

KENEDY ANTÔNIO DE FREITAS

ESTUDO EXPERIMENTAL DO MODELO ALEATÓRIO DE
FUSÍVEIS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

F866e
2007 Freitas, Kenedy Antonio, 1980-
Estudo experimental do modelo aleatório de fusíveis /
Kenedy Antonio Freitas. - Viçosa, MG, 2007.
ix, 70f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Marcos da Silva Couto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 69-70.

1. Física estatística. 2. Mecânica da fratura. I. Univer-
sidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 530.13

KENEDY ANTÔNIO DE FREITAS

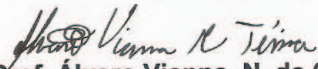
ESTUDO EXPERIMENTAL DO MODELO ALEATÓRIO DE FUSÍVEIS

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Física Aplicada,
para obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

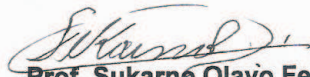
APROVADA: 20 de julho de 2007



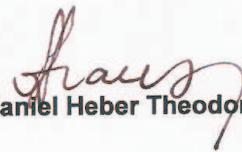
Prof. João Antônio Plascak



Prof. Álvaro Vianna N. de C. Teixeira



Prof. Sukarno Olavo Ferreira



Prof. Daniel Heber Theodoro Franco



**Prof. Marcos da Silva Couto
(Orientador)**

Aos meus pais,

Antônio Jerônimo de Freitas e

Eva das Graças B. de Freitas.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por ter me dado uma nova chance e também força e saúde, para que eu fosse capaz de desenvolver esse trabalho;
- A minha família, meu pai, minha mãe, minhas irmãs, minha sobrinha e aos cunhados pela amizade, carinho e compreensão;
- A minha querida namorada Renata que sempre esteve presente em todos os momentos bons e ruins nesta etapa da minha vida;
- Aos amigos: Daniel, Leandro, Fagner, Jefferson, Pablo, Júlio, Simão, e todos os outros que não esqueci, mas o espaço é insuficiente para citá-los;
- Aos professores Marcos da Silva Couto e Ismael Lima Menezes Sobrinho pela orientação e pelas dicas durante todo o trabalho;
- Aos professores e funcionários do Departamento de Física da UFV;
- Aos amigos da Equipe Psicopatas;
- A FAPEMIG pelo suporte financeiro;
- A Universidade Federal de Viçosa pela acolhida.

BIOGRAFIA

KENEDY ANTONIO DE FREITAS, filho de Eva das Graças B. de Freitas e Antônio Jerônimo de Freitas, nasceu em Visconde do Rio Branco, Minas Gerais, em 19 de junho de 1980. Em janeiro de 2005, concluiu o Bacharelado em Física pela Universidade Federal de Viçosa - MG. Em julho de 2007, obteve o título de Mestre em Física Aplicada na Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1 Introdução	1
2 Fraturas	5
2.1 Introdução	5
2.2 Fenomenologia do Processo de Fratura	7
2.3 Modelos de Fraturas	8
2.3.1 Modelo Aleatório de Fusíveis (RFM)	9
2.4 Investigação Experimental do Modelo de Fusíveis	14
3 Experimentos	21
3.1 Materiais e Métodos	21
3.2 Resultados e Discussão	26
3.2.1 Curvas $I \times V$	26
3.2.2 Curvas da resistência em função do tempo	52

3.2.3	Curvas do tempo de ruptura em função da corrente	56
3.2.4	Curvas da largura do perfil em função do tamanho da rede . . .	63
4	Conclusões e Perspectivas	66
4.1	Conclusões	66
4.2	Perspectivas	68
	Referências Bibliográficas	69

RESUMO

FREITAS, Kenedy Antônio de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2007. **Estudo experimental do modelo aleatório de fusíveis**. Orientador: Marcos da Silva Couto. Co-Orientadores: Ismael Lima Menezes Sobrinho e Sílvio da Costa Ferreira Júnior.

O objetivo deste trabalho é verificar, através de um estudo experimental do Modelo Aleatório de Fusíveis, como a orientação e a desordem da rede de fusíveis influenciam o processo de fratura da rede. Para a efetivação dos experimentos foi criado um circuito de tamanho $L \times L$, com as ligações entre os fusíveis orientadas à 45° da direção de aplicação da diferença de potencial. Foram utilizados dois tipos de fios como fusíveis: fios de cobre e fios de palha de aço. Os experimentos consistiram em aplicar uma diferença de potencial V na rede e medir a corrente I . Os resultados obtidos foram analisados com o objetivo de se determinar suas leis de escala quando a desordem ou o tamanho da rede eram variados. Concluiu-se com os resultados que mesmo para as redes totalmente desordenadas não foram observadas leis de escalas. Verificou-se ainda que para uma corrente fixa acima de certa corrente crítica, a resistência elétrica da rede aumenta como uma lei de potência do tempo e também que o tempo de ruptura da rede decai como uma lei logarítmica da corrente para valores

de corrente pouco acima da corrente crítica, ao passo que para valores de corrente muito acima da corrente crítica o tempo de ruptura decai como uma lei de potência.

