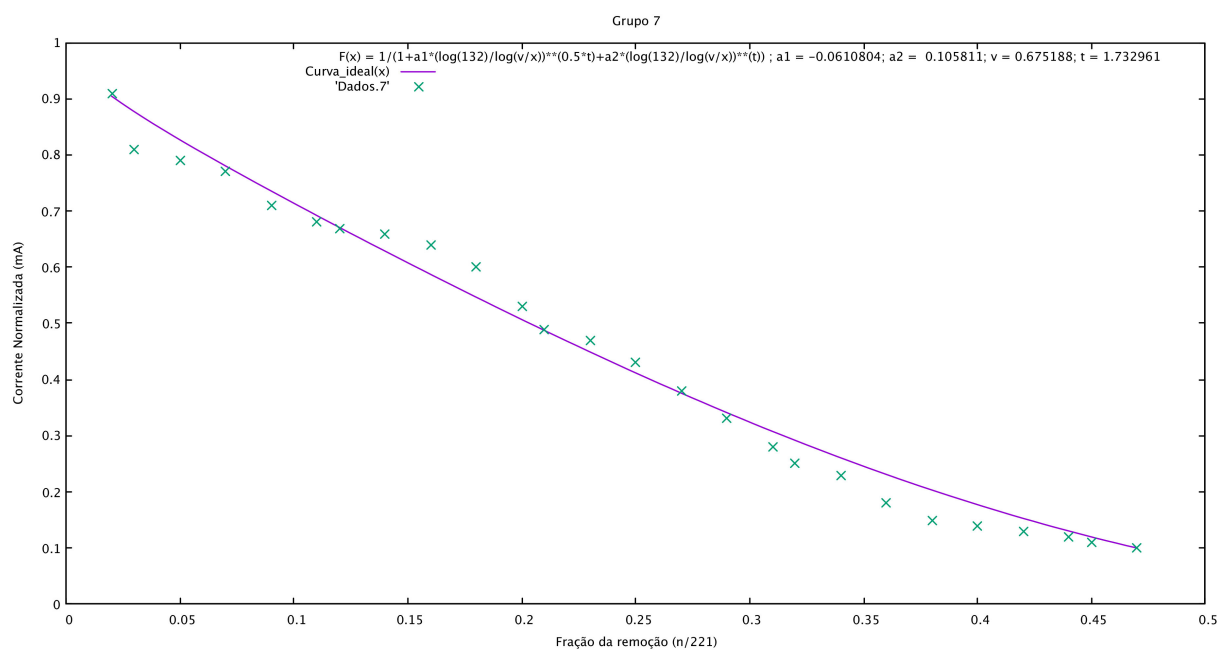
Fonte: O próprio autor

Figura 38 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 6



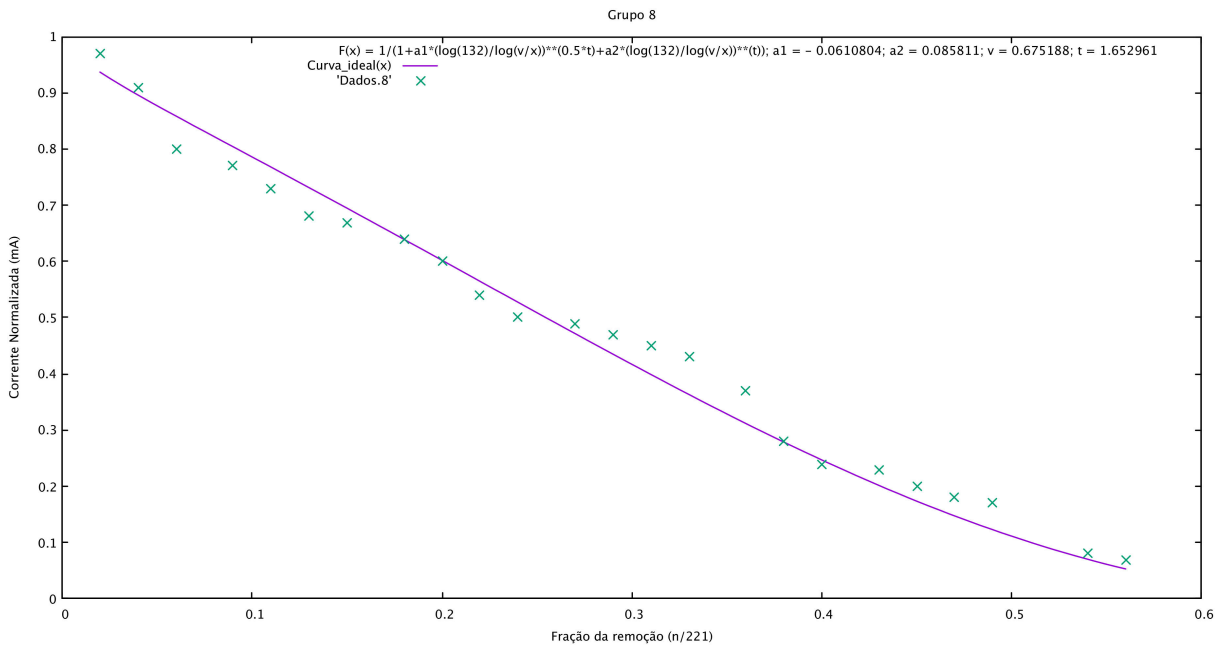
Fonte: O próprio autor

Figura 39 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 7



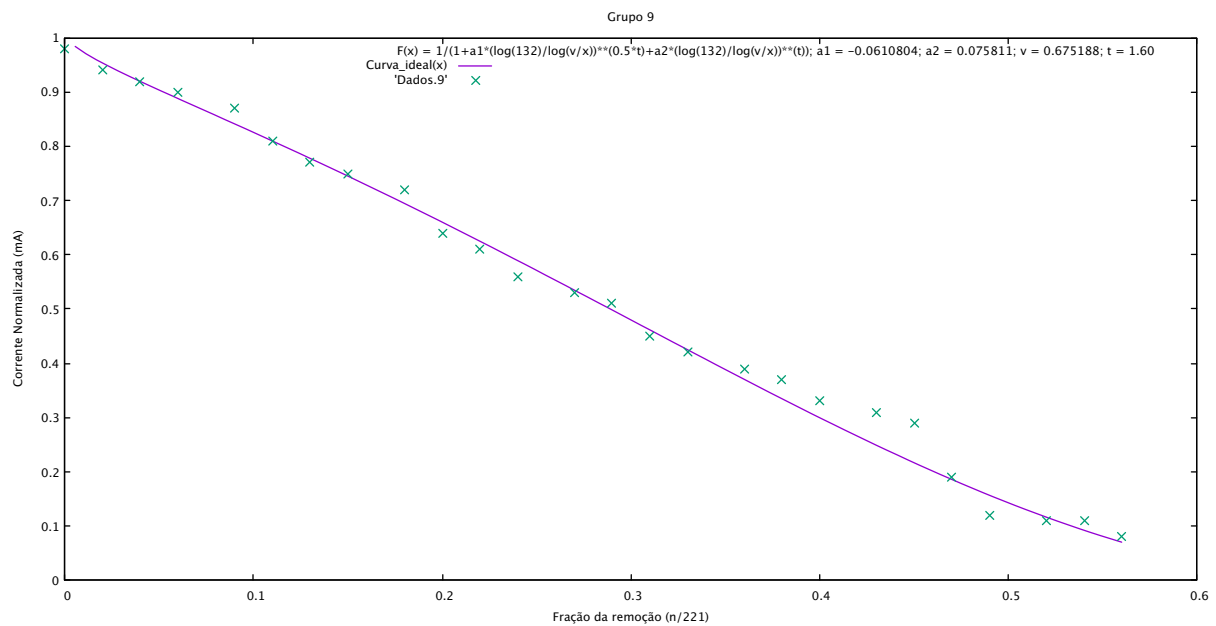
Fonte: O próprio autor

Figura 40 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 8



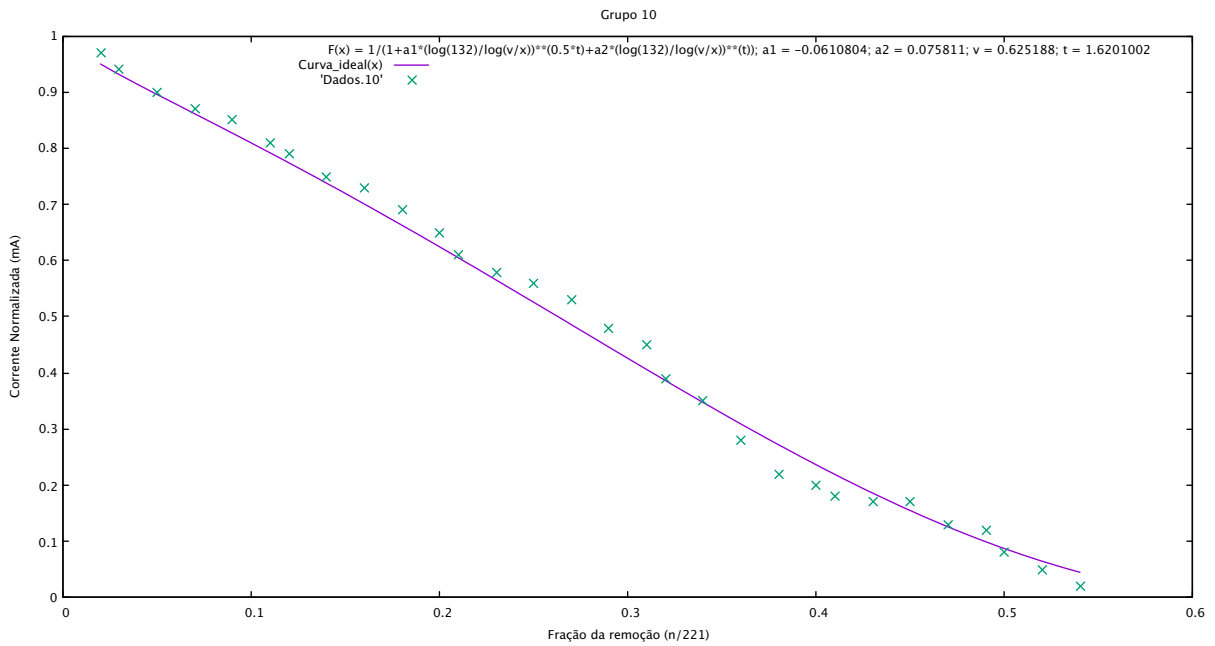
Fonte: O próprio autor

Figura 41 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 9



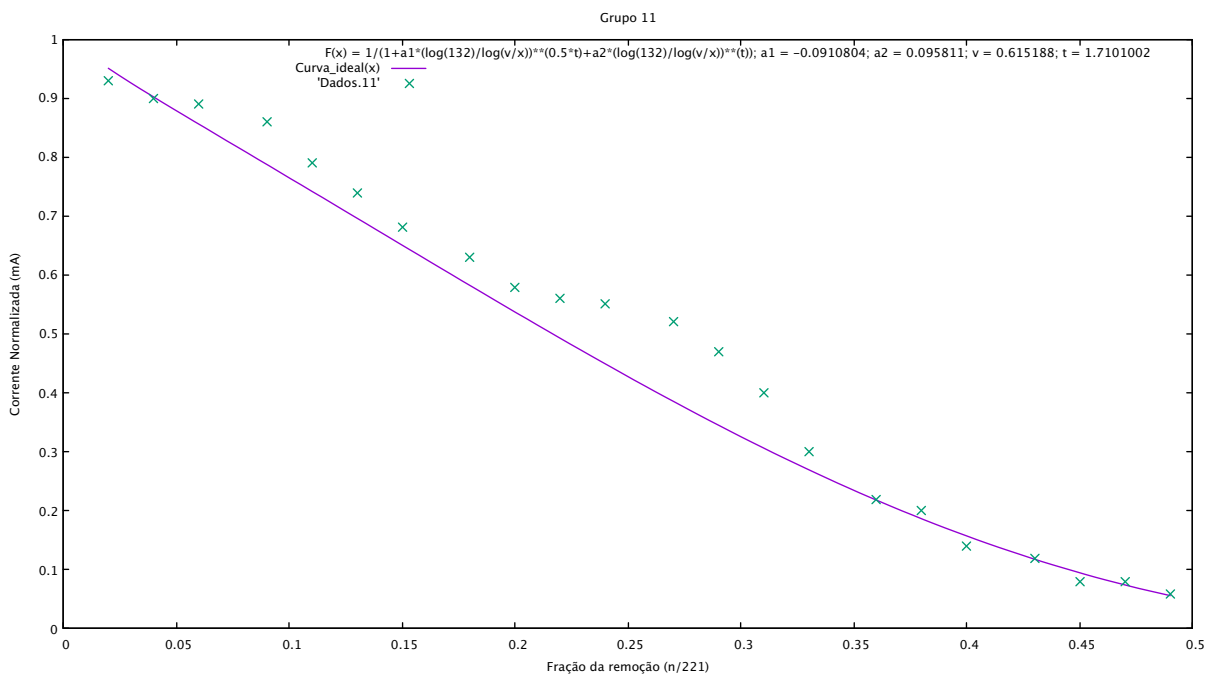
Fonte: O próprio autor

Figura 42 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 10



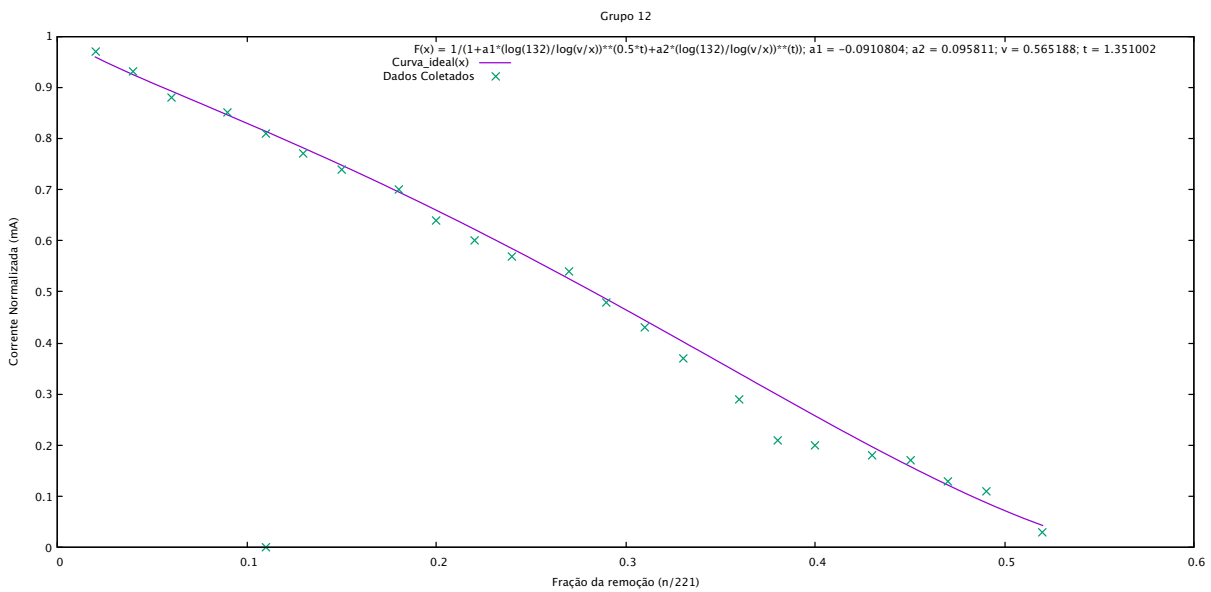
Fonte: O próprio autor

Figura 43 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 11



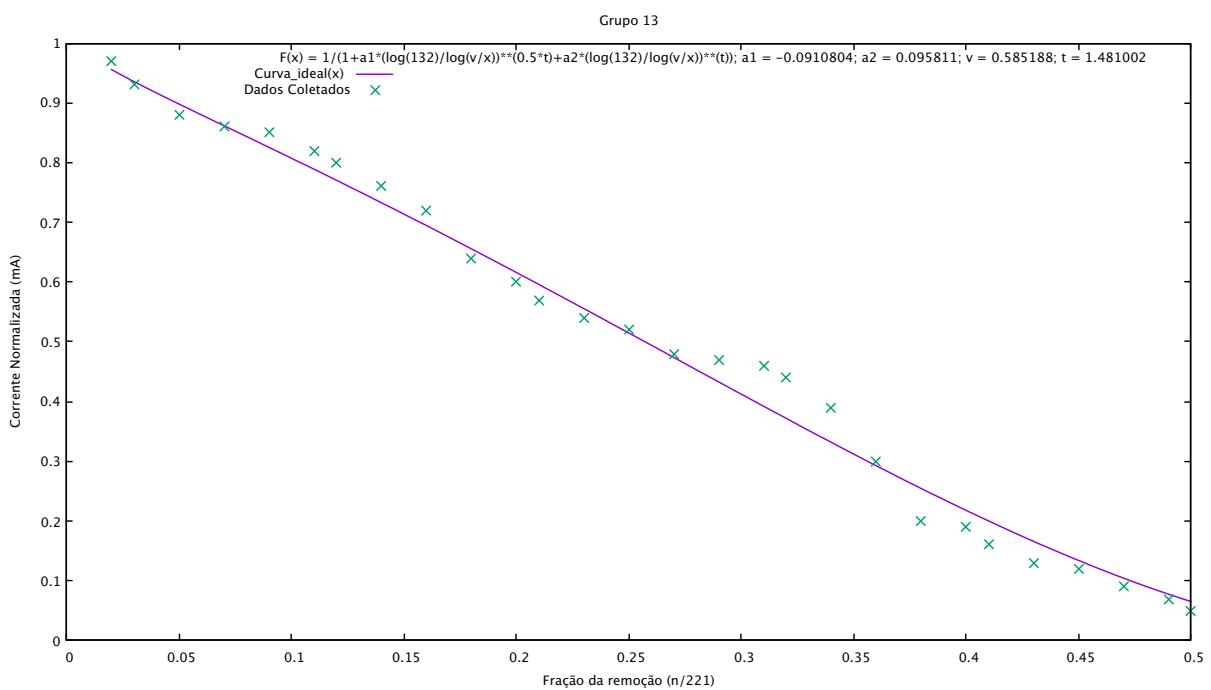
Fonte: O próprio autor

Figura 44 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 12



Fonte: O próprio autor

Figura 45 – Gráfico da corrente em função da fração removida de resistores - grupo 13

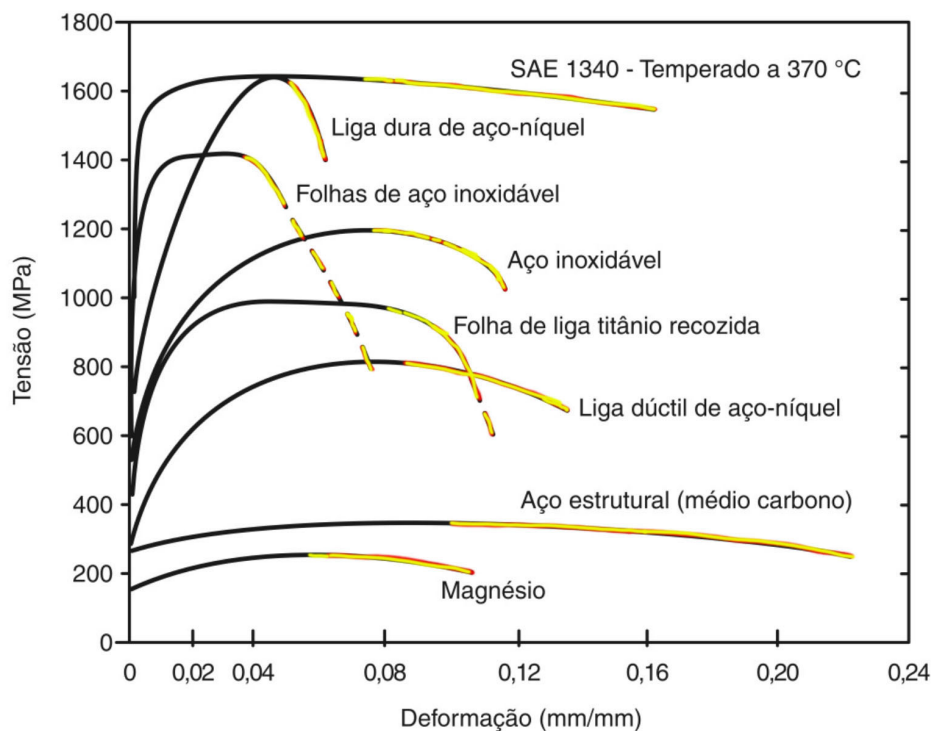


Fonte: O próprio autor

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento das linhas e pontos ilustrados anteriormente podem ser comparados aos da Figura 46. Destacada em cor diferente a parte final da curva, onde iniciou-se a deformação plástica e finalmente o ponto de fratura que, para alguns metais, são semelhantes. Embora, sem relação direta com corrente e tração ou fração de remoções com a deformação. Estas analogias têm sua gênese na linearidade da fenomenologia física deste tipo de experimento. Enquanto na treliça de resistores o comportamento é ôhmico, nos sólidos temos uma natureza elástica prevista pela lei de Hooke.

Figura 46 – Gráfico representando as curvas de tensão deformação para diferentes metais

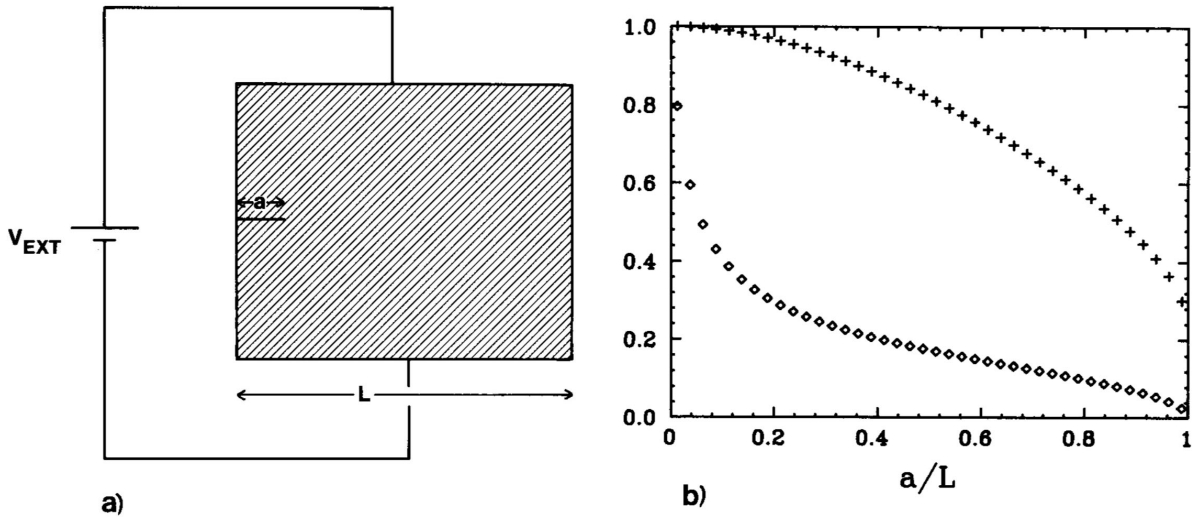


Fonte: (BHATTACHARYA, 2014)

Outra semelhança importante relacionada a rupturas aleatória de resistores, é mostrada na Figura 47, exposta em Herrmann e Roux (2014). Em que, uma placa condutora em treliça quadrada de 80 x 80 e comprimento (L), estando sobre certa diferença de potencial e sujeita a uma fissura de comprimento inicial em (a) que por sua vez, aumenta até a separação total. As curvas apresentadas no gráfico são de condutividade e corrente elétrica, todas em funções da fração rachadura/comprimento.

É importante lembrar que neste modelo de fraturas em malhas resistivas, os dados

Figura 47 – Esquema representando uma placa e seu gráfico de condutividade e ruptura



a) Placa condutora; b) condutividade (+) e corrente de ruptura (◇) Fonte: (HERRMANN; ROUX, 2014)

referentes à corrente em função da fração de interrupções aleatórias de componentes são ajustados pela equação 11, sugerida pela autores Ortiz e Rajapakse (2002),

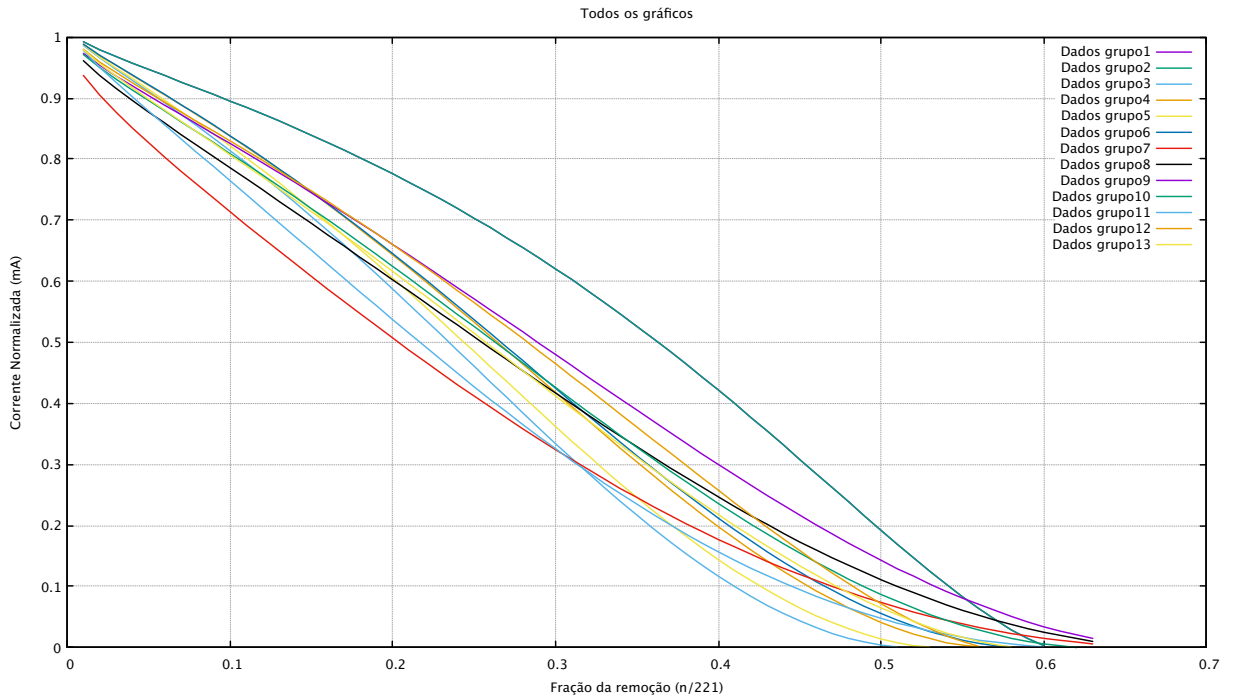
$$I(x) = \frac{1}{1 + a_1 \cdot \left\{ \frac{\ln(131)}{\ln(v/x)} \right\}^{t/2} + a_2 \cdot \left\{ \frac{\ln(131)}{\ln(v/x)} \right\}^t}, \quad (11)$$

sendo  $I(x)_{max}$  a corrente quando uma fração  $x$  arbitrária de componentes resistivos é interrompida, o número de nós presente em nossa malha é 131. Os outros parâmetros envolvidos na equação têm significados físicos importantes:  $v$  é a fração crítica de elementos resistivos removidos que faz com que a corrente no sistema se anule totalmente e o parâmetro  $t$  é o expoente crítico que nos diz sobre a rapidez com que este fenômeno ocorre à medida que o sistema se aproxima da fração crítica. Estes parâmetros são numericamente ajustados, uma vez calculados foram mostrados nos gráficos da figuras 33 à 45.

Uma previsão relatada em Chakrabarti e Benguigui (1997), Ortiz e Rajapakse (2002), é de que em uma rede de condutores bidimensional, a corrente anular-se-á quando a fração de componentes removidos atingir uma quantidade igual à metade. Os resultados obtidos, produto da nossa experimentação, apresentaram valores mais prováveis entre 0,50 e 0,65, como observa-se no gráfico da Figura 48.

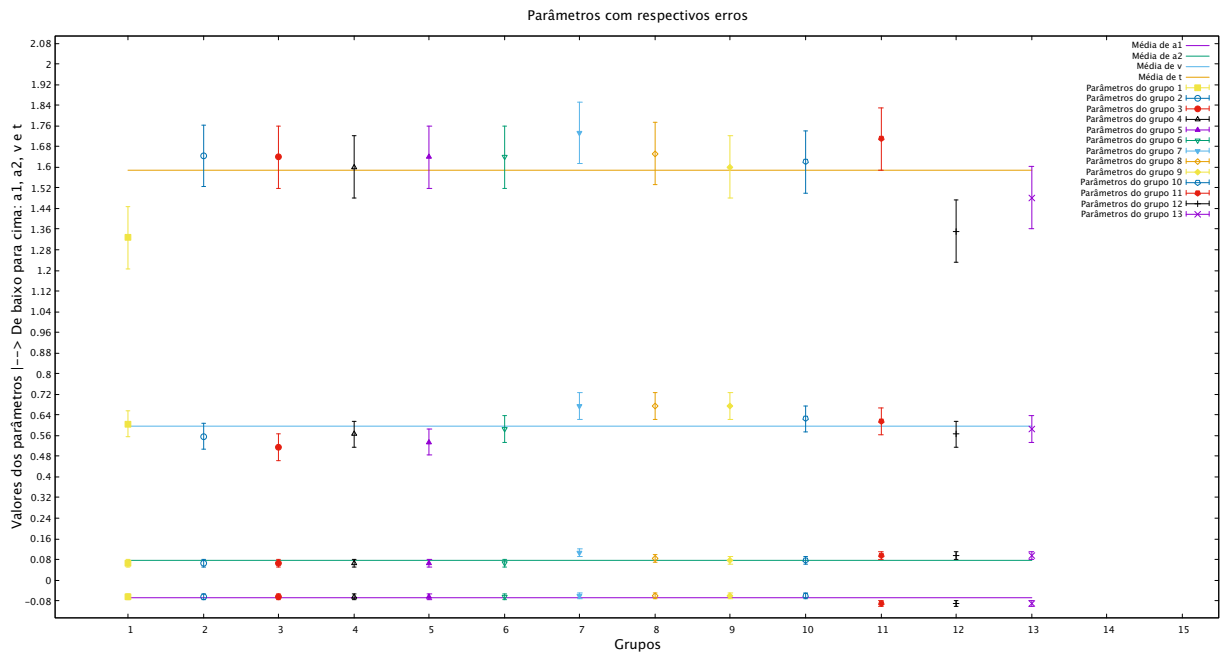
Para uma análise quantitativa reunimos os valores obtidos destas constantes e as mostramos no gráfico da Figura 49. Atente-se que as colunas de 1 à 13 representam os grupos de dados e, os pontos, seguindo em ordem crescente no eixo das ordenadas, estão os valores dos respectivos parâmetros:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $v$  e  $t$ . Obvêrva-se que há pequenas variações ou desvio padrão destes parâmetros, as médias de cada termo são representadas por uma linha horizontal.

Figura 48 – Gráfico com as curvas de todos os grupos



Fonte: O próprio autor

Figura 49 – Gráfico de todos os parâmetros com respectivos desvios padrões



Fonte: O próprio autor

## 5.1 Aprendizagem

Na sétima aula e último encontro, mostramos aos alunos os resultados gráficos de cada experimento, as relações e semelhanças com as rupturas em meios rígidos. Em seguida deixamos um tempo para relatos, perguntas e impressões dos estudantes sobre as aulas práticas e teóricas que trabalhamos em conjunto. Antes do término da aula, retomamos o processo avaliativo com um questionário final, com perguntas relacionadas aos conteúdos e conceitos prévios sondados no primeiro encontro, em que, após as correções, escolhemos ao acaso quatro respostas as quais colocamos no anexo B, Figuras 58 à 65.

Os resultados do questionário final, mostraram uma melhoria na compreensão dos alunos em determinados pontos como apresenta tabela 2.

Tabela 2 – Resultado do questionário final

<b>Porcentagem</b>	<b>Conceitos vistos</b>
56% Souberam	Sobre relação: corrente-resistência
62,3% Acertaram	Cálculo de resistência equivalente
35,6% Mostram noção relativa do assunto	Questões: 3 e 4
67% Responderam satisfatoriamente	Questão 5
56,5% Identificaram corretamente	Questão 6
27,6% Responderam satisfatoriamente	Questão 7

As ideias expressadas pelos estudantes na questão 8 são qualitativas, mas demonstram resultados interessantes, como se vê em algumas respostas tais como: “ agora eu sei usar o multímetro, ou “que o circuito se anula com a retirada dos resistores” e ainda “agora sei usar a fonte”. Estas afirmações deixam claro que alguma parte importante dos conceitos foram assimilados.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados da experiência sobre o modelo de treliça resistiva e fraturas realizadas com os alunos, evidenciaram que o valor da fração-remoção de componentes resistivos é muito semelhante aos relatados pelas referências, assim também como os aspectos físicos qualitativos verificados através das diferentes curvas apresentadas. Um ponto positivo ocorreu quando iniciamos as explicações e relações físicas, nem sempre triviais, sobre resistências e comprimento de fios metálicos, observamos enorme admiração nos alunos quando souberam que: arames de ferro com o mesmo diâmetro têm sua tensão máxima afetada pelo seu comprimento, ou seja, em média, os mais curtos resistem mais. Também percebemos que, durante as aulas sobre o cálculo da resistência em malhas como: Ponte Wheatstone e rede quadradas de resistores, houve grande surpresa por parte dos alunos ao conhecerem o método de encontrar o efetivo valor total do arranjo, somente observando as condições de extremo com o mesmo valor ôhmico, com a ressalva do número de linhas ser idêntico ao de colunas. A busca por soluções de problemas, como ocorreram neste trabalho, deram a oportunidade para uma ação investigativa movida pela curiosidade, e mostrar para outros colegas, soluções rápidas para problemas aparentemente difíceis, e isso cresceu a cada aula. Inferiu-se, portanto, um notável interesse pelo tema como também pela física formal, assim também, sendo uma excelente abordagem para ser trabalhada por qualquer professor interessado em inovar e motivar seus estudantes.

## REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva.** Tradução de Vitor Duarte Teodoro. Lisboa, Plátano, v. 1, 2003.
- BEER, F. P.; JOHNSTON; RUSSELL, E. **Resistência dos materiais.** McGraw-Hill, v. 5, 1982.
- BHATTACHARYA, D. R. **Ciência e Engenharia dos materiais.** 3 Ed. São Paulo. Cengage Learning Editores, 2014.
- BORGES, A. T. **Novos rumos para o laboratório escolar de ciências.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 19, n. 3, p. 291–313, 2002.
- CALLISTER, W. R. **Ciência e engenharia dos materiais, Uma introdução.** 9 Ed. Rio de Janeiro. LTC, 2016.
- CHAKRABARTI, B. K.; BENGUIGUI. **Statistical physics of fracture and breakdown in disordered systems.** Oxford University Press, v. 55, 1997.
- DUXBURY, P.; KIM, S. **Scaling theory of elasticity and fracture in disordered networks.** MRS Online Proceedings Library Archive, v. 207, 1990.
- GALILEI, G. **Dois Novas Ciências. Incluindo: Da Força da Percussão.** Nova Stella Editorial. Tradução e Notas de Letizio, 1935.
- GANDHI, B. **Mechanical Engineering and Strength of Material.** 2017. Disponível em: <<http://www.nptel.ac.in/courses/112107146/1>>. Acesso em: 20 abr, 2017.
- HALPERN, A. M. **3000 solved problems in Physics.** McGraw-Hill, 1988.
- HANSEN, A.; STÉPHANE, R. **Toolbox for damage and fracture, Damage and Fracture of Disordered Materials.** Springer, p. 17–101, 2000.
- HERRMANN, H. J.; ROUX, S. **Statistical models for the fracture of disordered media.** Elsevier, 2014.
- LUND JAY E P. BYRNE, J. **Leonardo Da Vinci's tensile strength tests: Implications for the discovery of engineering mechanics.** v. 00, 06 2001.
- MEDRANO-B, R. A. **Vetoriais, espaços lineares e tensores em física.** São Paulo: INPE, 1989.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem.** Editora pedagógica e universitária São Paulo, 1999.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Mecânica.** Editora Blucher, v. 1, 2013.
- ORTIZ, J. S. E.; RAJAPAKSE, e. a. **Strength reduction in electrical and elastic networks.** Physical Review B, v. 66, n. 14, p. 144203, 2002.
- PENEREIRO, J. C. **Algumas considerações de Galileo e respeito das teorias da semelhança Física, da resistência dos materiais e das flexões.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 27, n. 2, p. 290–312, 2010.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física I: mecânica**. São Paulo. Person Education do Brasil, 2008.

STAUFFER, D. **Introduction to Percolation theory**. *Physics Today*, v. 46, p. 64, 1993.

TEODOR; GURAN, A. **Theory of elasticity for scientists and engineers**. Springer Science & Business Media, 2012.

TUVA, F. **The Challenger Disaster**. 2016. Disponível em: <<http://www.feynman.com/science/the-challenger-disaster>>. Acesso em: 11 fev, 2018.



## **Anexos**

# ANEXO A – RESPOSTAS DA SONDAGEM

Figura 50 – Respostas do aluno-1



**MNPEF** Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Questionário de sondagem para o produto educacional, Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos, do mestrando Airtton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.

19 outubro de 2017

1. Qual é a utilidade de um resistor elétrico em um circuito?

A utilidade de um resistor elétrica em um circuito é transformar energia elétrica em outro tipo de energia para dissipar calor.

2. Desenhe dois circuitos, um contendo 3 resistores em série e outro com 3 resistores em paralelo. Depois escreva as equações para o cálculo da resistência equivalente para cada um dos circuitos.

*Resistores em Série*

$i_1 = i_2 = i_3$   
 $U = U_1 + U_2 + U_3$   
 $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

*Resistores em Paralelo*

$i = i_1 + i_2 + i_3$   
 $U = U_1 = U_2 = U_3$   
 $R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$

*Dois Resistores*

$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

*N Resistores*

$R_{eq} = \frac{R}{n}$

3. Você já teve a curiosidade de saber como se calcula a resistência equivalente de um circuito muito grande e de ligações muito complexas? Caso afirmativo, como era e seu circuito?

Não.

4. Você conhece a ligação de resistores conhecida como Ponte de Wheatstone? Caso negativo, vá para questão 6.

Não.

Figura 51 – Respostas da página 2 do aluno-1

5. Como se calcula a resistência equivalente da ponte de Wheatstone?

Não sei.

6. Comente sobre o que sabe sobre as duas leis de Kirchhoff.

Não sei nada sobre Kirchhoff.

7. Você já fez um modelo para demonstrar ou entender um fenômeno físico? Se sim, em qual?

Não.

8. Você sabe ou gostaria de saber como e porque as coisas se quebram? Caso afirmativo explique o que você sabe.

Gostaria de saber.

9. Você conhece algum tipo de material extremamente resistente que possamos usar no lugar de uma corda?

Fio de náilon.

10. Marque umas das opções abaixo como você julgaria a utilidade de termos algum tipo de aviso, para o qual, algo está prestes a se quebrar?

a) Muito útil      b) pouco interessante      c) sem importância.

11. Qual a diferença entre material dúctil e frágil?

A diferença é que material dúctil é mais difícil de quebrar, enquanto o frágil é mais fácil.

12. Você alguma vez já manuseou ou saber usar um amperímetro?

Não.

13. Você alguma vez já usou ou saber usar uma fonte de tensão ajustável?

Não.

14. Você sabe fazer gráficos, a partir de tabelas, no computador?

Sim.

Figura 52 – Respostas do aluno-2



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Questionário de sondagem para o produto educacional, Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos, do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.

19 outubro de 2017

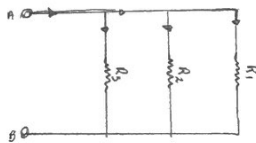
1. Qual é a utilidade de um resistor elétrico em um circuito?

É transformar energia elétrica em energia mecânica, térmica, etc.  
Ex.: chuveiro, lâmpada...

2. Desenhe dois circuitos, um contendo 3 resistores em série e outro com 3 resistores em paralelo. Depois escreva as equações para o cálculo da resistência equivalente para cada um dos circuitos.



Paralelo



3. Você já teve a curiosidade de saber como se calcula a resistência equivalente de um circuito muito grande e de ligações muito complexas? Caso afirmativo, como era e seu circuito?

Sim, ponto de Wheatstone :)

4. Você conhece a ligação de resistores conhecida como Ponte de Wheatstone? Caso negativo, vá para questão 6.

não :c

Fonte: O próprio autor

Figura 53 – Respostas da página 2 do aluno-2

5. Como se calcula a resistência equivalente da ponte de Wheatstone?

6. Comente sobre o que sabe sobre as duas leis de Kirchhoff. apenas a 1ª  
 1ª Lei = soma da intensidades das correntes = soma das intensidades que  
 chegam no são dele  

$$I_1 = I_2 + I_3$$

7. Você já fez um modelo para demonstrar ou entender um fenômeno físico? Se sim, em qual?

8. Você sabe ou gostaria de saber como e porque as coisas se quebram? Caso afirmativo explique o que você sabe.

Gostaria de saber. Imagino que seja por causa de algum tipo de pressão ou tensão colocada sobre algum objeto que faz com que ele se deforme ou se quebre.

9. Você conhece algum tipo de material extremamente resistente que possamos usar no lugar de uma corda?

Elasticos, talvez. Fios de aço.

10. Marque umas das opções abaixo como você julgaria a utilidade de termos algum tipo de aviso, para o qual, algo está prestes a se quebrar?

a) Muito útil      b) pouco interessante      c) sem importância.

11. Qual a diferença entre material dúctil e frágil?

↙	↓
não se	se deforma
deforma	fácil
facil	

12. Você alguma vez já manuseou ou saber usar um amperímetro?

não

13. Você alguma vez já usou ou saber usar uma fonte de tensão ajustável?

não.

14. Você sabe fazer gráficos, a partir de tabelas, no computador?

não

Fonte: O próprio autor

Figura 54 – Respostas do aluno-3



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Questionário de sondagem para o produto educacional, Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos, do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.

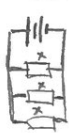
19 outubro de 2017

1. Qual é a utilidade de um resistor elétrico em um circuito?

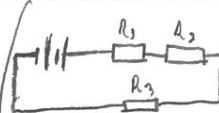
Impedir a passagem do corrente.

Transforma energia elétrica em calor. (EFEITO JOULE)

2. Desenhe dois circuitos, um contendo 3 resistores em série e outro com 3 resistores em paralelo. Depois escreva as equações para o cálculo da resistência equivalente para cada um dos circuitos.



$$R_{eq} = \frac{R_{resistor\ 1} \times R_{resistor\ 2} \times R_{resistor\ 3}}{n^{\circ} \text{ de resistor}}$$

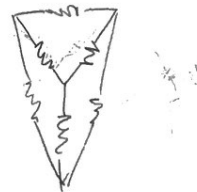


$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

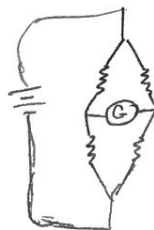
$R = X$

3. Você já teve a curiosidade de saber como se calcula a resistência equivalente de um circuito muito grande e de ligações muito complexas? Caso afirmativo, como era e seu circuito?

Circuitos Estrela-triângulo



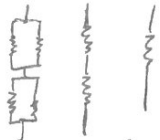
4. Você conhece a ligação de resistores conhecida como Ponte de Wheatstone? Caso negativo, vá para questão 6.



Fonte: O próprio autor

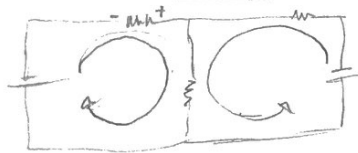
Figura 55 – Respostas da página 2 do aluno-3

5. Como se calcula a resistência equivalente da ponte de Wheatstone?



6. Comente sobre o que sabe sobre as duas leis de Kirchhoff.

*Lei das malhas*



7. Você já fez um modelo para demonstrar ou entender um fenômeno físico? Se sim, em qual?

*Sim. O que acontece com um cabo quando ocorre uma sobrecarga*

8. Você sabe ou gostaria de saber como e porque as coisas se quebram? Caso afirmativo explique o que você sabe.

*Por meio de vibrações semelhantes ao do material, por quando o material não consegue flexionar.*

9. Você conhece algum tipo de material extremamente resistente que possamos usar no lugar de uma corda?

*Cabo de Aço*

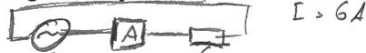
10. Marque umas das opções abaixo como você julgaria a utilidade de termos algum tipo de aviso, para o qual, algo está prestes a se quebrar?

a) Muito útil    ~~b) pouco interessante~~    c) sem importância.

11. Qual a diferença entre material dúctil e frágil?

*a sua resistência*

12. Você alguma vez já manuseou ou saber usar um amperímetro?



13. Você alguma vez já usou ou saber usar uma fonte de tensão ajustável?

*Sim de 30V cc*

14. Você sabe fazer gráficos, a partir de tabelas, no computador?

*+ -*

Figura 56 – Respostas do aluno-4



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Questionário de sondagem para o produto educacional, Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos, do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.

19 outubro de 2017

1. Qual é a utilidade de um resistor elétrico em um circuito?

2. Desenhe dois circuitos, um contendo 3 resistores em série e outro com 3 resistores em paralelo. Depois escreva as equações para o cálculo da resistência equivalente para cada um dos circuitos.



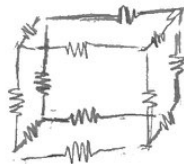
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

3. Você já teve a curiosidade de saber como se calcula a resistência equivalente de um circuito muito grande e de ligações muito complexas? Caso afirmativo, como era e seu circuito?

*Sim.*




4. Você conhece a ligação de resistores conhecida como Ponte de Wheatstone? Caso negativo, vá para questão 6.

## Figura 57 – Respostas da página 2 do aluno-4

5. Como se calcula a resistência equivalente da ponte de Wheatstone?
6. Comente sobre o que sabe sobre as duas leis de Kirchhoff.
7. Você já fez um modelo para demonstrar ou entender um fenômeno físico? Se sim, em qual?
8. Você sabe ou gostaria de saber como e porque as coisas se quebram? Caso afirmativo explique o que você sabe.  
*Sim, gostaria de saber*
9. Você conhece algum tipo de material extremamente resistente que possamos usar no lugar de uma corda?
10. Marque umas das opções abaixo como você julgaria a utilidade de termos algum tipo de aviso, para o qual, algo está prestes a se quebrar?  
 a) Muito útil      b) pouco interessante      c) sem importância.
11. Qual a diferença entre material dúctil e frágil?
12. Você alguma vez já manuseou ou saber usar um amperímetro?
13. Você alguma vez já usou ou saber usar uma fonte de tensão ajustável?
14. Você sabe fazer gráficos, a partir de tabelas, no computador?


## ANEXO B – QUESTIONÁRIO FINAL

Figura 58 – Respostas da página 1 do aluno1 - Errata: na questão (1) a termo “rede” deve ser entendido como uma malha composta por todos os resistores



**UFG**

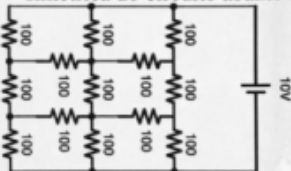
**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



**SBF**  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

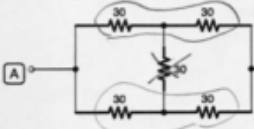
Questionário final aplicado após as aulas práticas do produto educacional “Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos” do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.  
**23 novembro de 2017**

1. O que acontece com o valor da corrente elétrica a medida que retiramos resistores da rede simétrica do circuito abaixo?



*Diminui*

2. Qual o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito abaixo? Você se lembra que circuito é esse?



*Todos iguais.*

*Ponte de Wheatstone?*

$$R_1 = 30 + 30 = 60$$

$$R_2 = 30 + 30 = 60$$

$$R_{eq} = \frac{60}{2} = \boxed{30}$$

3. Você notou alguma semelhança entre um sólido se quebrando e nosso modelo de desligamentos sucessivos de resistores na placa?