ABSTRACT

FREITAS, Kenedy Antônio de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2007.
Experimental research of the random fuse model. Adviser: Marcos da Silva Couto. Co-Advisers: Ismael Lima Menezes Sobrinho and Sílvio da Costa Ferreira Júnior.

The objective of this work is to verify through an experimental research of the Random Fuse Model, how the orientation and disorder of the fuse network influence the process of fracture of a network. To execute the experiments a circuit of size $L \times L$ was created, with the connections among the fuses oriented by 45° with the direction of the applied potential difference. Two types of wires were used as fuses: copper wires and steel wool wires. The experiments consisted in applying a potential difference V in the network and to measure the current I . The results were analyzed with the objective of determining their scaling laws changing the disorder or the network size. It was concluded that even for the totally disordered networks scaling laws were not observed. It was verified that for a fixed current above a certain critical current the electric resistance of the network increases as a power law in time and also that the rupture time of the network decreases as a logarithmic law with the current for values slightly above the critical current, while for currents much larger than the critical current the rupture time decreases as a power law.

Capítulo 1

Introdução

A importância econômica e tecnológica do processo de fratura em materiais heterogêneos é suficiente para explicar o grande interesse de pesquisa neste campo. Um dos fatores determinantes do comportamento de fratura de um material é a presença da desordem, a qual é fundamental na dinâmica de propagação das trincas. Geralmente, quando se tem pouca desordem, o material rompe-se devido à formação de uma única trinca. Com o aumento da desordem surgem trincas pequenas e isoladas no material e a fusão destas trincas é responsável pela ruptura total da amostra. Os físicos estatísticos têm aplicado técnicas que são utilizadas em sistemas desordenados para estudar o fenômeno de fratura nesses materiais [1].

Uma das várias técnicas utilizadas para estudar sistemas desordenados, através de simulações computacionais, é a de se discretizar o sistema, i.e., considerá-lo uma rede e estudar o comportamento macroscópico dessa rede, verificando, por exemplo, o que ocorre quando se varia sua desordem. Diversos trabalhos foram realizados utilizando o modelo elástico [2–5] a fim de estudar o fenômeno de fraturas, mas uma outra simplificação que pode ser feita nestes estudos é considerar o análogo elétrico do

modelo elástico, i.e., substituir a força elástica pela corrente elétrica e o deslocamento pela tensão. Apesar das várias semelhanças entre estes modelos, uma importante diferença é o fato do deslocamento elástico ser vetorial e o potencial elétrico ser escalar, o que o torna conceitualmente e numericamente mais simples. Portanto, uma boa maneira de se estudar os processos de fraturas em materiais desordenados é através do modelo aleatório de fusíveis (RFM) [6–9], que, de um modo geral, consiste em uma rede quadrada com um fusível em cada sítio da rede, sujeito a um aumento da tensão externa aplicada.

A desordem na rede de fusíveis pode ser introduzida de diversas maneiras. Em uma simulação computacional, Arcangelis *et al.* [6] introduziram desordem via diluição, i.e., alguns fusíveis eram retirados antes do processo de ruptura se iniciar. Em um outro trabalho de simulação computacional [8], a desordem foi introduzida nas correntes críticas para a ruptura dos fusíveis, as quais eram escolhidas de acordo com uma distribuição de probabilidade. Como resultado deste trabalho dois tipos de regimes foram observados: um catastrófico, onde as correlações entre as trincas dominam o processo de fratura e uma grande trinca macroscópica linear forma-se rompendo a rede, e um outro regime controlado pela desordem inicial, onde a ruptura total da rede ocorre devido à fusão de trincas pequenas e isoladas.

Como no modelo aleatório de fusíveis a queima dos fusíveis é independente de uma escala de tempo, ou seja, o processo de ruptura da rede não possui qualquer dinâmica, sendo apenas um processo irreversível de ruptura, modelos térmicos de fusíveis foram propostos [10,11]. Nestes modelos um campo de temperatura é adicionado nos critérios de ruptura. Uma abordagem experimental do modelo térmico de

fusíveis foi realizada por Lamaignère *et al.* [12]. Dentre os resultados obtidos, mostrou-se o comportamento da resistência da rede em função do tempo e a dependência do tempo de ruptura em função da corrente aplicada.

Um primeiro trabalho experimental baseado nos modelos de Arcangelis e Herrmann e de Lamaignère *et al.* foi realizado por Otomar *et al.* [13,14], o qual consistia em uma rede quadrada onde fios de diferentes materiais eram soldados de forma a representarem fusíveis. Aplicava-se uma diferença de potencial nesta rede e registrava-se os valores da corrente. A diferença de potencial era aumentada até que a rede se rompia por completo, possibilitando estudar o processo de fratura e seu comportamento.

Em seu trabalho experimental Otomar *et al.* [13,14] obteve como conclusões que em sistemas com grande desordem, a corrente, a tensão e o tamanho da rede obedecem a uma determinada lei de escala. Outros resultados foram a existência de dois regimes dependentes do grau de desordem, e que o número total de fusíveis queimados e o comprimento médio da fratura obedeciam à leis de potência que dependiam do tamanho da rede.