*Usa sólidos desligam porvendo os resistores.*

4. Você se lembra de algumas das causas das fraturas em sólidos?

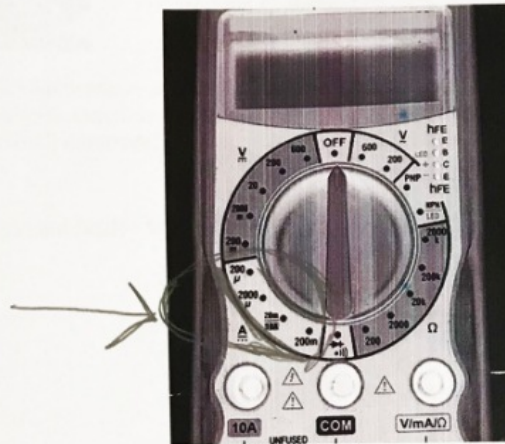
*Problemas nas moléculas ou ligação*

5. Quando se diz que, o ouro é um metal extremamente dúctil, o significa isso?

*Dignifico que pode ser moldado ou esticado não quebra.*

Figura 59 – Respostas da página 2 do aluno1

6. Marque o local da escala usada para medir corrente elétrica no multímetro da figura abaixo.



7. Qual a vantagem e fazer gráficos no computador?

*mais facil e bonito*

8. Depois todas as aulas sobre o tema, que você aprendeu?

*A medir resistores, aprendi que a corrente zera no final.*

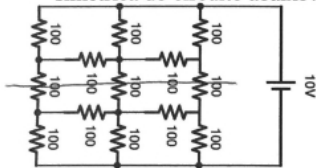
Figura 60 – Respostas da página 1 do aluno2


**UFG** **MNPEF** Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física **SBF** SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Questionário final aplicado após as aulas práticas do produto educacional "Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos" do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.

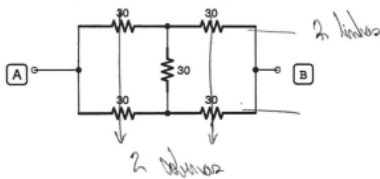
**23 novembro de 2017**

1. O que acontece com o valor da corrente elétrica a medida que retiramos resistores da rede simétrica do circuito abaixo?



*A corrente se anula.*

2. Qual o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito abaixo? Você se lembra que circuito é esse?



*Porque o número de colunas é igual ao número de linhas e os resistores são iguais.*

$$R_{eq} = 30 \Omega$$

3. Você notou alguma semelhança entre um sólido se quebrando e nosso modelo de desligamentos sucessivos de resistores na placa?

*Sim. Os casos tem desligamentos de componentes.*

4. Você se lembra de algumas das causas das fraturas em sólidos?

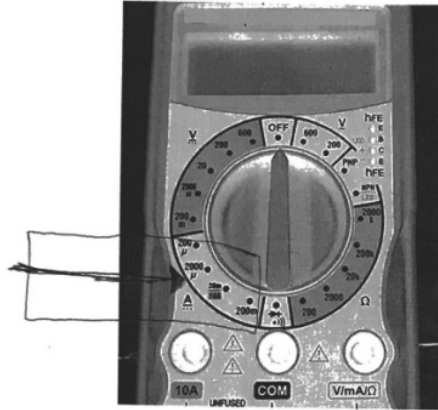
*Defeitos nos ligamentos e fraturas.*

5. Quando se diz que, o ouro é um metal extremamente dúctil, o significa isso?

*É que o ouro pode ser facilmente moldado.*

Figura 61 – Respostas da página 2 do aluno2

6. Marque o local da escala usada para medir corrente elétrica no multímetro da figura abaixo.



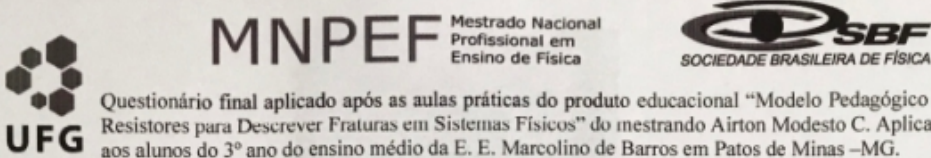
7. Qual a vantagem e fazer gráficos no computador?

rápido e preciso.

8. Depois todas as aulas sobre o tema, que você aprendeu?

A montar circuito na placa, a medir com aparelhos, medir corrente e resistor e usar a fonte

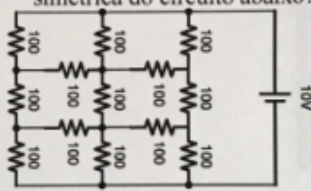
Figura 62 – Respostas da página 1 do aluno3



Questionário final aplicado após as aulas práticas do produto educacional “Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos” do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.

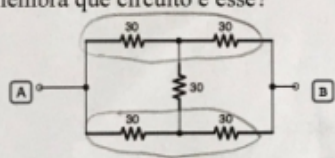
**23 novembro de 2017**

1. O que acontece com o valor da corrente elétrica a medida que retiramos resistores da rede simétrica do circuito abaixo?



A corrente vai parando.

2. Qual o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito abaixo? Você se lembra que circuito é esse?



$R_{eq} = 30 + 30$   
 $R_{eq} = 60 \Omega$

$R_{eqT} = \frac{60 \cdot 60}{60 + 60}$   
 $R_{eqT} = \frac{3600}{120}$   
 $R_{eqT} = 30 \Omega$

3. Você notou alguma semelhança entre um sólido se quebrando e nosso modelo de desligamentos sucessivos de resistores na placa?  
 Quando os sólidos quebram as ligações moleculares se desfazem igual aos resistores.

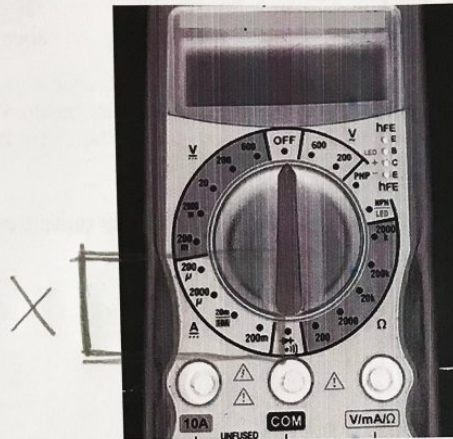
4. Você se lembra de algumas das causas das fraturas em sólidos?  
 Defeitos em suas ligações

5. Quando se diz que, o ouro é um metal extremamente dúctil, o significa isso?  
 Que é um material muito mole e pode ser esticado bastante sem quebrar.

Fonte: O próprio autor

Figura 63 – Respostas da página 2 do aluno3

6. Marque o local da escala usada para medir corrente elétrica no multímetro da figura abaixo.



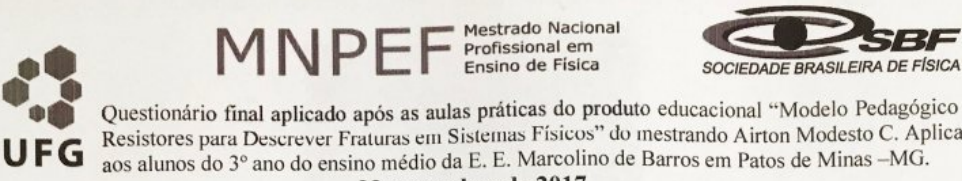
7. Qual a vantagem e fazer gráficos no computador?

Fica mais fácil e detalhado.

8. Depois todas as aulas sobre o tema, que você aprendeu?

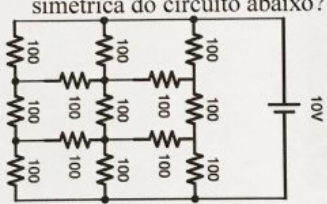
Aprendi a usa a Fonte e o multímetro.   
Que coisas mais duras quebram sem esticar.

Figura 64 – Respostas da página 1 do aluno4



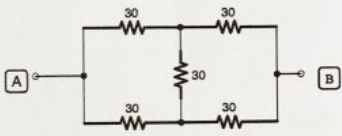
Questionário final aplicado após as aulas práticas do produto educacional “Modelo Pedagógico de Resistores para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos” do mestrando Airton Modesto C. Aplicado aos alunos do 3º ano do ensino médio da E. E. Marcolino de Barros em Patos de Minas –MG.  
**23 novembro de 2017**

1. O que acontece com o valor da corrente elétrica a medida que retiramos resistores da rede simétrica do circuito abaixo?



*umenta*

2. Qual o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito abaixo? Você se lembra que circuito é esse?



*Não sei dizer*

*Levô de alguma coisa*

3. Você notou alguma semelhança entre um sólido se quebrando e nosso modelo de desligamentos sucessivos de resistores na placa?

*U dois quebram*

4. Você se lembra de algumas das causas das fraturas em sólidos?

*Das muito fracas*

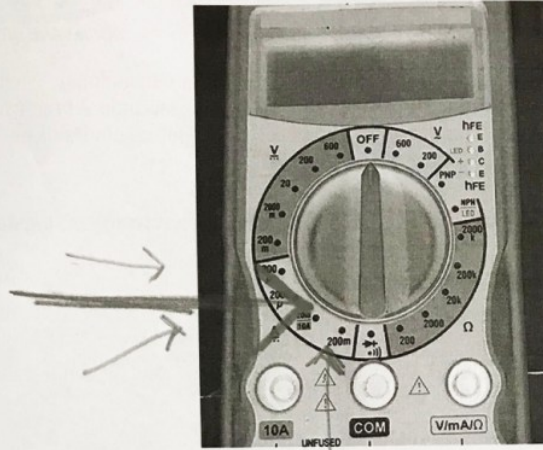
5. Quando se diz que, o ouro é um metal extremamente dúctil, o significa isso?

*significa que é muito duro.*

Fonte: O próprio autor

Figura 65 – Respostas da página 2 do aluno4

6. Marque o local da escala usada para medir corrente elétrica no multímetro da figura abaixo.



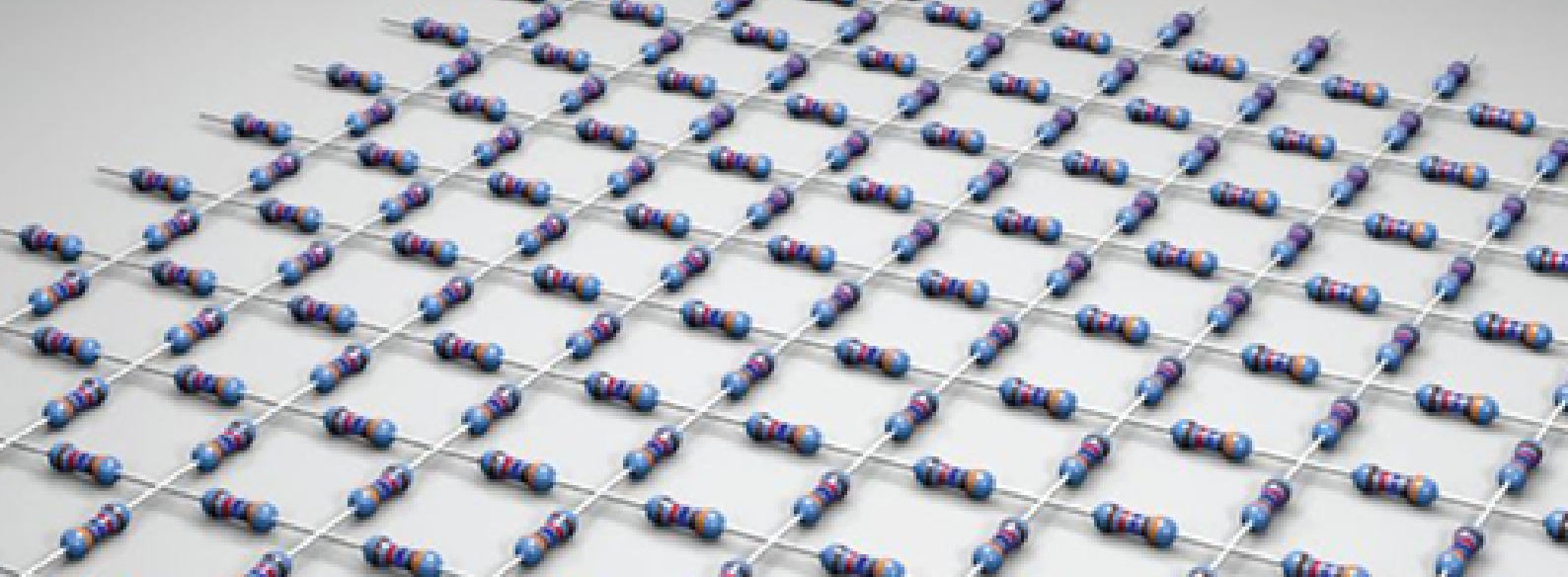
7. Qual a vantagem e fazer gráficos no computador?

*Fica bem mais fácil*

8. Depois todas as aulas sobre o tema, que você aprendeu?

*Medir circuitos e corrente.*

## **ANEXO C – PRODUTO EDUCACIONAL**



Produto Educacional

# Modelo Pedagógico de Resistores Elétricos para Descrever Fraturas em Sistemas Físicos

Airton Modesto da Cunha  
Julio Santiago Espinoza Ortiz



**UFG**

**MNPEF** Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Catalão

2018

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil

Produto educacional sobre, MODELO PEDAGÓGICO DE RESISTORES ELÉTRICOS PARA DESCREVER FRATURAS EM SISTEMAS FÍSICOS. Airton Modesto da Cunha. - CATALÃO - GO Bibliografia. ISBN XXXX-XXXX-XX.

Copyright © 2018 CUNHA, Airton Modesto.

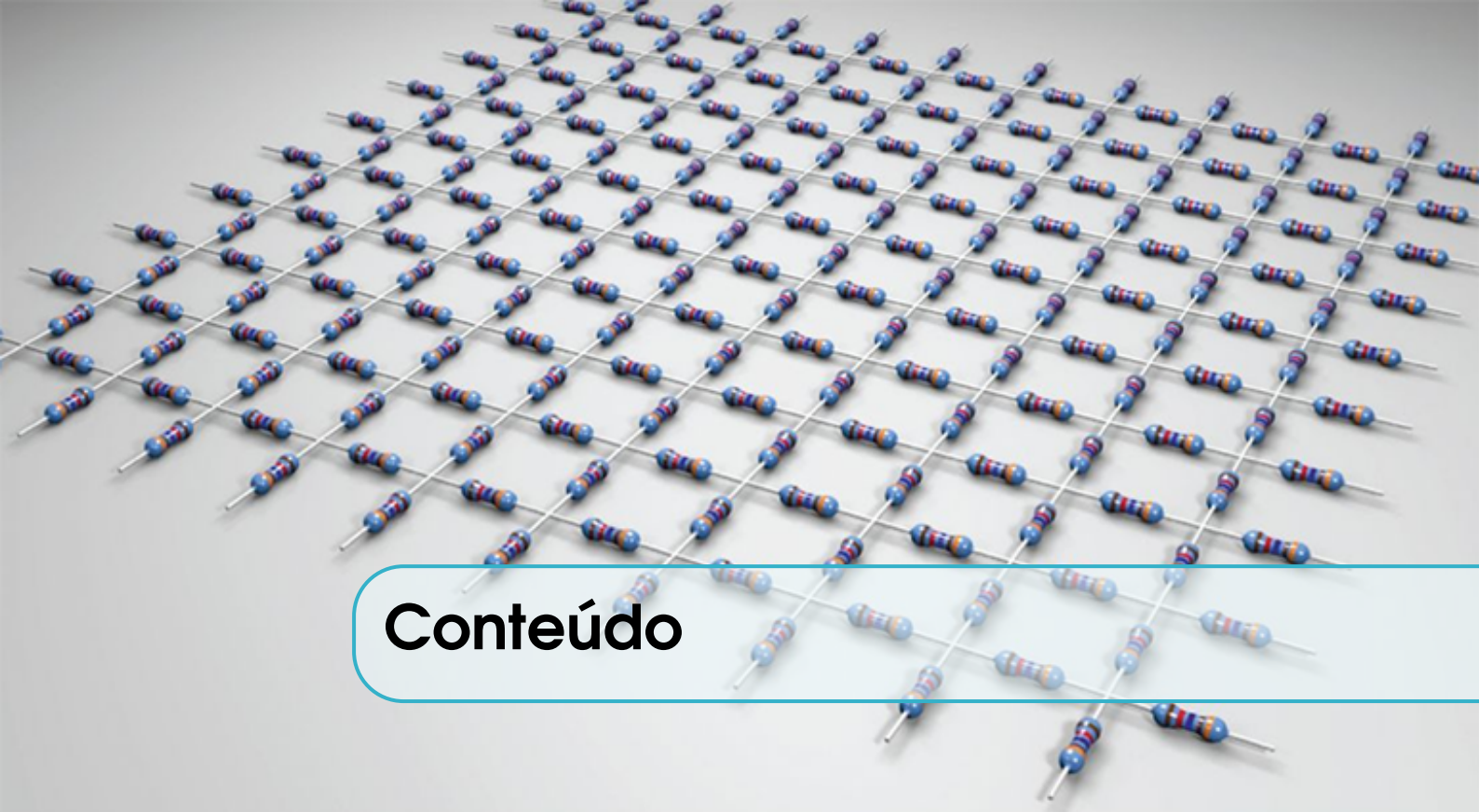
ORIENTADOR: PROFESSOR DR. JULIO SANTIAGO ESPINAZA ORTIZ

MNPEF/SBF - UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - CATALÃO

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

Produto Educacional em Ensino de Física - SBF

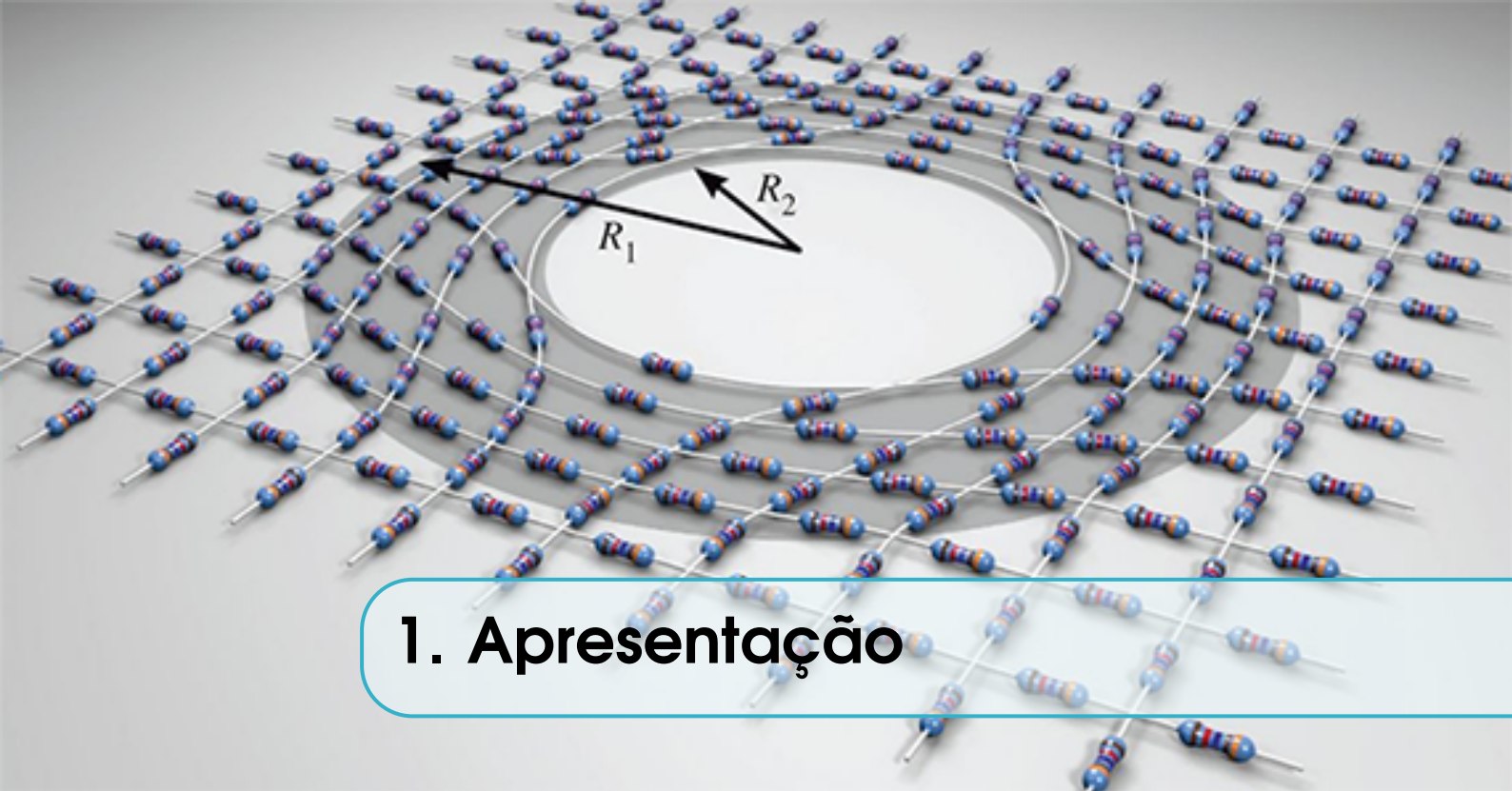
*Primeira edição, Agosto de 2018*



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Apresentação</b> .....	<b>5</b>
1.1	Apresentação	5
<b>2</b>	<b>Sobre o Produto</b> .....	<b>7</b>
2.1	Aprendizagem	7
<b>2.2</b>	<b>Materiais e Equipamentos usados no produto</b>	<b>9</b>
2.2.1	Resistores .....	9
2.2.2	Protoboard .....	9
2.2.3	Fonte Ajustável .....	9
2.2.4	Multímetro .....	9
2.2.5	Placa com resistores em rede .....	10
2.2.6	Alicate de corte .....	10
<b>3</b>	<b>Sequência Didática</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Sequência Didática</b>	<b>13</b>
3.1.1	Detalhamento das Aulas .....	13
3.1.2	Aula 1 - Sondando conhecimentos prévios .....	13
3.1.3	Aula 2 - Experimento sobre resistência equivalente .....	15
3.1.4	Aula 3 - Experimento sobre resistência equivalente em rede quadrada ...	20
3.1.5	Aula 4 - Conceitos Iniciais sobre fraturas .....	24
3.1.6	Aula 5 - Tipos de defeitos em sólidos .....	27
3.1.7	Aula 6 - Execução Experimental .....	35
3.1.8	Procedimentos de ajuste de dados e gráficos .....	36
3.1.9	Plotando gráficos no <i>Gnuplot</i> ou <i>Scidavis</i> .....	41

3.1.10	Instalação e Compilação para Fortran .....	47
3.1.11	Aula 7 - Avaliação de Aprendizagem .....	50
<b>4</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>56</b>



# 1. Apresentação

## 1.1 Apresentação

Caros professores,

O presente trabalho, na forma de sequência didática, foi desenvolvido para o 3º ano do ensino médio na escola estadual Dr. Marcolino de Barros, no município de Patos de Minas - MG, conjuntamente com a dissertação de mestrado intitulada “Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever fraturas em sistemas físicos”, pelo Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), da Sociedade Brasileira de Física (SBF), do Polo da Universidade Federal de Goiás (UFG) - Regional Catalão, sob orientação do professor Dr. Julio Santiago Espinoza Ortiz. Este material é destinado aos colegas que lecionam no ensino médio ou superior, e que, pretendem despertar a curiosidade e ou interesse científico em física formal dos estudantes, usando para isto circuitos mistos de resistores, para em seguida com ajuda deste simples modelo passar a estabelecer semelhanças com as fraturas ou desagregações em sólidos a medida que os elementos do circuito são desconectados ou danificados. Ressalta-se que esta fenomenologia de propagação de dano em materiais apresenta-se de maneira bem similar em diversas áreas interdisciplinares, tais como: resistência dos materiais, fenômenos de ruptura em sistemas desordenados, desagregação dielétrica, transições condutor-isolante e rupturas em estruturas ósseas.

Na referência [1] enfatiza-se que, sendo a física uma ciência que pesquisa na tentativa de entender a natureza da matéria e a energia, desempenha um papel fundamental no progresso e desenvolvimento da humanidade. Ou seja, tem uma perspectiva importante no cenário atual, pois como uma ciência, torna-se uma jornada de aventura emocionante que ainda inspira aos jovens a expandirem as fronteiras de nosso conhecimento a respeito da natureza. E desta maneira, também fornece as bases necessárias para os futuros avanços tecnológicos. Note-se que a física está presente em diferentes áreas do conhecimento e por isso apresenta boas razões para ser uma parte integrante e essencial de qualquer sistema educacional no mundo. Mundo este que está frequentemente passando por gigantescas transformações e avanços, sejam sociais ou tecnológicos. Por estas razões faz-se necessário ampliar e divulgar o ensino e a experimentação dos conceitos da física em nossas instituições de ensino superior e principalmente no ensino nível médio. Pois desafortunadamente, um grande número de escolas que oferecem educação de nível médio ainda carece de laboratórios apropriados para o ensino desta ciência. Pensando nisso,

fomos movidos a contribuir com este conteúdo, na expectativa de apresentar um modelo simples modelo físico que mimica um fenômeno físico como as fraturas, muito presente no cotidiano. Como por exemplo nas telas de nossos celulares que quando são resistentes aos riscos mostram-se frágeis, e quando inquebráveis mostram-se facilmente arranhadas. Este tipo de problema, ainda um problema em aberto, é a raiz principal deste material. A nossa proposta consiste em explorar as aulas de física para instruir aos alunos sobre conceitos usualmente lecionados apenas no ensino superior, especificamente nos cursos de engenharias: Civil, Química e Mecânica. Conceitos estes que ao longo do período escolar, raramente ou quase nunca, são vistos. Portanto, resumindo, a ideia consiste em apresentar um simples modelo físico teórico e experimental, constituído por uma rede quadrada de resistores, em que, seus elementos constituintes são interrompidos um a um de maneira aleatória causando a diminuição da corrente que atravessa o sistema. Durante a realização dos experimentos são registradas ambas a fração de elementos removidos e sua corrente elétrica total, que decai conforme avançamos a ruptura dos elementos.

Esperamos que com estas práticas propostas, uma vez aplicadas, os educandos estejam mais familiarizados com atuais equipamentos comumente empregados em laboratórios de eletrônica, compreendam os padrões físicos que governam as fraturas e saibam relacioná-los aos outros tipos de rompimentos em sistemas físicos e não apenas usem a memorização mecânica de fórmulas, mas racionalizem o conhecimento.

Note-se que de maneira geral, segundo [2]-[3], os processos de ruptura são irreversíveis e são caracterizados por transições de fase de primeira ordem. De acordo com [4], neste modelo estabelece-se naturalmente que nas redes (planas) de condutores a corrente elétrica em cada elemento assume-se proporcional a sua respectiva condutância. Em que, a ruptura de um elemento condutor ocorre quando a corrente elétrica alcança um determinado valor crítico. Em particular, na situação mais simples nos quais todos os condutores são considerados iguais, e sobre estas premissas, vamos a estudar como uma corrente externa introduzida em um certo nó e removida em outro adjacente é redistribuída na rede de resistores. Sendo importante determinar quantitativamente como a corrente sobre uma rede de condutores fundidos é reduzida devido ao tamanho da desagregação do sistema. Então, verificaremos experimentalmente os efeitos das remoções aleatórias dos elementos de uma rede bidimensional, que em nosso caso é apresentada como sendo um circuito de resistores elétricos associados em forma de rede quadrada, conforme detalhamos nos próximos capítulos.



## 2. Sobre o Produto

### 2.1 Aprendizagem

Como professores, responsáveis pela educação dos cidadãos, devemos exercer o papel de “tradutores” dos conhecimentos e das ideias, que devido a motivos diferentes as vezes estão restritos à população ou à comunidade local. Ou seja, somos a ponte entre a abstração científica e o aluno, como propõe [5]. Por outro lado, o comum desinteresse pela física quase unânime por parte do aluno, nos obriga a pensar maneiras alternativas de criar e reinventar métodos de ensino com a finalidade de mudar este paradigma. Paralelamente, outra análise, como argumenta [6], atualmente torna-se necessário e urgente a introdução de práticas experimentais no currículo de todas as escolas de ensino fundamental e médio. Pois, a ausência destas práticas dificulta nossa interação com as atividades cotidianas. Outro problema segundo o autor, abrange as próprias instituições de ensino que mesmo com espaços e laboratórios disponibilizados raramente são utilizados. E junto a isso, podemos acrescentar os seguintes fatos corriqueiros: ausência de recursos e materiais de reposição, um reduzido tempo para o professor planejar, testar e entender com profundidade os experimentos, o que faz com que os espaços permaneçam fechados e sem a manutenção apropriada. No entanto, completa [6], há um grande equívoco em confundir que as atividades práticas tenham que ocorrer somente em ambientes altamente equipados e assessorados para se ter resultados de sucesso idealizado. Uma vez que também podemos fazê-lo em sala de aula, as vezes prescindindo de modernos aparatos, como no caso do presente produto, que pode ser aplicado sem para isso requerer de muito espaço e muitos recursos, bastando para isso, que o professor disponha dos componentes, de custo acessível no mercado, necessários para sua execução.

Neste contexto, durante todo o processo de desenvolvimento deste modelo pedagógico, fomos norteados pela *Aprendizagem Significativa* proposta pelo pesquisador norte-americano **David Paul Ausubel (1918-2008)** [7], quem apresenta uma teoria cognitiva que valoriza a maneira como aprendemos “intuitivamente” à realidade. No qual propõe-se a aquisição e a retenção de conceitos são resultado de um processo mentalmente ativo, integrador e interativo entre as disciplinas e as ideias relevantes da cognição, que por sua vez, são relacionadas pelo próprio indivíduo de forma pessoal.

Em síntese, apesar de sua importância complementar; Ausubel recomenda menos memorização mecânica e mais ações pragmáticas, isto é, experimentações e ou explorações que façam claro

sentido ao indivíduo. Para que o aluno trabalhe sua autoaprendizagem munido de dominados conhecimentos, os quais já fazem parte de sua percepção, e, ao mesmo tempo, crie conceitos prévios, facilitadores, ou *subsunçores*, para que adquira uma compreensão mais generalizada. Em que, o aluno possa interiorizar o tema de forma autônoma, para que depois lhe seja possível a qualquer momento o retomar, usá-lo e promover uma natural aproximação entre a teoria e sua aplicação. Motivo que nos levou a dar importância primordial à participação dos discentes na experimentação das leis físicas.

Optamos por dividir a presente sequência didática em aulas teóricas e práticas que se inter-relacionam. Nas quais, em momentos iniciais trabalhamos com aulas do tipo expositivas, valorizando o conhecimento básico e o uso inevitável da memorização mecânica que, nas palavras de Ausubel, inicialmente são conteúdos sem nenhuma; ou mínima relação com os conhecimentos prévios e, ao que parece acabam ficando sem ligação na mente do aluno. Mas que vão servir de “âncora” para novas compreensões. Em outros momentos propomos usar a aprendizagem que requer do aprendiz a reorganização das ideias anteriormente fixadas na estrutura cognitiva, criando novos subsunçores ou ligações, possibilitando o acesso a novos conhecimentos. Que, conforme Ausubel, se aumentarmos o número de subsunçores criados, mais consolidado é o conhecimento. Este é o caso das aulas 2 e 3 nas que apresentamos as maneiras possíveis de calcular a resistência equivalente para pequenas malhas de resistores.

A aprendizagem significativa concede importância à vivência pessoal e coloca o professor fundamentalmente como agente, promotor e incentivador da aprendizagem. Para tanto é necessário contarmos com um conteúdo relevante que tenha semelhança com o contexto do aprendiz. Motivo pelo qual o professor deverá apontar e exemplificar constantemente, como em nosso caso, os tipos de fraturas e resistências dos materiais que estão presentes em nosso cotidiano, para estabelecer sua relação com o presente modelo de resistores.

Na sequência, há também espaço para os organizadores prévios, sugeridos por Ausubel, que, são como “ligações cognitivas” que manipulam a estrutura mental do aluno e ocupa uma área já conhecida ou que ainda irá aprender, no qual, o professor poderá fazê-lo através de textos introdutórios, imagens de estruturas, rupturas e esquemas elétricos, durante a execução da sequência didática, com a finalidade de facilitar a ativação dos subsunçores.

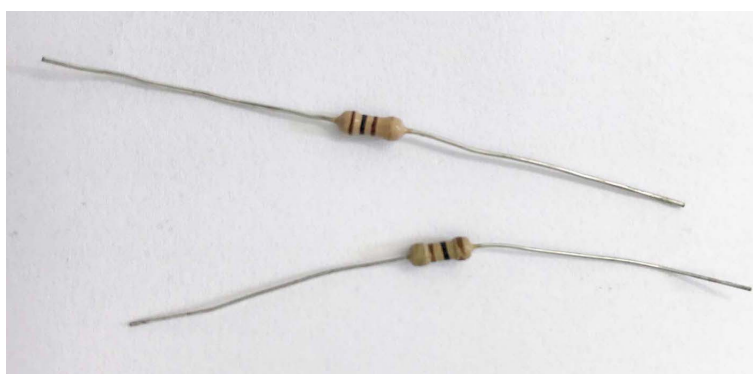
E por fim, é relevante focar nas interpretações deste modelo de rupturas de condutores e de sua semelhança com as fraturas que ocorrem em materiais rígidos, igualmente como, os resultados e análise decorrentes dos experimentos através de gráficos e equações da física para que os docentes possam melhor compreender, dominar e usar em suas áreas de interesse.

## 2.2 Materiais e Equipamentos usados no produto

Seguem algumas sugestões de materiais e equipamentos, que você professor, poderá usar nos experimentos a serem executados em sala. Sugere-se formar grupos (de até cinco alunos) para que assim todos os estudantes participem efetivamente das atividades.

### 2.2.1 Resistores

Os resistores são componentes que limitam a passagem de corrente elétrica ou que provocam aquecimento dos mesmos por efeito Joule. Neste trabalho usamos resistores de filme-carbono ( Figura 2.1) de 100  $\Omega$  por 1/4 W e com 5% de tolerância em seu valor.



**Figura 2.1** Resistor de 100  $\Omega$  por 1/4 W - Fonte: o próprio autor

### 2.2.2 Protoboard

Placa que permite a montagem de vários circuitos para diversas aplicações, assim como para o teste dos mesmos. Esta será usada para facilitar a conexão e remoção dos componentes do circuito. Observando a Figura 2.2, o protoboard possui números na ordem horizontal e nas colunas perpendiculares a elas, possibilitando unir os componentes elétricos que serão utilizados.



**Figura 2.2** Placa para montagens provisórias - Fonte: o próprio autor

### 2.2.3 Fonte Ajustável

A Figura 2.3 mostra uma fonte de tensão que pode ser ligada à rede elétrica de 127 V ou 220 V, fornecendo ao circuito uma tensão contínua de 10 V. Sua utilização evita os problemas com quedas na tensão, os que podem vir a ocorrer com o uso de pilhas ou baterias.



**Figura 2.3** Fonte Ajustável - Fonte: o próprio autor

## 2.2.4 Multímetro

A Figura 2.4 apresenta um multímetro comercial que utilizaremos no modo ohmímetro: na faixa de  $200\ \Omega$ , com precisão de  $\pm 1,0\%$  e resolução de  $0,1\ \Omega$ , para medir resistências. O mesmo que também será utilizado no modo amperímetro: na faixa de  $200\ \text{mA}$  com precisão de  $\pm 1,0\%$  e  $0,1\ \text{mA}$ , para medirmos a corrente elétrica que passa através do circuito durante a execução do experimento.



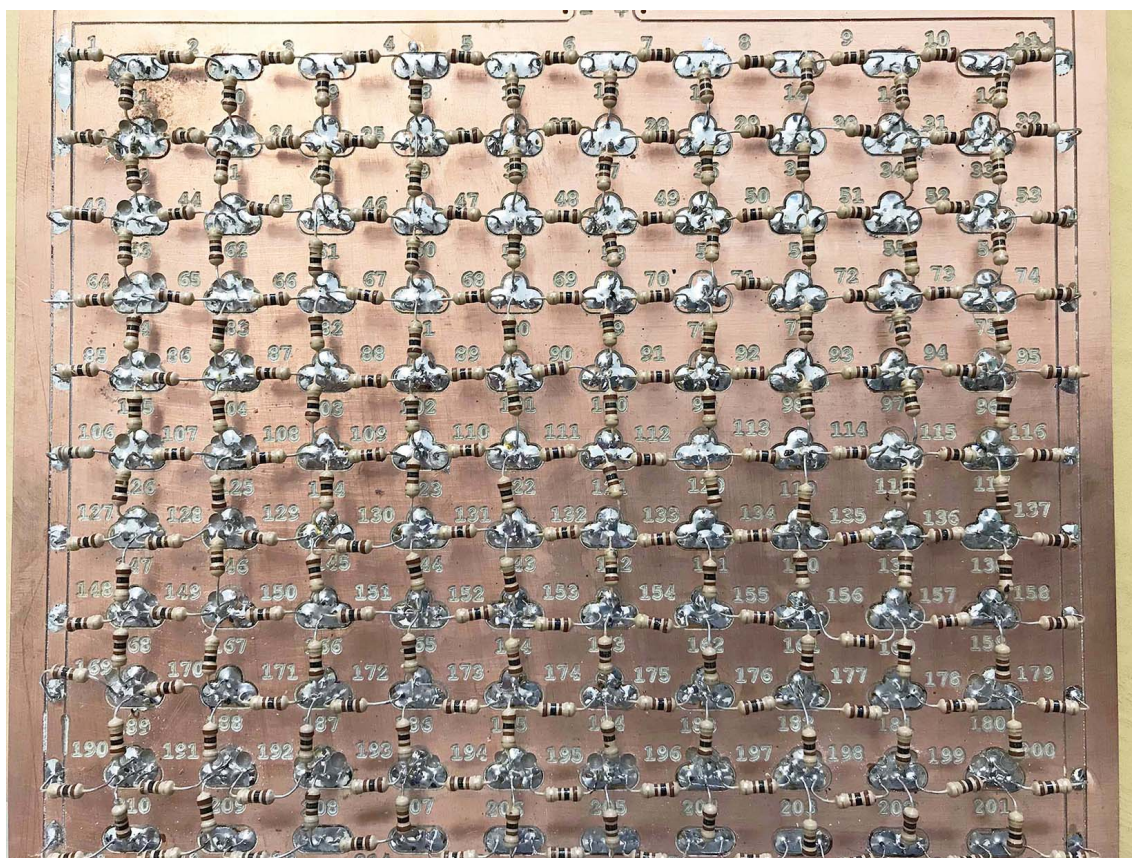
**Figura 2.4** Multímetro comercial  
Fonte: Próprio autor desde

## 2.2.5 Placa com resistores em rede

Esta é a parte principal de nosso estudo, a placa foi desenvolvida pelo autor para ser usada de maneira similar a um *proto-board*. Nas quais, foram projetadas e posteriormente confeccionadas treze placas em uma CNC.<sup>1</sup> Uma placa composta por 221 resistores de  $100\ \Omega$  e  $1/4\ \text{W}$ , apropriadamente numerados e arranjados na forma de rede quadrada simétrica, com corpo e solda no mesmo lado da impressão numérica, isso para facilitar a remoção aleatória e individual dos elementos, conforme é mostrada na Figura 2.5. Caso tenham interesse, professor ou aluno, em

<sup>1</sup>CNC ou Controle numérico computadorizado, é um tipo de fresa projetada a fim de usinar placas para circuitos elétricos.

reproduzir esta placa, os arquivos se encontram disponíveis no seguinte endereço eletrônico:  
<https://airtonmodesto.wixsite.com/airtonphysics/about>



**Figura 2.5** Placa com resistores em rede - Fonte: o próprio autor

### 2.2.6 Alicates de corte

A Figura 2.6 mostra um alicate comercial de corte utilizado para interromper a corrente elétrica através dos resistores, isto é cortando os terminais de um determinado elemento resistivo aleatoriamente escolhido na placa.



**Figura 2.6** Alicates de corte - Fonte: o próprio autor



## 3. Sequência Didática

### 3.1 Sequência Didática

#### 3.1.1 Detalhamento das Aulas

Aulas	Assunto
1 <sup>a</sup>	Sondando conhecimentos prévios
2 <sup>a</sup>	Experimento sobre resistência equivalente
3 <sup>a</sup>	Experimento sobre resistência equivalente em rede quadrada
4 <sup>a</sup>	Conceitos Iniciais sobre fraturas
5 <sup>a</sup>	Tipos de defeitos em sólidos
6 <sup>a</sup>	Execução Experimental
7 <sup>a</sup>	Avaliação de Aprendizagem

#### 3.1.2 Aula 1 - Sondando conhecimentos prévios

**Temo estimado:** 50min

**Objetivos:** É importante deixar claro para os alunos que eles não têm a obrigatoriedade de responder corretamente todas as questões, e que, não estamos avaliando-os e nem o professor. As perguntas são úteis para saber a respeito dos conhecimentos prévios que os alunos têm sobre o tema, a fim de procurar formas adequadas de ensiná-los sobre novos conceitos, e ao final, possibilitar um diagnóstico sobre a aprendizagem.

**Recursos:** Questionário impresso.

**Exemplo de questionário**

- 1) Qual é a utilidade de um resistor elétrico em um determinado circuito?
- 2) - Desenhe dois circuitos, o primeiro conformado por 3 resistores arranjados em série e o segundo com a mesma quantidade de componentes, porém, em paralelo. Depois escreva as equações pertinentes com a finalidade de calcular a resistência equivalente para cada um dos circuitos desenhados.
- 3) Você já teve a curiosidade de saber como se calcula a resistência equivalente de um circuito muito grande e de ligações muito complexas? Caso afirmativo, como era esse circuito?
- 4) Você conhece a ligação de resistores conhecida como Ponte de Wheatstone? Caso negativo, vá para questão 6.
- 5) Como se calcula a resistência equivalente de um arranjo de resistores numa ponte de Wheatstone?
- 6) Comente sobre o que você sabe sobre as duas leis de Kirchhoff.
- 7) Você já arquitetou algum tipo de modelo para demonstrar ou entender algum fenômeno físico? Se afirmativo, qual foi esse modelo?
- 8) Você sabe ou gostaria de saber como e porque os objetos quebram? Caso afirmativo, explique o que você sabe.
- 9) Você conhece algum tipo de material extremamente resistente, que possamos usar no lugar de uma corda?
- 10) Marque umas das opções abaixo para justificar como julgaria a utilidade de ser avisado de alguma maneira a respeito de certo objeto estar prestes a quebrar?  
a) Muito útil                      b) Pouco interessante                      c) Sem importância.
- 11) Qual é a diferença entre um material dúctil e um material frágil?
- 12) Alguma vez você manuseou ou sabe como usar um amperímetro?
- 13) Alguma vez você usou ou sabe como usar uma fonte de tensão ajustável?
- 14) Sabe fazer gráficos a partir de tabelas de dados de forma manual ou através de aplicativos disponíveis num computador?

### 3.1.3 Aula 2 - Experimento sobre resistência equivalente

**Tempo total - 50 min**

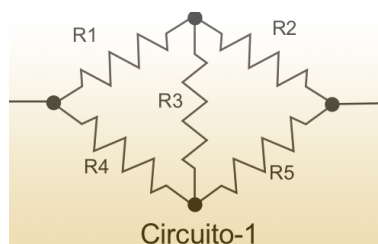
**Tipo:** Aula experimental

**Objetivos:** Mostrar a importância de prever o valor esperado da corrente elétrica total que deve passar através do circuito antes mesmo de ligá-lo, para garantir seu correto funcionamento. Verificar através de cálculos e medidas experimentais que a resistência equivalente em uma ponte de Wheatstone pode ser determinada de três diferentes maneiras.

**Recursos:** Resistores, multímetros, placa protoboard, lousa ou data show.

**Desenvolvimento:** Sugerimos abordar este tópico da seguinte forma:

- Distribuir os materiais e equipamentos necessários aos respectivos grupos. Peça que liguem o circuito-1, formando uma Ponte de Wheatstone, usando 5 resistores, conforme Figura 3.1.



**Figura 3.1** Circuito-1 - Fonte: o próprio autor

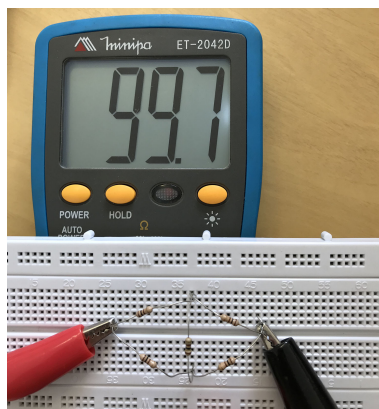
#### Como medir?

Coloque o multímetro na escala 200, no qual, apresenta o símbolo  $\Omega$ , conecte o resistor às pontos de prova e meça o valor respectivo conforme mostrado na Figura 3.2.



**Figura 3.2** Medida de um resistor  
Fonte: o próprio autor

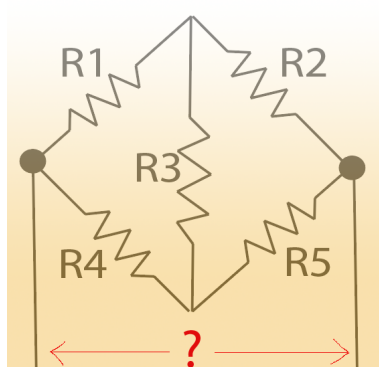
Agora conecte os resistores de maneira apropriada e ligue o circuito conforme mostrado na Figura 3.3, e anote o valor medido pelo ohmímetro.



**Figura 3.3** Rede com 5 resistores  
Fonte: o próprio autor

### Sugestão de cálculo

Comente com os alunos que este tipo de circuito geralmente não pode ser transformado em alguma outra configuração mais simples, a menos que todos os resistores sejam de igual valor resistivo, e só então, podemos procurar por uma linha imaginária que divida o circuito em partes de mesmo potencial. Exemplo:



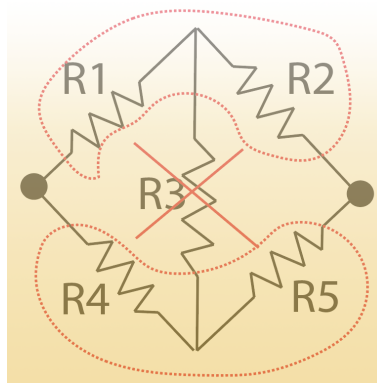
**Figura 3.4** Exemplo de resistência total desconhecida - Fonte: o próprio autor

Para demonstrar o cálculo da resistência equivalente da Figura 3.4, podemos dentre muitos artifícios, usar o seguinte:

#### I) Se os resistores são diferentes temos duas possibilidades:

a) Se a relação entre os produtos for  $R1 \times R5 = R2 \times R4$ , a Ponte de Wheatstone estará em “equilíbrio”, conforme Figura 3.5, então podemos eliminar o resistor  $R3$  e calcular a resistência como

$$\frac{1}{R_{eq.}} = \frac{1}{(R1 + R2)} + \frac{1}{(R4 + R5)}, \quad (3.1)$$



**Figura 3.5** Eliminando o resistor R3 - Fonte: o próprio autor

ou

$$R_{eq.} = \frac{(R1 + R2) \times (R4 + R5)}{(R1 + R2 + R4 + R5)} \quad (3.2)$$

Exemplo:

$$R_{eq.} = \frac{(100 + 100) \times (100 + 100)}{100 + 100 + 100 + 100} = \frac{40000}{400} = 100\Omega \quad (3.3)$$

### Cálculo do erro experimental

Podemos calcular o erro experimental entre o valor medido da resistência equivalente, mostrada na Figura 3.3, e a calculada pela Eq. 3.3.

$$Erro_{exp} = \frac{|V_{exp} - V_{cal}|}{V_{exp}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$Erro_{exp} = \frac{|99,7 - 100|}{99,7} \cdot 100 = 0,30\% \quad (3.5)$$

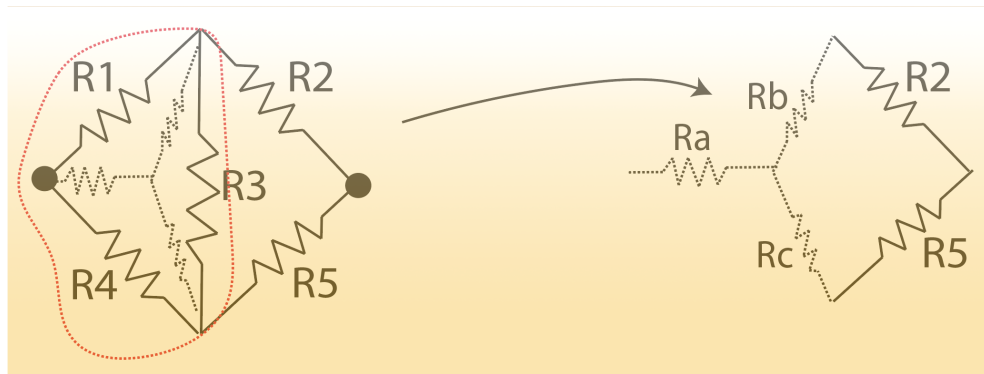
Um erro de 0,30% significa que o valor teórico calculado para o circuito-1 está em excelente acordo com resolução esperada para o multímetro e tolerância dos resistores.

**b)** E se os produtos forem  $R1 \times R5 \neq R2 \times R4$ , então não temos “equilíbrio”, que nos obrigue a recorrer a uma regra de transformação conhecida por Triângulo em estrela, ou  $\Delta \rightarrow Y$ . Então, primeiro transformamos um dos triângulos em “Y” e então calculando os novos valores de  $R_a$ ,  $R_b$  e  $R_c$  (ver Figura 3.6).

### Calculando os valores de $R_a$ , $R_b$ e $R_c$

Para facilitar, vamos adotar um mesmo valor de  $100\Omega$  para todos os elementos resistivos e procedemos da seguinte forma:

$$R_a = \frac{R1 \times R4}{R1 + R4 + R3} = \frac{10000}{300} = \frac{100}{3}, \quad (3.6)$$



**Figura 3.6** Transformação de delta em Y - Fonte: o próprio autor

$$R_b = \frac{R1 \times R3}{R1 + R4 + R3} = \frac{100}{3}, \quad (3.7)$$

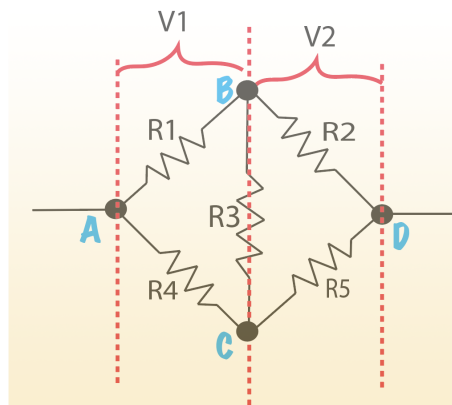
$$R_c = \frac{R3 \times R4}{R1 + R4 + R3} = \frac{100}{3} \quad (3.8)$$

Encontrados estes valores podemos proceder com os cálculos de maneira semelhante à equação 3.2 ou seja

$$R_{eq.} = R_a + \frac{(R_b + R2) \times (R_c + R5)}{(R_b + R2 + R_c + R5)} = \frac{100}{3} + \left[ \frac{(\frac{100}{3} + 100)(\frac{100}{3} + 100)}{\frac{100}{3} + 100 + \frac{100}{3} + 100} \right] = 100\Omega \quad (3.9)$$

## II) Se todos os resistores são iguais:

Conforme Figura 3.7, neste caso, o cálculo torna-se extremamente simples, pois o circuito terá o mesmo potencial nos pontos **B** e **C**, ademais de ser sempre satisfeita a relação  $R1 \times R5 = R2 \times R4$ .



**Figura 3.7** Ponte de Wheatstone - Fonte: o próprio autor

Percorrendo o circuito do ponto **A** até o ponto **B** ou **C**, teremos a mesma diferença de potencial  $V_1 = V_2$ . Outra análise consiste em perceber a simetria intrínseca do circuito, sendo

$$R_{eq.} = R_1 = R_2 = R_3 = R_4, \quad (3.10)$$

ou também

$$R_{eq.} = \frac{(R_1 + R_2) \times (R_4 + R_5)}{(R_1 + R_2 + R_4 + R_5)} = \frac{2R \times 2R}{4R} = R \quad (3.11)$$

Cálculo do circuito-1:

$$R_{eq.} = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 100\Omega \quad (3.12)$$

Finalmente, o professor poderá explicar a razão pela qual o valor medido com o multímetro na Figura 3.3 apresenta um valor semelhante ao individual, e estender o ocorrido para circuitos com maior número de elementos que apresentem a mesma “simetria”, os quais terão sua respectiva resistência equivalente como na equação 3.12, e isso será comprovado na próxima aula.

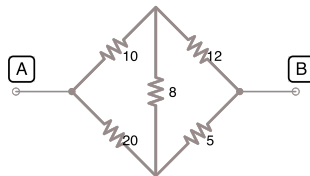
### Avaliação da Aula - 2

A avaliação pode ser feita através de uma lista de exercícios formulada sobre os tópicos abordados. Como no exemplo que se segue.

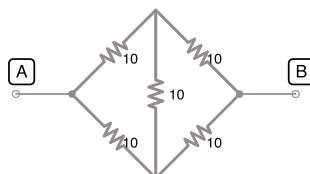
#### Modelo sugerido para a avaliação da Aula-2

#### Questões sobre resistência equivalente em Ponte de Wheatstone

1) Descreva a maneira como você calcularia a resistência equivalente entre os pontos A e B da ilustração abaixo. Adote todos os valores em unidades de Ohms.



2) Calcule a resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito abaixo.



### 3.1.4 Aula 3 - Experimento sobre resistência equivalente em rede quadrada

**Tempo total - 50 min**

**Tipo:** Aula experimental

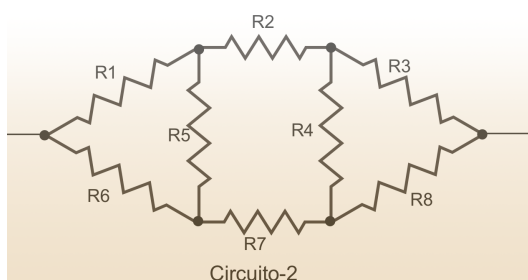
**Objetivos:** Aprender a montar, medir e calcular circuitos conformados por resistores arranados em malha quadrada.

**Recursos:** Resistores, multímetros, placa protoboard, lousa ou data show.

**Desenvolvimento:** Agora os alunos deverão montar os circuitos 2 e 3, em seguida irão medir e calcular as resistências equivalentes e verificar a validade das hipóteses anteriores realizando os seguintes procedimentos:

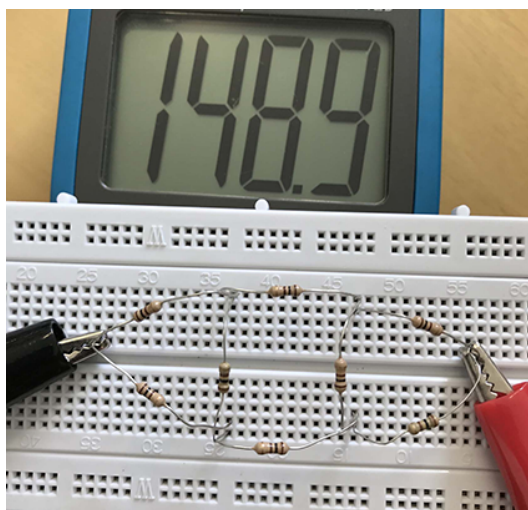
#### Circuito-2

- Desta vez são utilizados 8 resistores, então peça para que os alunos montem o circuito-2 conforme mostrado na Figura 3.8.



**Figura 3.8** Circuito-2 - Fonte: o próprio autor

Para calcular a resistência equivalente podemos proceder da mesma maneira a aquela apresentada na Aula-1 e na análise da Figura 3.7, isto é, dividimos o sistema em subsistemas com igual potencial, que resultará em um circuito equivalente a dois resistores de igual valor, em paralelo.



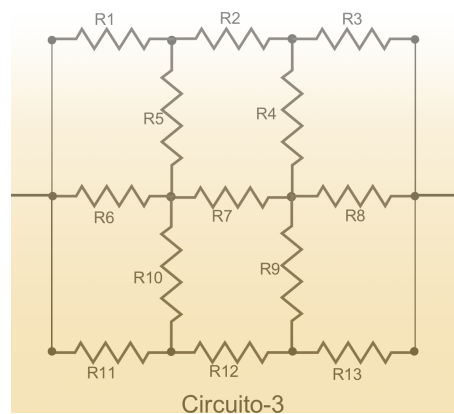
**Figura 3.9** Medindo a malha com 8 resistores  
Fonte: o próprio autor

$$R_{eq.} = \frac{100 + 100 + 100}{2} = 150\Omega. \quad (3.13)$$

Assim sendo, podemos calcular o erro experimental através da equação 3.4, verificando que os dados apresentados na Figura 3.9 e na equação 3.13 estão de acordo com o que se espera, considerando os dados do resistor e a precisão e resolução do aparelho.

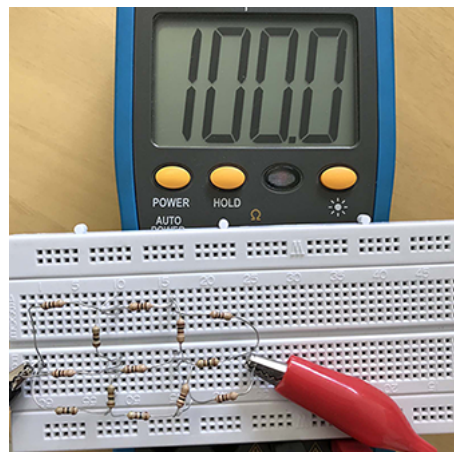
### Circuito-3

- Agora, consideramos um circuito com 13 resistores em uma matriz quadrada (veja Figura 3.10), apresentando simetria em ambas direções, i.e., na vertical e na horizontal. No qual mostra a importância desta característica simétrica de distribuição dos elementos resistivos na rede. Em que, temos então linhas de mesmo potencial. Demonstre os cálculos de todas as resistências equivalentes e a razão de nossa escolha por treli arrançadas como uma matriz quadrada.



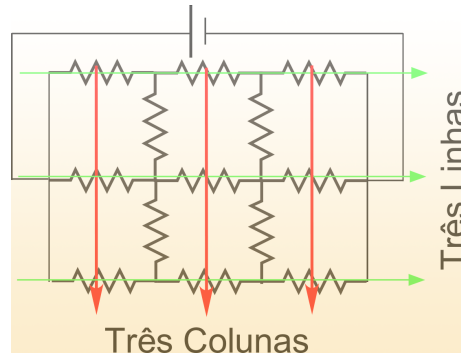
**Figura 3.10** Circuito-3 - Fonte: o próprio autor

Em seguida peça para que os alunos montem o circuito-3 no protoboard e meçam o valor da resistência do circuito, conforme mostrado na Figura 3.11.



**Figura 3.11** Medida da resistência elétrica do circuito-3 - Fonte: o próprio autor

Como podemos verificar na Figura 3.11, o cálculo da resistência total equivalente das malhas nesse arranjo torna-se desnecessário, sendo seu valor facilmente identificado quando verificamos que o número de linhas é igual ao de colunas; conforme mostrado na Figura 3.12.



**Figura 3.12** Identificando linha e colunas  
Fonte: o próprio autor

Tendo o valor da tensão total através do circuito e a resistência equivalente, o valor esperado da corrente que devemos medir no amperímetro é a razão entre a diferença de potencial aplicada e a resistência total - Equação 3.14.

$$i = \frac{V}{R_{eq.}} \quad (3.14)$$

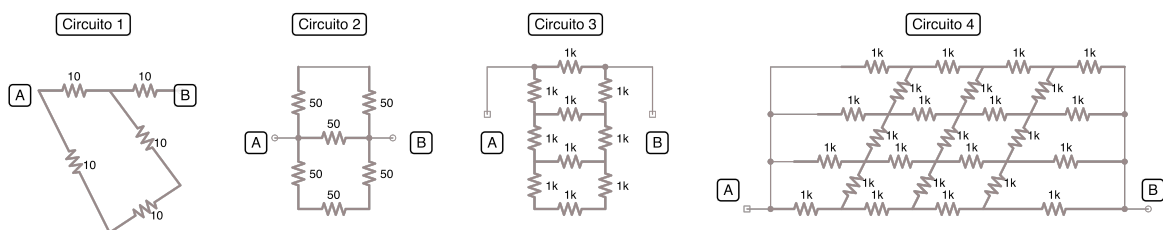
### Avaliação da Aula - 3

A avaliação pode ser aplicada através de questões sobre o tema anteriormente trabalhado, para que sejam discutidas em grupo.

#### Modelo sugerido para a avaliação da Aula-3

#### Cálculos de resistências equivalente em treliças

1) Identifique nas figuras abaixo, qual delas possui características de uma rede quadrada e calcule seu valor.



2) No esquema abaixo representamos as escalas usadas nos multímetros. Qual destas é usada para medir resistência elétrica?

a) mA

b) V

c)  $\Omega$

d)  $\omega$

### 3.1.5 Aula 4 - Conceitos Iniciais sobre fraturas

**Tempo total:** 50 min

**Tipo:** Aula expositiva, apresentada aos alunos distribuídos em grupos.

**Objetivos:** Conhecer os tipos de: tensões, defeitos nas redes sólidas e fraturas. Identificar experimentalmente materiais frágeis e dúcteis.

**Recursos:** Fios de estanho, barras cilíndricas de chocolate, lousa ou Data Show.

**Desenvolvimento:** Inicie a aula questionando o que mantém as coisas unidas e o que faz com que elas se quebrem. Explane sobre o experimento de Leonardo Da Vinci e as explicações de Galileu abordados na referência [2], quanto ao tamanho dos objetos e sua resistência às trações e flexões. No decorrer das aulas, sempre atente por reforçar os conceitos que foram fracamente verificados pela sondagem. Explique, com ajuda das imagens apresentadas aqui, os tipos de tensões e sua relação com as fraturas.

#### Primeiro momento

**Tempo total:** 30 min

#### Tipos de tensões

Exemplifica-se na referência [8] que existem 5 tipos mais gerais de tensões. Que são:

##### 1 - Tensão por tração

Esta ocorre quando as forças atuantes no objeto tendem a diminuir a área de sua secção reta.



Figura 3.13 Forças provocando tração - Fonte: o próprio autor

##### 2 - Tensão por compressão

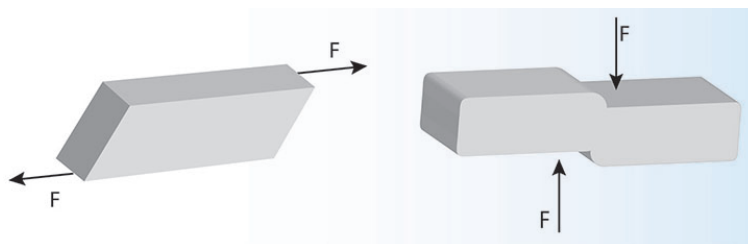
Esta faz o oposto do que ocorre na tração, ou seja, tornando maior a superfície da secção reta.



Figura 3.14 Exemplo de tensão por compressão - Fonte: o próprio autor

##### 3 - Tensão de cisalhamento

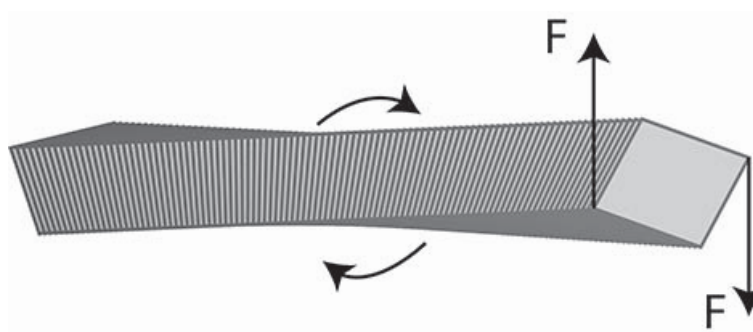
Ocorre quando as forças são aplicadas em sentidos opostos e na mesma direção, porém em diferentes pontos do plano. Figura 3.15.



**Figura 3.15** Tensão de cisalhamento - Fonte: o próprio autor

#### 4 - Tensão por torção

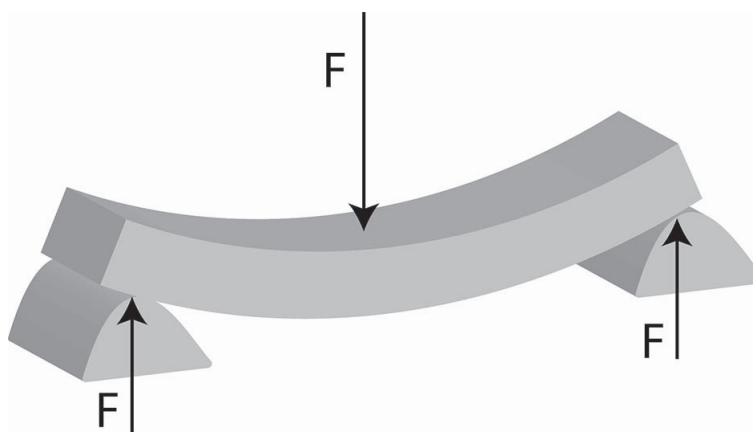
Esta é resultado da aplicação de um torque em torno de determinado ponto.



**Figura 3.16** Forças provocando torção - Fonte: o próprio autor

#### 5 - Tensão por Flexão

Causada por forças que tendem a flexionar o objeto.



**Figura 3.17** Tensão por flexão - Fonte: Autoria própria

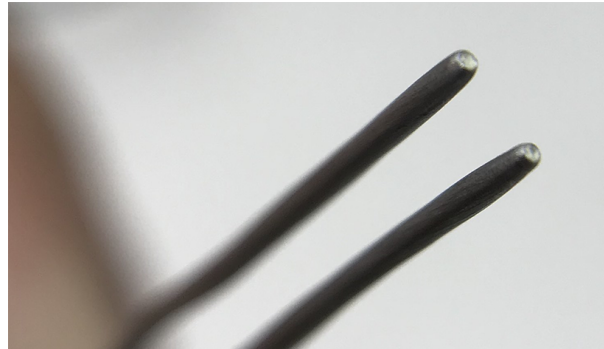
### Segundo momento

**Tempo estimado:** 20min

Para uma apresentação detalhadas das fraturas dúcteis e frágeis sugerimos fazer o seguinte:

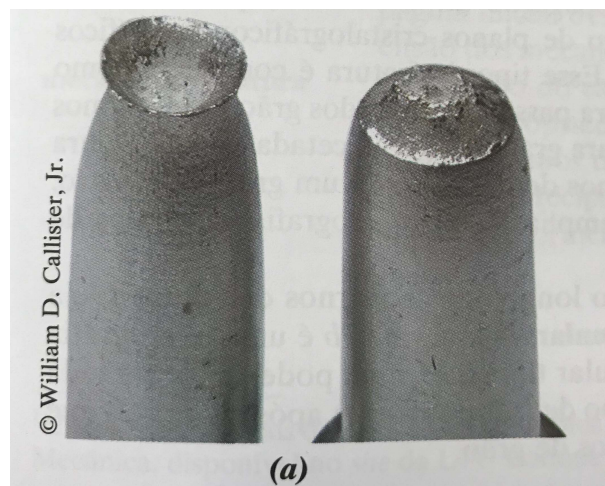
### Fratura Dúctil

Distribua umas barras de chocolate e uns fios de estanho. Em seguida peça para que os grupos tracionem o fio de estanho até seu rompimento e observem as características aos dois lados da fratura. Um exemplo parecido é apresentado na Figura 3.18, e compare-a com a imagem 3.19.



**Figura 3.18** Fratura Dúctil em fio de estanho Fonte: O próprio autor

### Imagem para comparação



**Figura 3.19** Fratura Dúctil em um cilindro de cobre -  
Fonte: Callister [9]

### Fratura Frágil

Mantenha as barras de chocolate a temperaturas abaixo de 28° C, se for necessário deixe-as em uma geladeira até o momento do experimento. Peça aos alunos que tracionem as barras até se partirem, e observem as superfícies transversais apresentadas na Figura 3.20. Então, peça-lhes para que estas sejam comparadas com as fraturas da barra de ferro fundido apresentada na Figura 3.21.



**Figura 3.20** Fratura frágil em um chocolate Fonte: o próprio autor

### **Imagem para comparação**



**Figura 3.21** Fratura frágil em tarugo de ferro fundido -  
Fonte: Callister [9]

## **Avaliação da Aula - 4**

Elabore questões sobre os diferentes tipos de tensões e fraturas utilizando o conjunto de imagens previamente apresentadas.

### **Modelo sugerido para a avaliação da Aula-4**

#### **Questões sobre tensões e fraturas**

- 1) Qual a diferença entre Tensão e força?
- 2) O que é ductilidade?
- 3) O que é uma fratura frágil?
- 4) Quais as diferenças entre torção e Flexão?

### 3.1.6 Aula 5 - Tipos de defeitos em sólidos

**Tempo estimado:** 50 min

**Tipo:** Aula expositiva.

**Objetivos:** Conhecer e identificar os diferentes tipos de defeitos que originam a ocorrência de microfissuras e rupturas em sólidos.

**Recursos:** Lousa e Data Show.

**Desenvolvimento:** Neste momento é necessário apresentar e explicar a estrutura interna dos sólidos e os processos que caracterizam a ocorrência das fraturas neles. Sendo isso de extrema importância, pois esses conceitos não constam no currículo de física do ensino médio, principalmente o processo de percolação que antecipará nosso experimento e inspirou todo esse trabalho, no qual vamos mostrar como realizar as medidas experimentais e como devem ser analisadas.

#### Resumo necessário para um bom desenvolvimento da aula

##### Defeitos e desordem em estruturas cristalinas

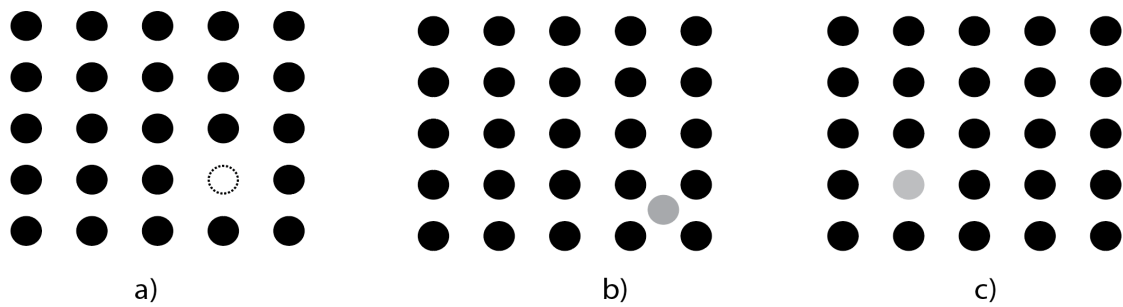
Os defeitos em sólidos cristalinos, segundo [2], são as principais causas da formação e propagação de fraturas quando sujeitos a tensões. Tanto em engenharia como na ciência dos materiais, um sólido é amplamente classificado em três tipos: frágil, quase quebradiço e dúctil. Uma vez que os efeitos da tensão-deformação caracterizam as fraturas em cada tipo de material. Os fatores por trás desses comportamentos tem sua origem na cinética molecular ou atômica do material. Um sólido perfeito pode ser visualizado por uma matriz ordenada de átomos ou moléculas quase pontuais arranjados em uma rede. Os materiais que apresentam essa formação naturalmente simétrica são denominados “sólidos perfeitos”. Em que os defeitos, geralmente, decorrem quando há um desvio na estrutura da rede. Se o desvio ocorre nas proximidades de alguns átomos ou moléculas, ele é denominado um defeito de ponto (Figura 3.22 3.22). No entanto, se o defeito se estender por regiões macroscópicas do cristal, aparecem as imperfeições de rede. Estas falhas podem ser conformadas por linhas. As luxações (deslocamento em relação ao eixo de articulação de borda e de parafuso) são defeitos de linha comuns e são descontinuidades regulares na estrutura do cristal, constituindo um defeito muito presente nos cristais e sendo responsável pelas deformações plásticas nos materiais. Os defeitos planares surgem do agrupamento de defeitos de linha em um plano, causando descontinuidades na estrutura. As microfissuras são outro exemplo de defeitos planares que desempenham um papel crucial na nucleação (aglomeração) e propagação de fraturas em materiais fragilizados.

##### Defeito de ponto

Um defeito de ponto, de acordo com [2], é uma mudança na posição de um único átomo na matriz sólida, desconfigurando sua natural simetria. Os três principais tipos de defeitos de pontos são: vacâncias, intersticiais e impurezas (ver Figura 3.22). Esses defeitos são causados durante o crescimento do cristal ou sob ganho de calor gerado por radiação ou corrente elétrica. Define-se uma “vaga” como a ausência de um átomo na rede.

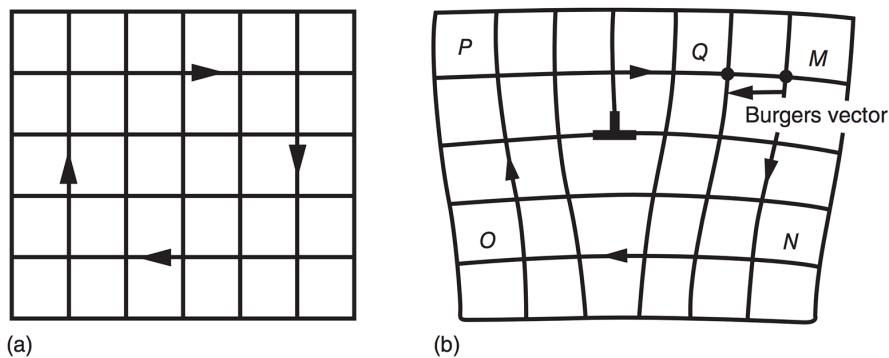
##### Defeito de linha

Como discutido em [2], o defeito de linha é uma descontinuidade presente na estrutura de um cristal regular, que é responsável pelos fenômenos de deslizamento, nos quais a maioria dos



**Figura 3.22** a) vacância b) Intersticial c) Impureza - Fonte: o próprio autor

metais se deformam plasticamente. As dissociações podem surgir devido à falhas no crescimento do mesmo; mas eles também são produzidos por deslocamentos que, sob tensão, eliminam a simetria cristalina de forma sucessiva ao longo da rede. A magnitude do deslocamento é denominada **Vetor de Burger** (ver Figuras 3.23 e 3.24), e define o defeito de borda, que sempre é perpendicular à linha de deslocamento (ver Figura 3.24). O deslocamento é um defeito topológico, na qual, a tensão que causa o defeito é medida em um contorno fechado entorno do defeito da rede. Por exemplo, na Figura 3.23a, um contorno fechado é mostrado em uma rede perfeita a partir de um ponto de rede atravessando quatro passos de rede ao longo da direção horizontal e três passos de rede dentro da direção vertical. Note-se que em uma rede perfeita, devido à simetria intrínseca da rede, o contorno volta ao ponto de partida tornando-se um contorno fechado. Entretanto, se envolvendo um defeito, quando este atravessa a borda, como ocorre no caso mostrado na Figura 3.23b, o contorno termina em **Q** e fica aquém do ponto de partida **M**. A distância entre **M** e **Q** nos dá magnitude do vetor de Burger. Da mesma forma, a direção de **M** para **Q** determina a direção do mencionado vetor.



**Figura 3.23** a) estrutura perfeita b) defeito de linha - Fonte: K. Chakrabarti [2]

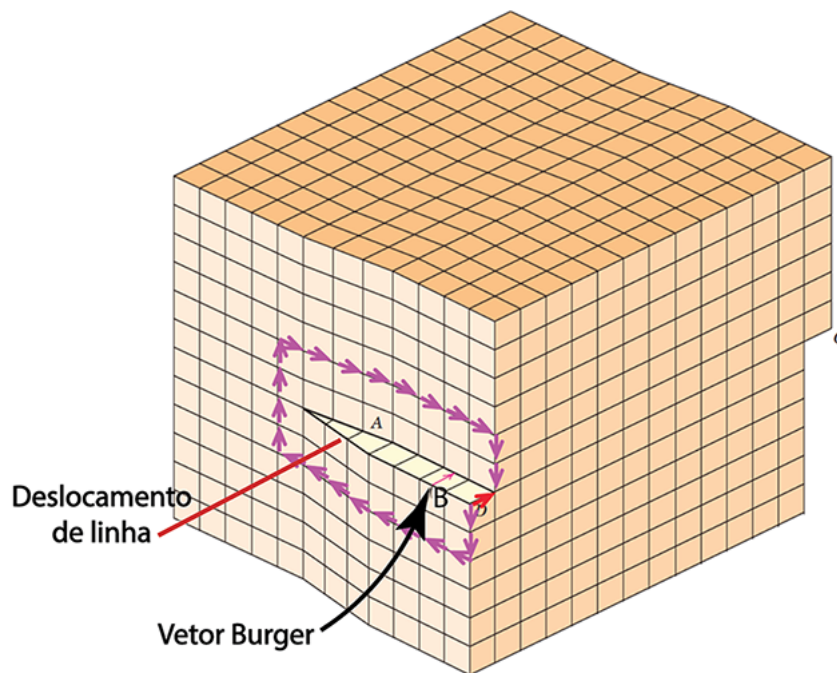


Figura 3.24 a) luxação b) vetor de Burger - Fonte: K. Chakrabarti [2]

### Defeitos Planares

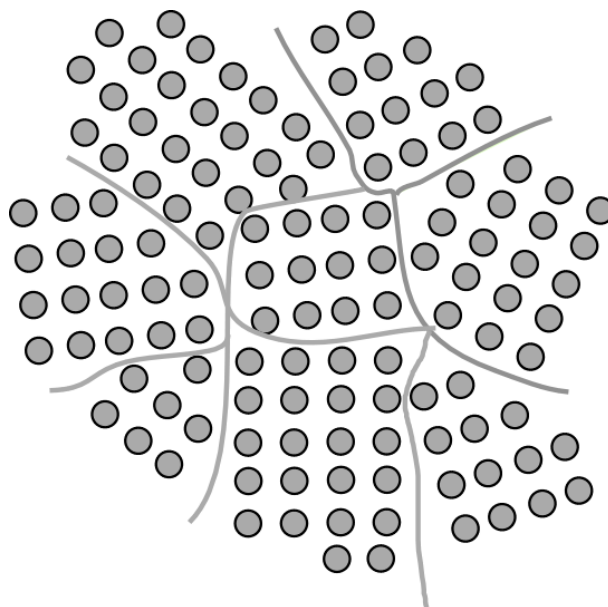
Segundo [2], uma descontinuidade no plano da rede cristalina é chamada de defeito planar. Por exemplo, em um sólido policristalino (ver Figura 3.25) o defeito separa o cristal em regiões com diferentes orientações, determinando o limite do grão. Os átomos alocados no limite do grão não estão conformados em um arranjo cristalino perfeito. Os limites do grão surgem quando há crescimento desigual do cristal durante sua cristalização. Em cristais habituais, os tamanhos dos grãos variam de  $1\ \mu\text{m}$  a  $1\ \text{mm}$ . Se o amortecimento na orientação cristalográfica ocorre em pequenos ângulos (tipicamente inferior a  $10^\circ$ ), o limite será semicoerente, chamado de limite de ângulo baixo. Os limites de grão de ângulo baixo são delimitados por paredes de deslocamento e são frequentemente representados como uma matriz de luxações de borda (limite de inclinação) ou luxação de parafuso (limite de torção). A presença de limites de grãos em materiais policristalinos afeta fortemente seu comportamento sob tensão-deformação.

Os limites dos grãos são geralmente mais fortes do que o material no próprio grão, por causa disso a fratura na maioria dos metais ocorrida a baixas temperaturas é *intergranular*. (Propagação de fraturas através dos grãos, [2]).

### Teoria da Percolação

Segundo [10]-[2], a teoria da percolação trata de uma fenomenologia de transição de fase, considerada como um modelo aproximado de danos. Esta representa um caso limite (forte heterogeneidade) para o qual uma série de resultados teóricos e numéricos estão bem estabelecidos. Esta teoria, portanto, oferece algumas ferramentas que podem ser aplicadas a alguns modelos de falhas.

A referência [2] relata que, se consideramos uma placa não condutora pulverizada uniformemente com um líquido condutor e aplicarmos uma diferença de potencial nas extremidades opostas da mesma. Ao medirmos a corrente com um amperímetro conectado em série com a placa, inicialmente não haverá corrente se nenhum traço do líquido condutor estiver espalhado



**Figura 3.25** Separação de grãos - Fonte: o próprio autor

sobre esta. Entretanto, se sua área for coberta totalmente pelo fluido, então, obviamente, a placa conduzirá uma certa quantidade de corrente. Note-se que a corrente só começará a fluir se existir um certo percurso ligando os conjuntos de sobreposição dos grãos dos condutores presente no líquido através da placa e permitindo a passagem da corrente (ver Figura 3.26a). Este fenômeno é chamado de percolação, porque aproveita-se de um possível percurso existente que permite a passagem da corrente, no qual, o ponto em que a condução ocorre pela primeira vez é chamado de limiar de percolação. Certamente que, com o aumento deste número de percursos, a corrente elétrica também aumentará (ver Figura 3.26b).

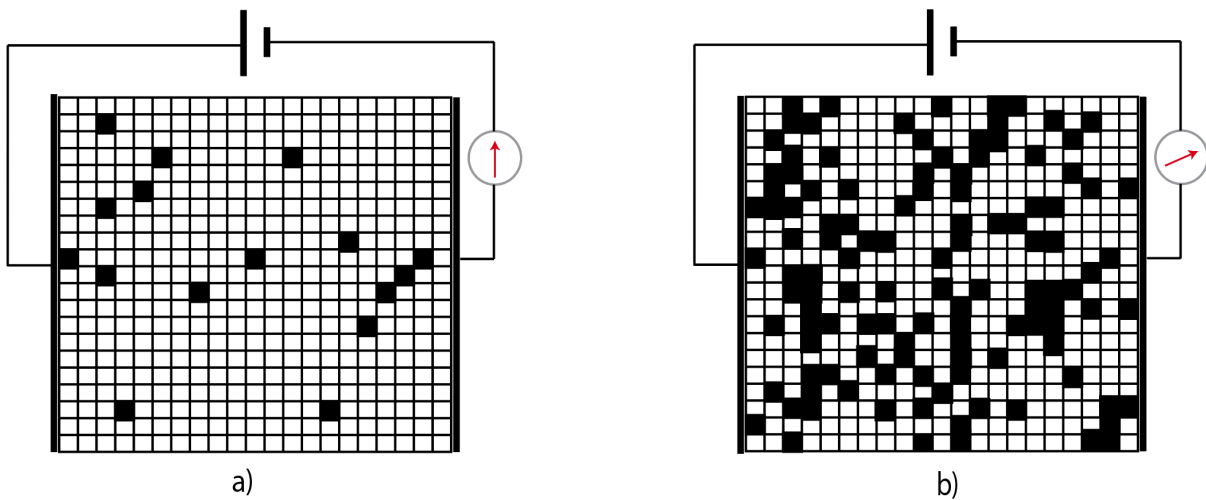
Alternativamente, ainda no escopo da teoria da percolação considerada um exemplo de criticidade, no experimento tratado aqui, tem a particularidade de emergir no momento em que retirarmos uma quantidade mínima de resistores fazendo o circuito desligar; anulando assim a corrente elétrica que na sua tentativa de percolar através do sistema que, cada vez mais encontra diminuídos os caminhos para se propagar. Similarmente, esse fenômeno é uma característica relevante na ocorrência das rupturas, fornecendo um importante ingrediente para a elaboração de um modelo de fraturas bem geral. Com isso podemos fazer uma analogia entre as rupturas e a percolação, isto é, quando um sólido está sob tensão na eminência de quebrar, então o incremento no número de microfissuras ou saliências será assemelhado com a diminuição na quantidade de caminhos que facilitem a percolação da corrente no sistema de resistores elétricos. Com isso, é importante explicar sobre a seguinte questão, inicialmente discutida acima:

**Será necessário cobrir toda a placa para obter uma corrente máxima?**

*A resposta é, não. Porém sua justificativa não é trivial.*

Os cálculos numéricos desenvolvidos por [2] demonstram que quando metade da placa é preenchida com o líquido condutor, ela terá condução máxima.

Alternativamente, o professor terá que trabalhar com os alunos o experimento de remoção aleatória de resistores. Em que, a medida da corrente elétrica tenderá a zero quando o número de componentes interrompidos atingir a metade. Tendo os conceitos citados bem estabelecidos, o docente poderá usar as informações para o planejamento da aula da melhor maneira possível,



**Figura 3.26** a) início de pontos de condução b) corrente aumentando conforme cresce os pontos de condução  
Fonte: o próprio autor

para que ao final da exposição, possa apontar as semelhanças e diferenças entre a teoria da percolação e o experimento da remoção aleatória de resistores que será tratado na aula 6 junto com sua abordagem prática.

### Avaliação da Aula - 5

Realizar uma atividade contendo questões e imagens sobre os tipos de defeitos.

#### Modelo sugerido para a avaliação da Aula-5

#### Questões sobre Tipos de defeitos em sólidos

- 1) O que caracteriza o defeito de ponto?
- 2) Qual o defeito está relacionado com os grãos formados nos metais?
- 3) O que é o vetor de Burger?
- 4) Qual a relação da corrente elétrica com a percolação?
- 5) Explique porque a percolação pode ser usada com um modelo de fraturas ?

### 3.1.7 Aula 6 - Execução Experimental

**Tempo estimado:** 50 min

**Tipo:** Aula experimental

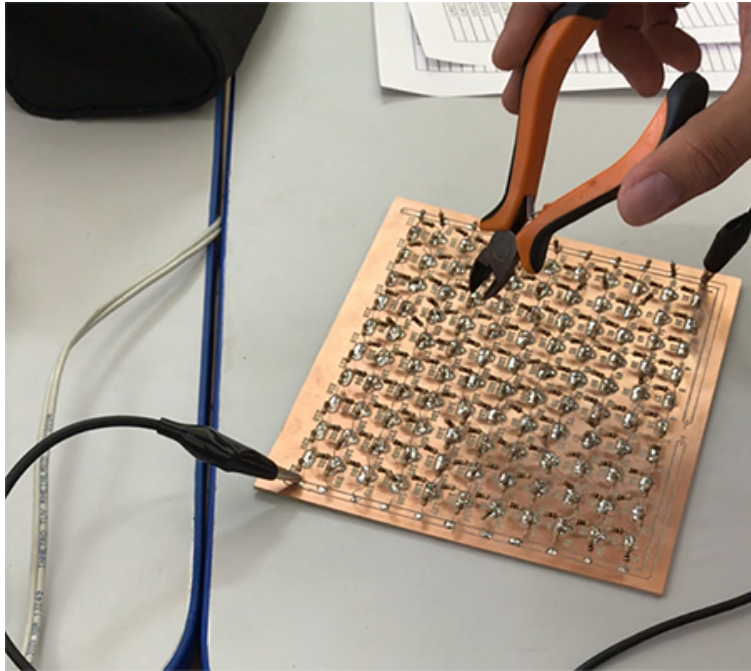
**Objetivos:** Experimentar, coletar dados, calcular e plotar os gráficos da corrente em função da remoção aleatória de elementos resistivos.

**Recursos:** Sala com facilidades de pelo menos 5 tomadas de 127 V ou 220 V, cadeiras, mesas com tampo retangular nivelado, placas de circuito, alicate de corte, multímetro, extensões para redes elétricas e uma lista de números aleatórios que, poder ser adquirida nos seguintes endereços: <https://airtonmodesto.wixsite.com/airtonphysics/about>, <https://www.random.org/lists/>. Instrua aos alunos sobre a finalidade do uso dos números aleatórios presentes nas listas.

**Desenvolvimento:** Divida a turma em grupos de alunos e distribua os materiais junto com uma lista de números aleatórios. Em seguida, peça-lhes que montem o experimento conforme mostrado na Figura 3.27, em que, os resistores são numerados em uma sequência correlata, ligue cada circuito à fonte estabilizada em 10 V e ajuste o multímetro na função amperímetro na escala de 200 mA. Verifique o ótimo funcionamento da montagem realizada por cada grupo de alunos. Uma vez localizado o resistor numerado, escolhido aleatoriamente seguindo a sequência de números aleatórios previamente gerados por eles, o aluno deverá interrompê-lo com o alicate de corte (veja a Figura 3.28).



**Figura 3.27** Montagem do experimento - Fonte: o próprio autor



**Figura 3.28** Removendo resistores - Fonte: Próprio autor

Cuidadosamente, a cada remoção de um elemento resistivo, os alunos deverão anotar a fração removida, assim como a leitura da correspondente corrente elétrica no amperímetro. Por exemplo: como o sistema é constituído por 221 componentes, ao removermos o primeiro resistor, o valor que deveremos anotar é corresponde a fração de elementos removidos, ou seja,  $1/221$ . E se a corrente indicada no amperímetro for 100 mA, registamos o valor 100 na terceira coluna da tabela conforme sugerimos a seguir.

#### Exemplo de tabela

N	Fração da remoção	Corrente em mA
1	$1/221 = 0,004524 \dots$	98,6
2	$2/221 = 0,0090497\dots$	97,5
3	$3/221 = 0,013574\dots$	96,4
4	$4/221 = 0,018099\dots$	93,4
⋮	⋮	⋮

### 3.1.8 Procedimentos de ajuste de dados e gráficos

Neste ponto, faz-se necessário o uso algum programa de planilha eletrônica e na sequência usarmos por exemplo o *Gnuplot* para traçar os gráficos. Para as planilhas, sugerimos o **Libreoffice**, de uso livre e multiplataforma e que encontra-se disponível em: <https://pt-br.libreoffice.org/>, onde há também instruções para instalação e execução. Após a correta instalação e aquisição dos respectivos dados, trabalhe da seguinte forma:

1º Coloque os dados correspondentes a fração da remoção dos resistores na primeira coluna e as leituras dos valores das correntes obtidas por cada grupo na colunas subsequentes, na seguinte tabela, conforme Figura 3.29.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Fração	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9	Grupo 10	Exp. 11	Exp. 12	Exp. 13	NÚMEROS
2	0	99,80	98,80	99,70	99,40	99,50	99,90	97,60	95,10	98,00	99,1	98,60	99,10	98,41	0
3	0,004524887	99,70	98,60	98,80	99,10	99,03	99,40	96,50	94,13	96,50	97,6	94,13	97,60	96,8	1
4	0,009549774	99,50	97,60	97,50	98,20	98,20	98,20	90,80	94,15	95,00	97,15	94,15	97,15	96,8	2
5	0,013574061	99,30	97,10	96,80	97,60	97,40	97,80	88,80	92,83	93,10	96,3	92,83	96,30	96,8	3
6	0,018999548	97,40	96,50	93,70	95,86	95,86	95,86	88,50	91,49	91,70	95,44	91,48	95,44	95,08	4
7	0,022624434	97,40	95,80	92,60	95,35	95,60	95,26	88,50	91,47	91,70	94,71	91,47	94,71	93,61	5
8	0,027149321	97,20	94,30	92,60	94,80	94,32	94,70	82,40	89,84	90,30	94,7	89,84	94,70	93,6	6
9	0,031674208	95,10	94,20	92,60	93,96	94,10	93,99	78,30	88,37	90,30	94,59	89,40	94,59	93,38	7
10	0,036199095	94,80	94,00	90,20	93,00	93,40	93,08	78,30	86,94	90,30	92,63	89,20	92,63	91,26	8
11	0,040723982	94,50	94,10	88,30	92,30	92,40	92,32	78,30	86,82	90,30	91,05	89,10	91,05	89,6	9
12	0,045248869	94,50	94,00	88,20	92,23	92,32	92,25	78,20	85,99	89,90	90,51	88,89	90,51	88,51	10
13	0,049773756	94,40	93,70	88,20	92,10	92,32	92,14	78,20	82,89	88,90	89,58	88,84	89,58	86,65	11
14	0,054298643	94,30	93,80	87,30	91,80	91,90	91,82	77,70	81,39	88,90	89,09	88,56	89,09	85,68	12
15	0,058823529	94,20	89,80	87,30	90,43	90,51	90,44	76,20	76,03	88,90	87,54	88,00	87,54	85,68	13
16	0,06348416	93,10	88,10	86,00	88,30	88,70	88,84	75,20	74,45	88,40	87,33	88,64	87,33	85,55	14
17	0,067873303	92,30	88,20	85,90	88,30	87,34	88,40	75,10	74,16	88,20	86,76	88,30	86,76	84,41	15
18	0,07239819	92,10	88,20	85,90	87,40	85,80	87,88	74,80	72,95	86,80	86,21	87,40	86,21	84,11	16
19	0,076823077	91,80	87,30	84,10	87,40	85,21	87,15	74,30	72,91	86,90	86,21	87,40	86,21	84,11	17
20	0,081447964	91,80	87,30	82,10	86,10	82,40	85,94	73,20	72,89	85,20	84,81	86,10	84,81	84,11	18
21	0,085972851	91,50	85,50	80,90	84,60	83,10	85,12	68,40	72,86	84,30	84,11	84,60	84,11	84,32	19
22	0,090497738	91,40	85,50	80,60	84,00	81,10	84,52	67,80	72,86	84,30	83,27	84,00	83,27	82,94	20
23	0,095022624	91,00	80,50	80,50	80,90	81,60	83,22	67,80	72,94	84,30	82,92	80,90	82,92	82,93	21
24	0,099547511	91,00	80,70	79,50	80,60	76,40	82,12	67,70	71,87	82,70	82,03	80,60	82,03	81,15	22
25	0,104072398	90,30	80,50	79,00	79,30	78,50	81,64	66,60	70,77	81,20	81,43	79,30	81,43	81,05	23
26	0,108597285	90,10	80,40	78,90	78,20	82,50	81,52	66,50	69,29	79,70	79,35	78,20	79,35	80,3	24
27	0,113122172	90,00	80,00	78,10	76,20	82,80	81,42	65,40	69,23	77,10	79,35	76,70	79,35	80,29	25
28	0,117647059	87,30	78,20	77,00	76,30	81,50	80,06	65,30	67,56	76,00	79,35	76,30	79,35	80,2	26
29	0,122171946	86,50	76,90	69,70	75,40	80,30	77,36	65,10	65,64	76,00	78,49	75,40	78,49	79,17	27
30	0,126696833	86,30	76,30	69,70	75,40	79,10	77,36	65,00	65,75	75,90	77,67	75,40	77,67	79,03	28
31	0,131221719	86,10	75,80	67,80	73,30	78,00	76,20	64,80	63,89	75,10	76,25	73,30	76,25	77,09	29
32	0,135746606	85,20	74,90	66,30	71,40	78,00	75,16	64,50	63,89	75,10	76,24	71,40	76,24	77,07	30
33	0,140273493	85,10	74,90	64,90	70,40	77,20	74,50	64,30	64,87	74,90	75,34	70,40	75,34	75,38	31
34	0,14479638	84,00	74,70	64,60	68,80	74,40	75,30	64,10	64,68	74,30	74,07	68,80	74,07	73,83	32
35	0,14932126	84,00	73,50	64,60	68,10	74,50	72,94	64,00	64,57	74,00	72,88	68,10	72,88	71,56	33
36	0,153846154	83,60	72,90	64,60	66,50	73,20	71,40	63,50	63,34	73,90	72,87	66,50	72,87	71,54	34
37	0,158371041	83,50	72,90	63,30	65,70	71,20	70,00	62,80	63,46	73,70	72,37	66,80	72,37	70,636	35
38	0,162895928	83,50	71,30	61,90	65,70	69,80	66,20	62,70	61,63	73,60	72,32	65,20	72,32	70,63	36
39	0,167420814	82,10	71,50	61,80	63,30	67,80	64,30	62,50	61,40	73,60	72,32	63,30	72,32	70,63	37
40	0,171945701	82,10	71,20	59,80	63,20	67,50	64,40	62,50	61,28	72,10	71,4	63,20	71,40	68,79	38

Figura 3.29 Dados organizados no Libreoffice - Fonte: Próprio autor

2º Para usarmos a equação 3.15 sugerida na página 4 da referência [4].

$$\frac{I(x)_{max}}{I_{max}(0)} = \frac{1}{1 + a_1 \cdot \left\{ \frac{\ln(131)}{\ln(v/x)} \right\}^{t/2} + a_2 \cdot \left\{ \frac{\ln(131)}{\ln(v/x)} \right\}^t} \quad (3.15)$$

No qual, o número de nós presente em nossa malha é 131,  $I_{max}(0)$  é a corrente inicial quando nenhum resistor foi retirado e,  $I(x)_{max}$  a corrente quando uma fração  $x$  arbitrária de componentes resistivos for interrompida. Os outros parâmetros envolvidos na equação tem importantes significados físicos:  $v$  é a fração crítica de elementos resistivos removidos que faz com que a corrente no sistema anule totalmente, e o parâmetro  $t$  é o expoente crítico que nos diz sobre a rapidez com que este fenômeno ocorre, a medida que o sistema se aproxima da fração crítica.

Para uma correta utilização da expressão 3.15, devemos primeiro normalizar os valores experimentais das correntes de cada grupo, para tanto criamos uma nova coluna com novos valores que cada valor da corrente é dividido pela respectiva corrente máxima presente linha 2.

Um exemplo é mostrado na Figura 3.30.

	A	B		Q	R	S	T	U	V
1	Fração	Grupo 1		Nor-grup1	Nor-grup2	Nor-grup3	Nor-grup4	Nor-grup5	Nor-grup
2	0	99,80		1	1	1	1	1	1
3	0,004524887	99,70		0,998997996	0,997975709	0,990972919	0,996981891	0,995276382	0,99499
4	0,009049774	99,50		0,996993988	0,987854251	0,977933801	0,987927565	0,986934673	0,98298
5	0,013574661	98,30		0,98496994	0,982793522	0,970912738	0,981891348	0,978894472	0,97897
6	0,018099548	97,40		0,975951904	0,976720648	0,939819458	0,964386318	0,963417085	0,9595
7	0,022624434	97,40		0,975951904	0,969635628	0,928786359	0,959255533	0,96080402	0,95355
8	0,027149321	97,20		0,973947896	0,954453441	0,928786359	0,953722334	0,947939698	0,94794
9	0,031674208	95,10		0,952905812	0,953441296	0,928786359	0,94527163	0,945728643	0,94084
10	0,036199095	94,80		0,9498998	0,951417004	0,904714142	0,935613682	0,938693467	0,93173
11	0,040723982	94,50		0,946893788	0,95242915	0,885656971	0,928571429	0,928643216	0,92412
12	0,045248869	94,50		0,946893788	0,951417004	0,884653962	0,927900738	0,927839196	0,92342
13	0,049773756	94,40		0,945891784	0,948380567	0,884653962	0,926559356	0,927839196	0,92232
14	0,054298643	94,30		0,94488978	0,949392713	0,875626881	0,923541247	0,92361809	0,91911
15	0,058823529	94,20		0,943887776	0,908906883	0,875626881	0,909792086	0,909648241	0,90530
16	0,063348416	93,10							

Figura 3.30 Normalização dos valores da corrente elétrica - Fonte: Próprio autor

3º Neste momento vamos preparar os dados para gerar o gráfico. Copie os dados da fração (coluna A) e os dados normalizados, crie uma nova planilha e clique *Editar -> colar especial*, em seguida clique em *números*. Depois substitua as vírgulas por ponto, clicando em *Editar -> localizar e substituir*, em localizar coloque vírgula (,) e em substituir preencha com um ponto(.), e em seguida clique em substituir todos e confirme em *fechar*, como mostrado na Figura 3.31.

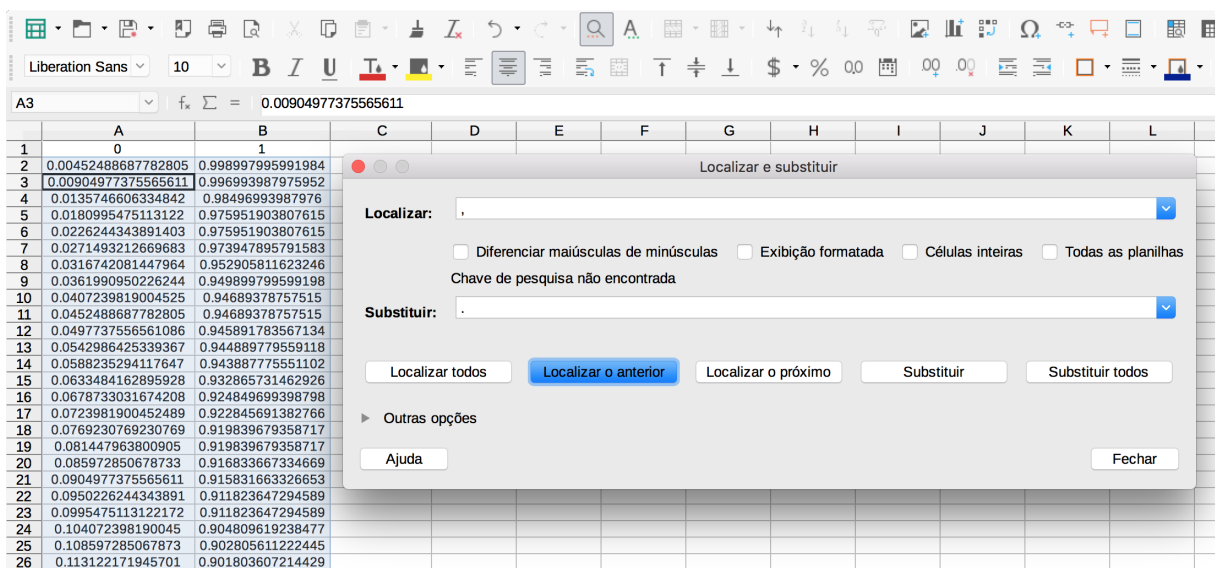


Figura 3.31 Substituindo a vírgula por ponto - Fonte: Próprio autor

4º Agora clique em *Salvar como...* e escolha um nome para o arquivo com a extensão (.csv), logo em seguida, em baixo clique em *Tipo de arquivo* e clique em *Texto CSV (.csv)* e salve em um local apropriado, como apresentada nas Figuras 3.32.

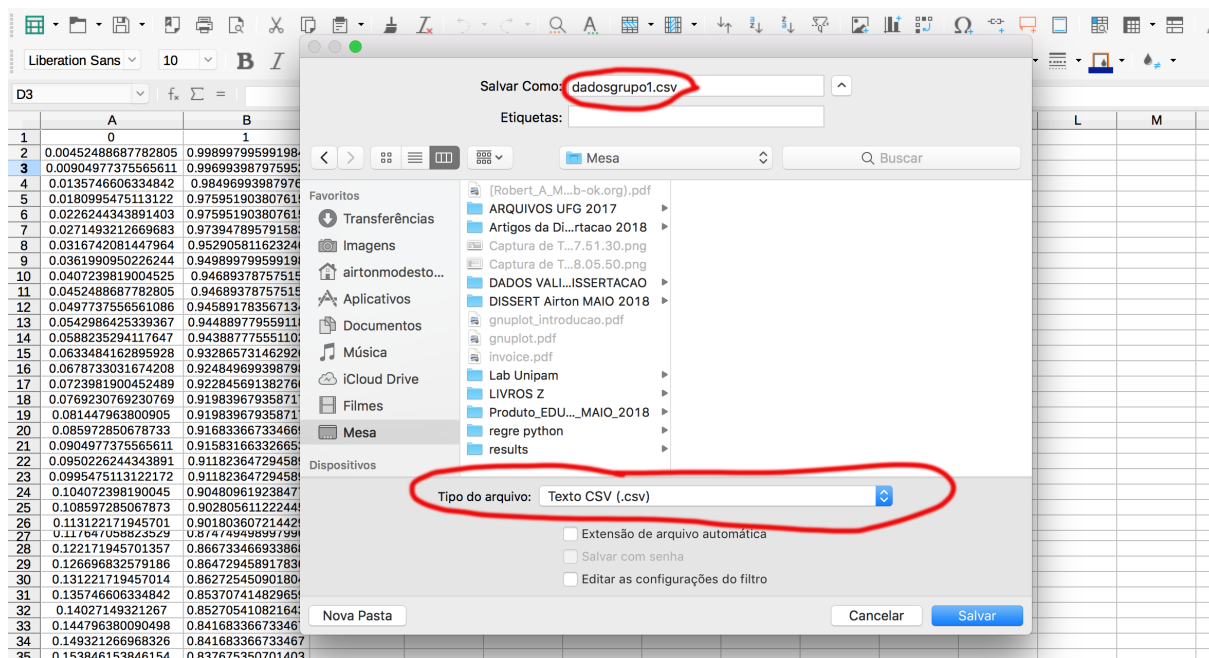


Figura 3.32 Substituindo a vírgula por ponto - Fonte: Próprio autor

5º Em seguida confirme em *Utilizar o formato Texto CSV*. Confirmando o Libreoffice apresentará outra janela chamada *Opção de campos*. Em delimitador de campo, escolha *Tabulação*, e em *Delimitador de texto* escolha ("). Como mostra as Figura 3.33 e 3.34.

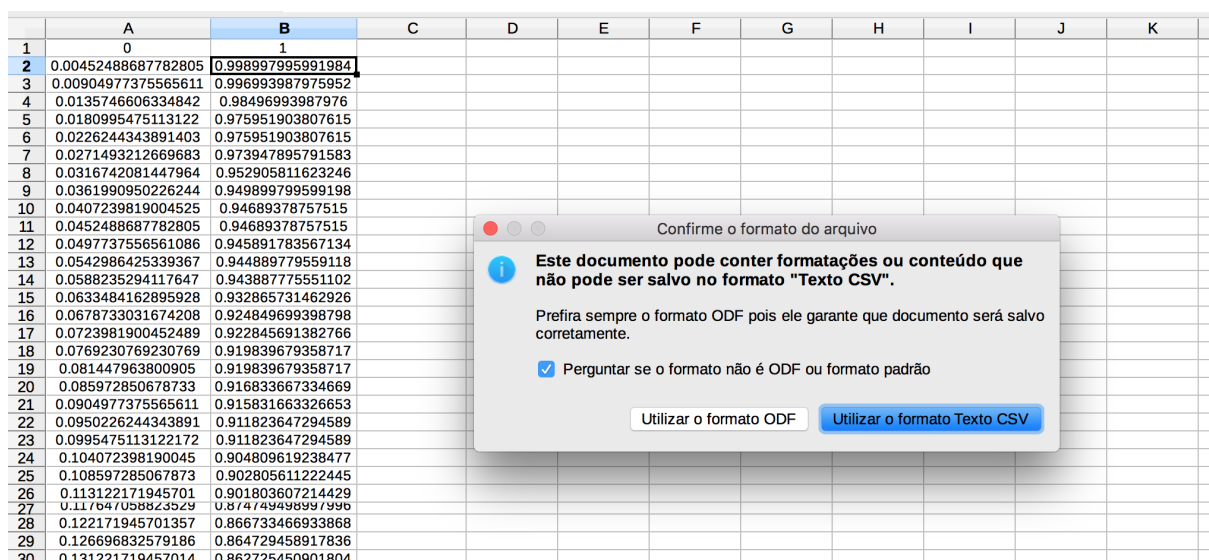


Figura 3.33 Salvando com formato (.csv) - Fonte: Próprio autor

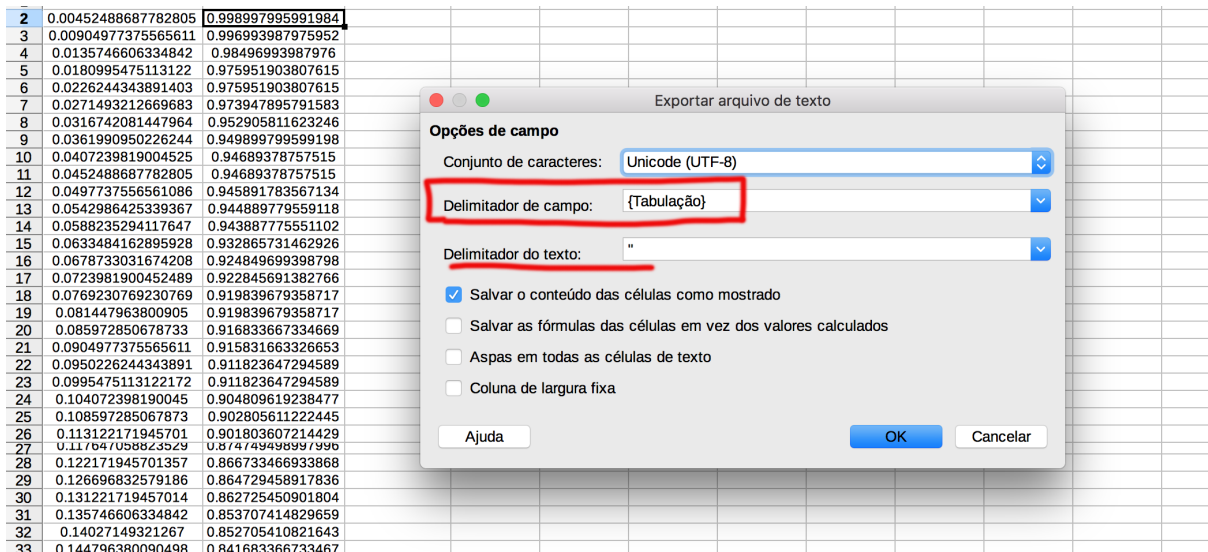


Figura 3.34 Confirmando a tabulação - Fonte: Próprio autor

### 3.1.9 Plotando gráficos no *Gnuplot* ou *Scidavis*

O Gnuplot é um programa de utilização livre para gerar gráficos em 2D ou 3D por linha de comando e pode ser instalado em sistemas linux, MacOs e Windows. As orientações de uso e instalação estão disponíveis <http://www.gnuplot.info/>. Em que, optamos utilizá-lo por questões de compatibilidade com o sistema MacOs.

O Scidavis é uma aplicação bem intuitiva com uso de janelas, e portanto, mais amigável. Caso o leitor preferir, basta seguir as instruções neste *link*: <http://scidavis.sourceforge.net/>

6º Com os dados previamente gerados no item 5, entre no *terminal de seu sistema operacional* e navegue até a pasta onde se encontra o arquivo **dadosgrupo1.csv**, em seguida entre no *Gnuplot* digitando: **gnuplot**, nos quais serão apresentadas as informações como na Figura 3.35.

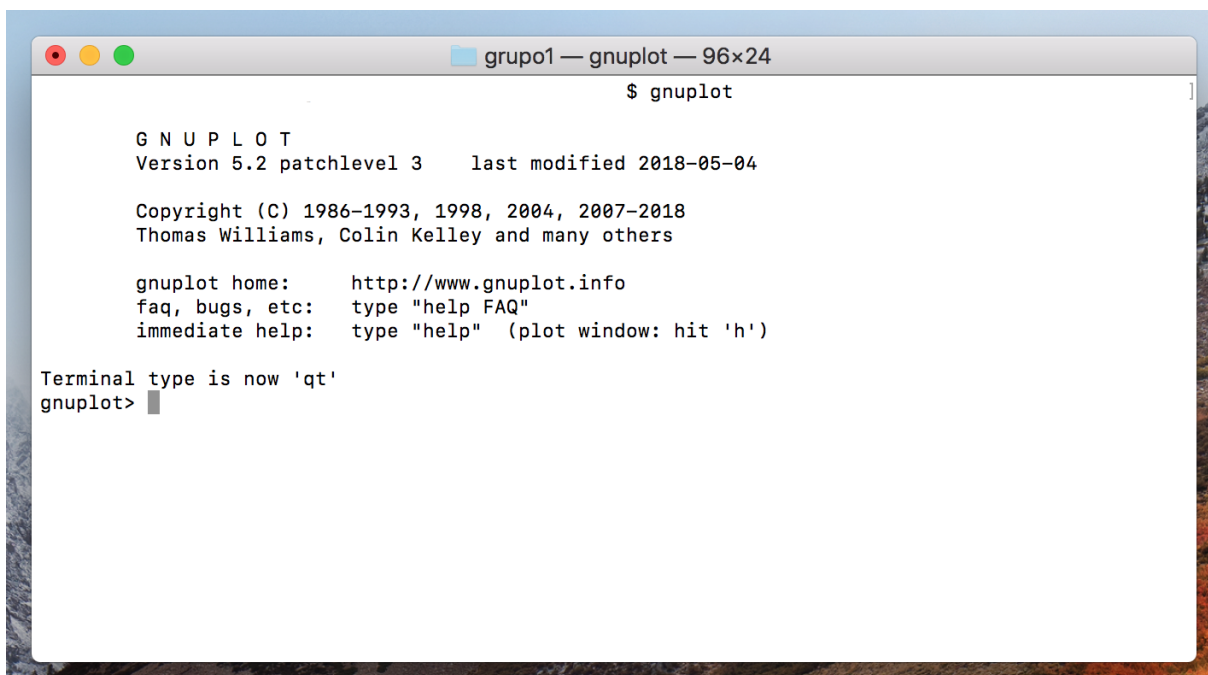
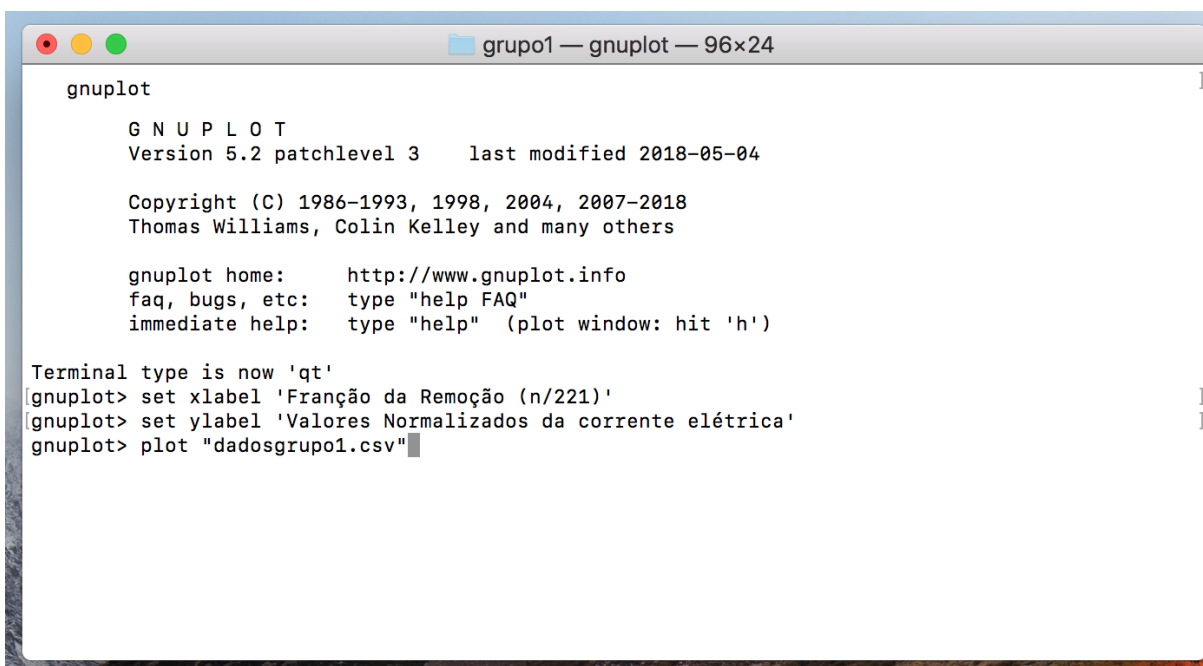


Figura 3.35 Terminal com o gnuplot - Fonte: Próprio autor

7º Em seguida gere o gráfico já com os respectivos nomes das variáveis nos eixos (x) e (y), como os seguintes comandos mostrados na Figura 3.36.



```
gnuplot
  GNU P L O T
  Version 5.2 patchlevel 3   last modified 2018-05-04

  Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2018
  Thomas Williams, Colin Kelley and many others

  gnuplot home:   http://www.gnuplot.info
  faq, bugs, etc: type "help FAQ"
  immediate help: type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now 'qt'
[gnuplot> set xlabel 'Franção da Remoção (n/221)']
[gnuplot> set ylabel 'Valores Normalizados da corrente elétrica']
[gnuplot> plot "dadosgrupo1.csv"]
```

Figura 3.36 Gerando o gráfico no Gnuplot - Fonte: Próprio autor

Após a execução do dos comandos será apresentado um gráfico semelhante a Figura 3.37.

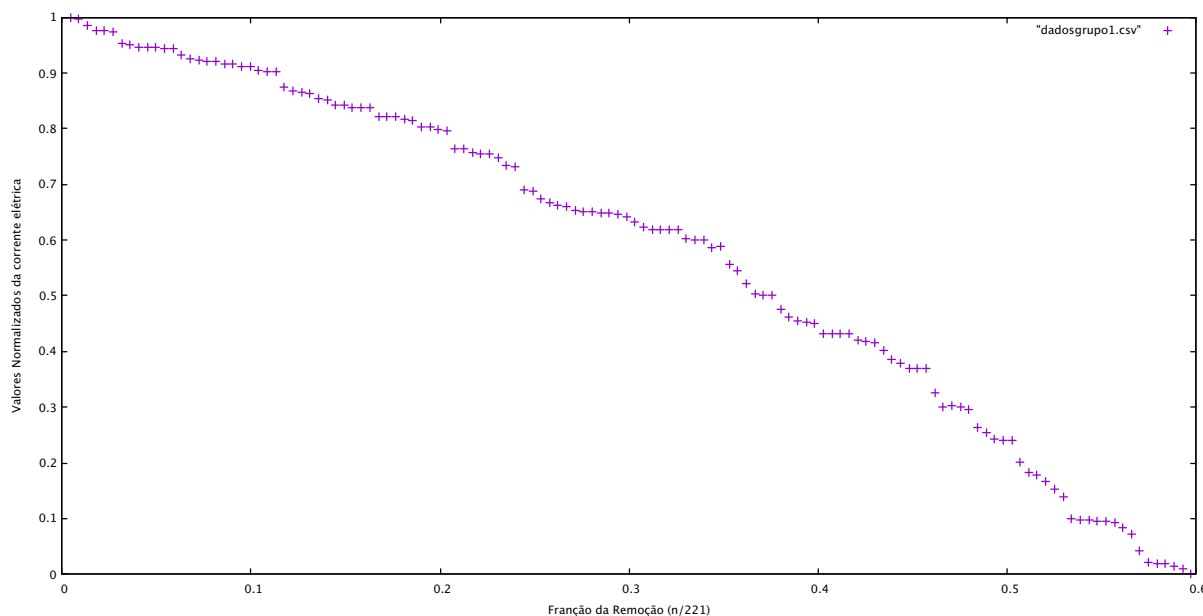


Figura 3.37 Gráfico gerado no Gnuplot com os dados do Grupo1 - Fonte: Próprio autor

Observando o gráfico da Figura 3.37, nota-se que há muitos pontos fora da linha de tendência esperada, ou pontos formando regiões em reta horizontal, e que precisam ser suavizados e ajustados para encontrarmos uma equação de interpolação que melhor se relacione com os dados experimentais.

Para tanto, é necessário usar um apropriado programa de suavização de curvas, ou também como sugestão, usar algumas linhas de execução que escrevemos em **Fortran** e que utilizamos

em conjunto com o **Gnuplot** para suavizarmos os dados da curva através de médias sobre pontos vizinhos e gerar os gráficos. Porém, se você estiver usando o Scidavis o processo a seguir não será necessário.

**8º** Utilizando um editor de sua preferência cole as linhas apresentadas abaixo e salve com o nome **ajustepontos.f**, isso na mesma pasta onde encontra-se o arquivo *dadosgrupo1.csv*.

---

### Algoritmo 1: ajustepontos.f

---

```

1 double precision x1, x2, s1, s2
2 double precision xi(150), ri(150)
3 double precision xx1(50), xx2(50)
4 integer*4 ii, kk, ki, kf, kif, j1
5 double precision a1, a2, v, t, g1, g2
6 kif = 2
7 open (unit = 24, file = "dadosgrupo1.csv")
8 do 10 ii = 1, 130
9 read(24,*) x1, x2
10 xi(ii) = x1
11 ri(ii) = x2
12 write(12,20) xi(ii), ri(ii)
13 continue
14 close(24) format(2(1x,f12.2))
15 j1 = 1
16 ii = 1
17 xx1(j1) = xi(ii)
18 xx2(j1) = ri(ii)
19 write(14,60) j1, xx1(j1), xx2(j1)
20 continue
21 ii = ii + 1
22 ki = ii
23 kf = ki + kif
24 if (kf .ge. 128) goto 100
25 j1 = j1 + 1
26 s1 = 0.d0
27 s2 = 0.d0
28 do 40 kk = ki, kf
29 s1 = s1 + xi(kk)
30 s2 = s2 + ri(kk)
31 continue
32 xx1(j1) = s1/dfloat(kif+1)
33 xx2(j1) = s2/dfloat(kif+1)
34 write(14,60) j1, xx1(j1), xx2(j1)
35 ii = kf
36 goto 30
37 format(i4,2(1x,f12.2))
38 continue
39 do 200 ii=1,j1
40 write(16,220) xx1(ii)/dfloat(221), xx2(ii)/xx2(1)
41 continue
42 format(2(1x,f12.2))
43 stop
44 a1 = -0.0648804d0
45 a2 = 0.0645811d0
46 v = 0.605188d0
47 t = 1.32661d0
48 do 240 ii = 0, 63
49 x = dfloat(ii)/dfloat(100)
50 g1 = dlog(132.d0)/dlog(v/x)
51 g2 = 1.d0/(1.d0+a1*(g1)**(0.5d0*t)+a2*(g1)**t)
52 write(18,260) x, g2
53 continue
54 format(2(1x,f12.3))
55 stop
56 end

```

---

9º Antes compilar o algoritmo *ajustepontos.f* é bom saber que ele deve ser executado duas vezes e devemos ficar atentos a 5 linhas muito importantes:

1. a linha **6** está programada para ( $kif = 2$ ) que, determina o número de pontos vizinhos que serão considerados e pode ser alterada arbitrariamente por outros valores inteiros positivos maiores que 1, de acordo com a sua necessidade.
2. Entre aspas, no final da linha **7** (`open (unit = 24, file = "dadosgrupo1.csv")`), está o nome do arquivo de dados tabelados que geramos anteriormente e, se necessário deve ser renomeado a cada nova compilação.
3. Na linha **8** (`do 10 ii = 1, 130`), o valor **130**, é o número de dados obtidos no experimento, e deverá ser alterado para valores também inteiros positivos menores ou maiores. Lembre-se que é fácil verificar estas linhas na planilha dos dados experimentais que mostram números de linhas variáveis que terminam antes ou depois de 130.
4. A linha **43** (`stop`) deverá ser apagada ou comentada somente após executar o programa uma vez.
5. As linhas **46** e **47** podem ser alteradas para valores próximos a estes, isso para encontrar uma curva ótima que consiga passar pela maior quantidade de pontos experimentais.

### 3.1.10 Instalação e Compilação para Fortran

Existem várias formas de compilar e executar instruções para Fortran. No entanto, optamos e sugerimos que usem o instalador do endereço: <https://gcc.gnu.org/wiki/GFortranBinaries> chamado **gfortran**.

10º Após a instalação, entre no **Terminal** navegue até a pasta dos arquivos *dadosgrupo1.csv* e *ajustepontos.f*. Você poderá também deixar a pasta aberta em outra janela para verificar a criação dos arquivos compilados no **gfortran**. Estando na pasta adequada digite o seguinte comando no terminal: `gfortran ajustepontos.f -o "progrupo1.ex"` e se não houver nenhum erro imediatamente aparecerá outro arquivo na pasta com nome **progrupo1.ex** como apresentadas nas Figura 3.38 e 3.39.

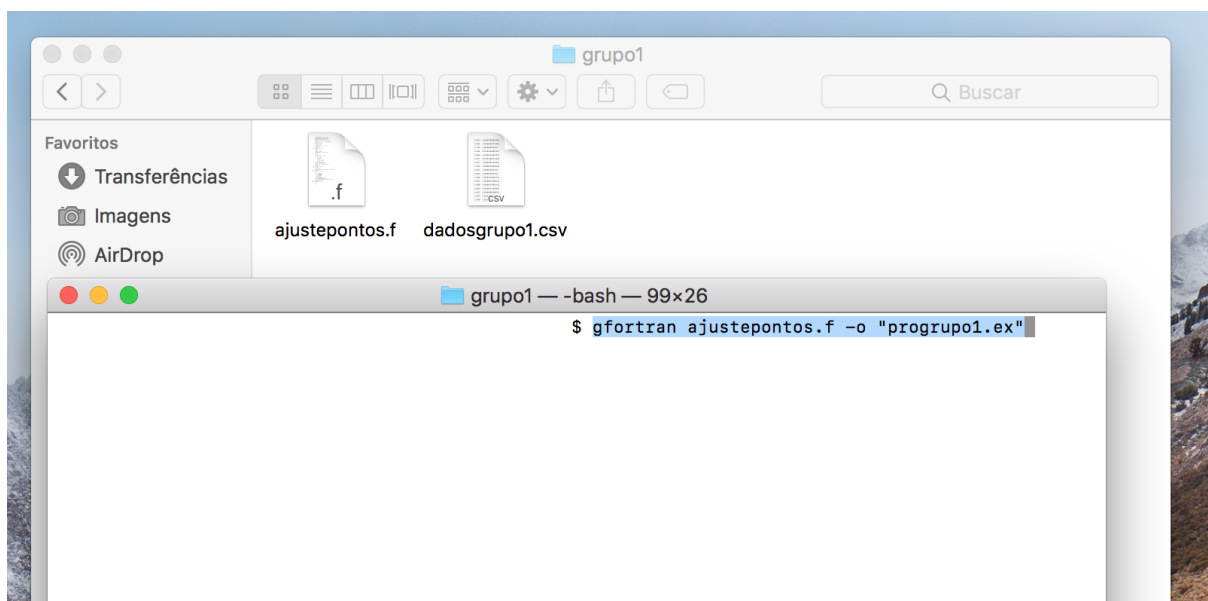
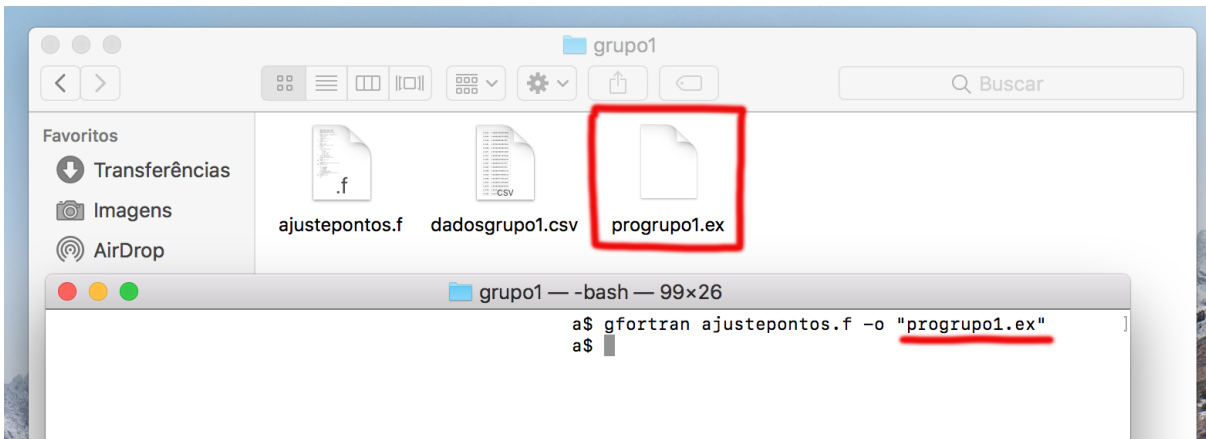
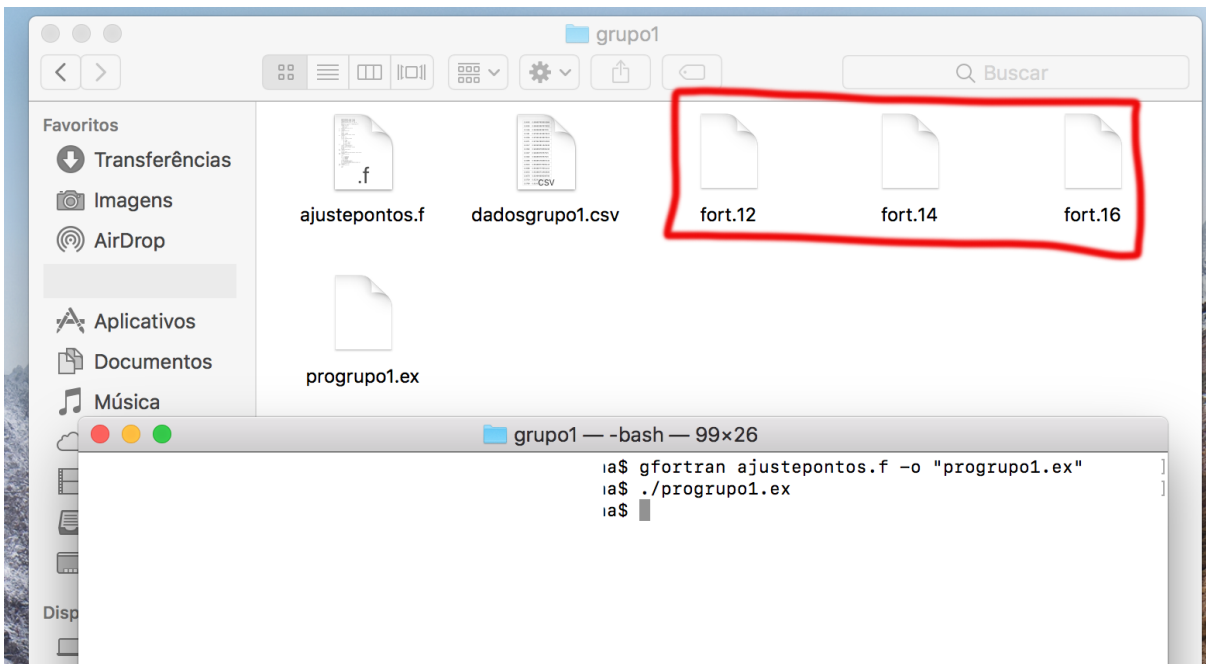


Figura 3.38 Compilação no gfortran - Fonte: o próprio autor



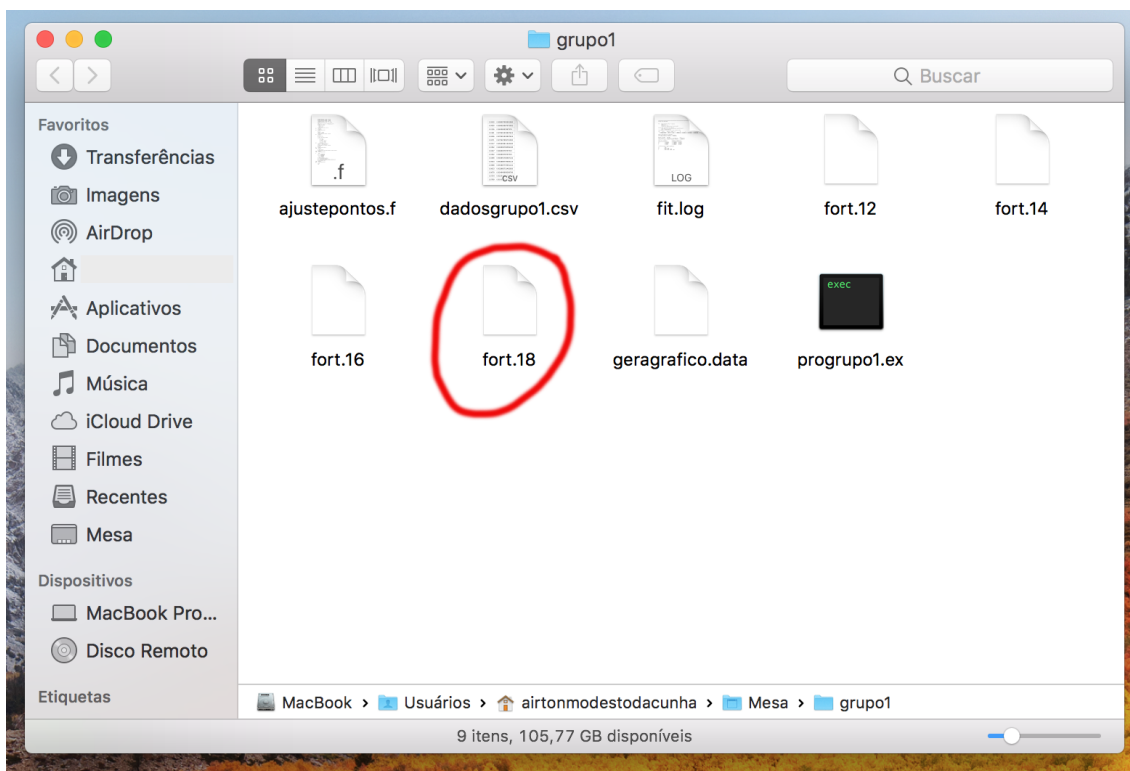
**Figura 3.39** Arquivo gerado pelo Gfortran - Fonte: o próprio autor

**11º** Neste momento execute o arquivo com o comando: `./progrupo1.ex` e observe que serão gerados os arquivos **fort.12**, **fort.14** e **fort.16**, conforme Figura 3.40.

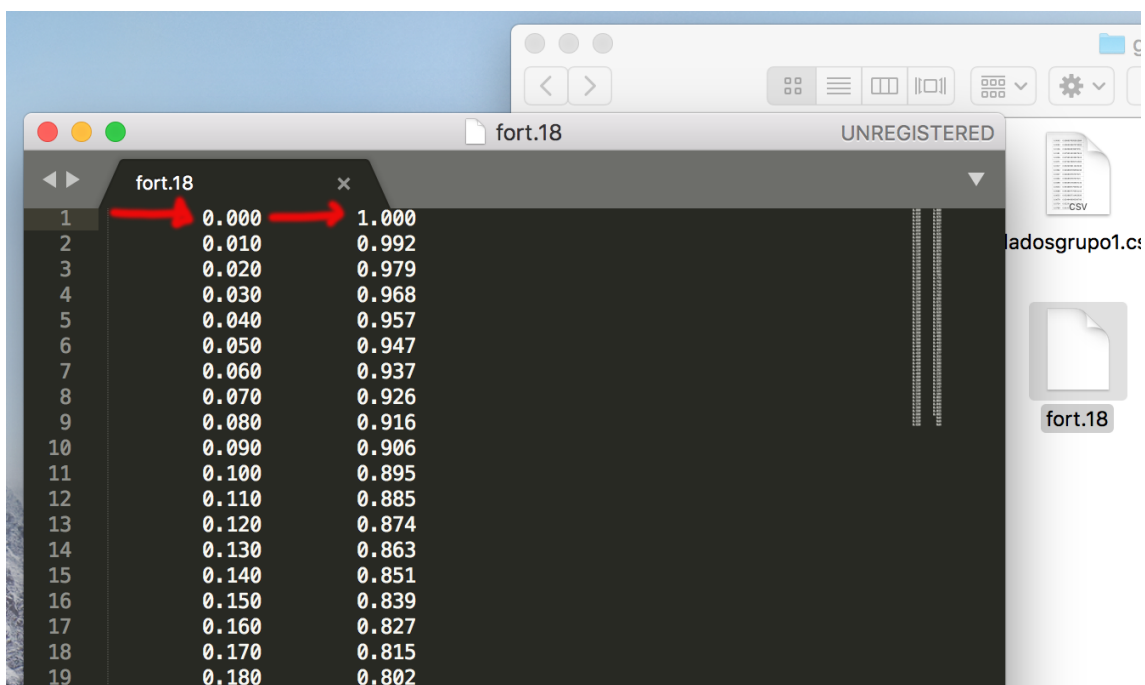


**Figura 3.40** Arquivos gerados após a execução do arquivo progrupo1.ex - Fonte: o próprio autor

**12º** Agora abra o arquivo *ajustepontos.f* em seu editor e comente ou delete a linha 43 onde contém a palavra *stop*. E repita o processo compilação e execução conforme os itens de 8 a 11, então será gerado um novo arquivo chamado **fort.18**, em seguida edite o, retirando a primeira linha, evitando calcular  $\log(0)$ , faça o mesmo com o arquivo **fort.14**, como mostrado nas Figuras 3.41 e 3.42.



**Figura 3.41** Gerando o arquivo fort.18 - Fonte: Próprio autor



**Figura 3.42** Corrigindo o arquivo fort.18 - Fonte: Próprio autor

**13º** Vamos agora plotar o gráfico usando um pequeno algoritmo no *Gnuplot* com: a linha de tendência, os dados ajustados e os valores das constantes **a1**, **a2**, **v** e **t**. A linha 5 deve ser alterada para os mesmo valores contidos no arquivo *ajustepontos.f* e a linha 13 deve ser renomeada para o nome do grupo ou experimento. Veja os detalhe na Figura 3.43.

```

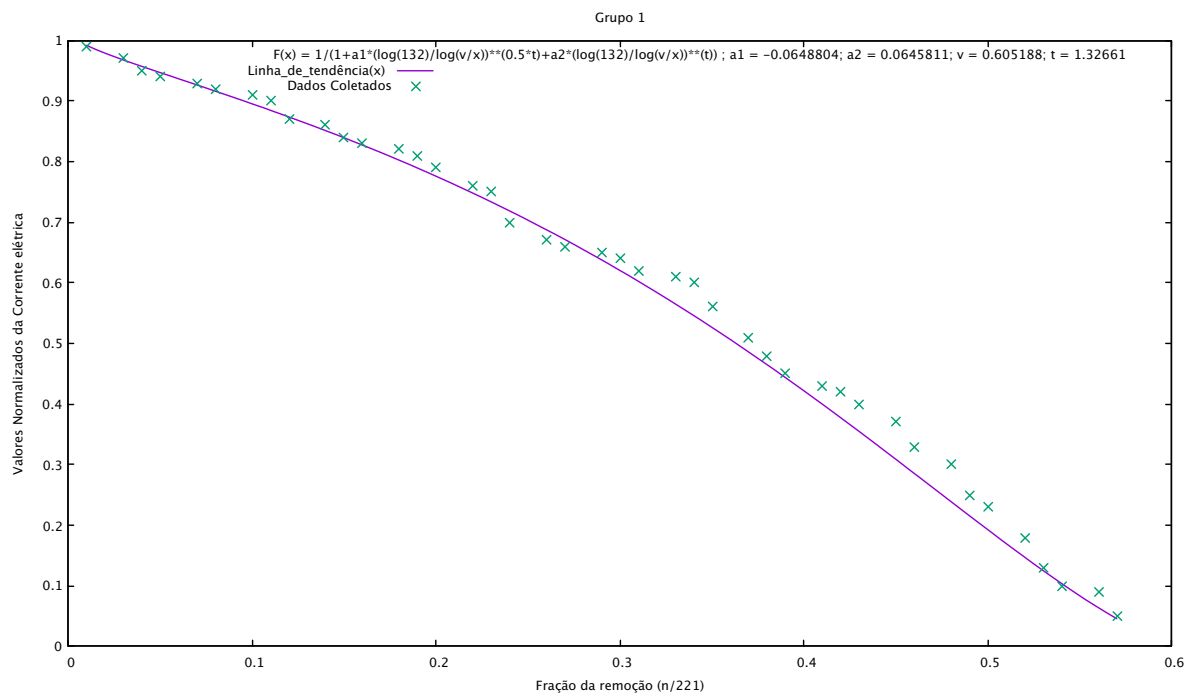
geragrafico.data  UNREGISTERED
geragrafico.data x
1  f1(x) = log(132)/log(v/x)
2
3  Linha_de_tendência(x) = 1/(1+a1*(f1(x))**(0.5*t)+a2*(f1(x))**(t))
4
5  a1 = -0.0648804; a2 = 0.0645811; v = 0.605188; t = 1.32661;
6
7  FIT_LIMIT = 1e-4
8
9  fit Linha_de_tendência(x) 'fort.18' using 1:2 via a1, a2, v, t
10
11  set key title 'F(x) = 1/(1+a1*(log(132)/log(v/
x))**(0.5*t)+a2*(log(132)/log(v/x))**(t)) ; a1 = -0.0648804; a2 =
0.0645811; v = 0.605188; t = 1.32661'
12
13  set title 'Grupo 1'
14
15  set xlabel 'Fração da remoção (n/221)'
16
17  set ylabel 'Valores Normalizados da Corrente elétrica'
18
19
20  plot Curva_ideal(x), 'fort.14' using 2:3 title 'Dados Coletados'
Line 9, Column 35  Tab Size: 4  Plain Text

```

**Figura 3.43** Corrigindo o arquivo fort.18 - Fonte: Próprio autor

**14º** Finalmente, copie a programação da figura 3.43, cole no editor e salve com o nome de **geragrafico.data** na mesma pasta. Agora entre no terminal, vá até a pasta dos arquivos, abra o Gnuplot e execute o seguinte comando: `load "geragrafico.data"`.

Pronto! Será apresentado o gráfico, a equação de interpolação, o valor de cada constante e a curva de ajuste ou linha de tendência.



**Figura 3.44** Gráfico final - Fonte: o próprio autor

No gráfico, Figura 3.44, mostra-se a curva que melhor se ajusta aos dados experimentais, através deste ajuste obtivemos os valores dos parâmetros **a1**, **a2**, **v** e **t** explicitados na expressão 3.15. Observamos que o ponto de interrupção do circuito encontra-se próximo de  $v = 0.605$  e o expoente crítico aproxima-se  $t = 1.33$ .

### 3.1.11 Aula 7 - Avaliação de Aprendizagem

**Tempo estimado:** 50 min

**Tipo:** Aula avaliativa

**Objetivos:** Avaliar e analisar o aproveitamento e aprendizagem dos conceitos abordados.

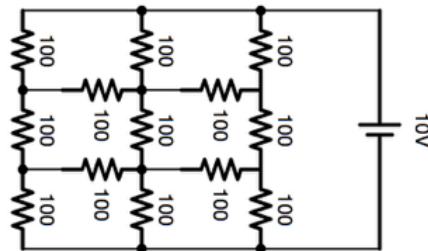
**Recursos:** Impresso de exercícios avaliativos, disposição de mesas em círculo.

**Desenvolvimento:** Neste último encontro, o professor poderá dialogar, discutir ou verificar com os alunos os exercícios sobre os temas abordados. É importante propiciar apropriados questionamentos com os discentes para ter informações sobre como e o quanto aprenderam com as aulas. Inferir o que pensam sobre o experimento e suas aplicações em nosso cotidiano, bem como suas primeiras impressões sobre o uso dos equipamentos eletrônicos e ferramentas matemáticas.

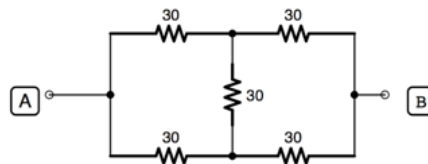
## Avaliação Final

### Modelo sugerido

1) Considerando a malha total da figura abaixo, o que acontece com o valor da corrente elétrica a medida que retiramos resistores?



2) Qual o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito abaixo? Você se lembra que circuito é esse?



3) Você notou alguma semelhança entre um sólido se quebrando e nosso modelo de desligamentos sucessivos de resistores na placa?

4) Você se lembra de algumas das causas das fraturas em sólidos?

5) Quando se diz que, o ouro é um metal extremamente dúctil, o significa isso?

6) Marque o local da escala usada para medir corrente elétrica no multímetro da figura abaixo.

7) Qual a vantagem e fazer gráficos no computador?

8) Depois de todas as aulas teóricas e práticas sobre os temas abordados, o que você aprendeu?



## 4. Considerações finais

No gráfico da Figura 3.37 é possível observar que em alguns pontos a corrente elétrica parece quase inalterada durante o processo de interrupção aleatória de componentes resistivos. A causa deste comportamento depende da forma em que foram rearranjados os resistores, neste caso uma rede quadrada na qual, lhe é imposto aos resistores verticais a ausência de correntes, isto é, uma diferença de potencial nula.

Os colegas docentes poderão também explorar as características que marcam a forma do gráfico na Figura 3.44, em particular o fato da curva ser muito semelhante a aquela obtida a partir dos dados experimentais nos ensaios de tensão-deformação em metais. Esta analogia é evidenciada pela linearidade do fenômeno físico, por um lado o sistema de resistores se comporta Ohmicamente enquanto que o outro comporta-se elasticamente de acordo com a lei de Hooke.

Outros aspectos importantes referem-se aos gráficos e resultados experimentais obtidos a partir do primeiro, em que, utilizamos uma equação a qual fornece valores de parâmetros físicos característicos. Isto mostra quão indispensável é o uso do computador na investigação e modelagem de sistemas físicos. Como também, uma aproximação entre o experimento de remoção de componentes em uma rede de resistores e os processos de rupturas em materiais sólidos.



## Bibliografia

- [1] S. AKHTAR and H. M. IRSHADULLAH, “**Teaching of Physics with Physics Suite on the Achievement of Secondary Students,**” *Dialogue (Paquistão)*, vol. 12. (Citado na página 5.)
- [2] B. K. CHAKRABARTI and BENGUIGUI, *Statistical physics of fracture and breakdown in disordered systems*, vol. 55. Oxford University Press, 1997. (Citado na página 6, 24, 29, 30, 31, 32, 34 e 35.)
- [3] P. DUXBURY and S. KIM, *Scaling theory of elasticity and fracture in disordered networks*, vol. 207. Cambridge University Press, 1990. (Citado na página 6.)
- [4] J. S. E. ORTIZ and e. a. RAJAPAKSE, “**Strength reduction in electrical and elastic networks,**” *Physical Review B*, vol. 66, no. 14, p. 144203, 2002. (Citado na página 6 e 37.)
- [5] T. S. KUHN, *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 2006. (Citado na página 7.)
- [6] A. T. BORGES, “**Novos rumos para o laboratório escolar de ciências,**” *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 19, no. 3, pp. 291–313, 2002. (Citado na página 7.)
- [7] D. P. AUSUBEL, “**Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva,**” *Tradução de Vitor Duarte Teodoro. Lisboa, Plátano*, vol. 1, 2003. (Citado na página 7.)
- [8] B. GANDHI, “**Mechanical Engineering and Strength of Material,**” Disponível em: <<http://www.nptel.ac.in/courses/112107146/1>>. Acesso em: 20 abr. 2017. (Citado na página 25.)
- [9] J. CALLISTER, *Ciência e engenharia dos materiais, Uma introdução. 9ª Edição*. Rio de Janeiro: LTC, 2016. (Citado na página 30 e 32.)
- [10] A. HANSEN and S. ROUX, “**Toolbox for damage and fracture,**” pp. 17–101, 2000. (Citado na página 31.)