Diferentemente da rede utilizada por Otomar *et al.* [13,14], no presente trabalho as conexões entre os fusíveis possuem uma inclinação de 45° em relação à direção de aplicação da diferença de potencial. A razão pela qual esta orientação dos fusíveis foi escolhida é devido a uma sugestão de um dos referees do trabalho de Otomar *et al.* [13]. A orientação utilizada por Otomar *et al.* tem a particularidade de que para uma rede completamente ordenada sem nenhum fusível queimado, não há corrente nos fusíveis paralelos à direção de aplicação da diferença de potencial. No entanto,

para a configuração escolhida neste trabalho, a corrente inicialmente é a mesma para todos os fusíveis e se torna diferente quando os fusíveis começam a queimar.

Nesta dissertação serão apresentados inicialmente uma revisão sobre fraturas e modelos de fraturas, com ênfase nos modelos aleatórios de fusíveis e também nos resultados de Otomar *et al.* [13,14] (capítulo 2). No capítulo 3 estão detalhados os materiais e métodos, bem como os resultados obtidos. No capítulo 4 são apresentadas as conclusões e perspectivas.

Capítulo 2

Fraturas

2.1 Introdução

A *fratura* consiste na separação completa de um sólido em duas ou mais partes, mediante a aplicação de tensões. O valor dessa tensão, bem como a forma e outras características da fratura resultante, dependem significativamente da desordem do material, de como aplicamos a tensão (tração, compressão, cisalhamento) e das condições externas como, por exemplo, a temperatura e a pressão.

Como o fenômeno de fratura é bem comum, uma maneira simples de entendê-lo é através do experimento de Young [1]. O experimento esquematizado na Fig. 2.1, consiste em submeter uma barra homogênea de comprimento L e área da seção reta w^2 a uma força \vec{F} na direção de seu comprimento. Como consequência da ação desta força, ocorre uma deformação dL no comprimento da barra e um estreitamento dw em sua largura.

Com os dados obtidos pela medição da força e usando a equação para tensão $\sigma = \frac{F}{w^2}$, obtém-se a curva mostrada na Fig. 2.2, que mostra como a tensão σ varia

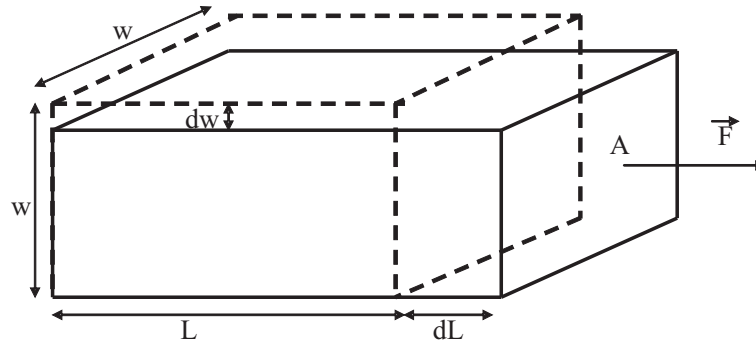


Figura 2.1: Experimento de Young.

com a elongação relativa $\delta = \frac{dL}{L}$.

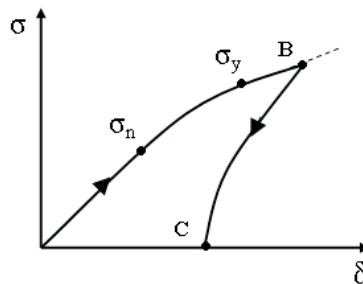


Figura 2.2: Diagrama da tensão *versus* elongação relativa.

Da Fig. 2.2 pode-se distinguir as seguintes situações: quando a deformação não é muito grande, a tensão é proporcional à elongação e, então, da origem até o ponto σ_n tem-se uma relação linear que obedece a lei de Hooke

$$\sigma = E\delta, \quad (2.1)$$

onde E é o módulo de Young. A tensão também pode ser escrita em função da razão de Poisson ν

$$\sigma = -\frac{E}{\nu} \frac{dw}{w} \quad (2.2)$$

O módulo de Young está associado a deformação longitudinal e à rigidez do

material. A razão de Poisson é um parâmetro que surge, porque além da deformação longitudinal, um material ao ser “esticado” sofre proporcionalmente uma deformação transversal. Isto ocorre porque a maior parte dos materiais resiste mais a uma mudança de volume do que a uma mudança de forma. Nesta região o processo é reversível, o material encontra-se no regime elástico, ou seja, retirando-se a força nele aplicada ele volta à condição inicial.

De σ_n até σ_y a relação não é mais linear, mas ainda se tem reversibilidade, ou seja, se retirarmos a força, o material volta à sua condição inicial. Acima de σ_y , por exemplo, no ponto B o material entra no regime plástico, perdendo a reversibilidade, ou seja, quando a força é retirada ele não volta à condição inicial, ocasionando uma deformação plástica representada pelo segmento BC.

2.2 Fenomenologia do Processo de Fratura

O processo de fratura pode ser considerado como constituído de duas partes: início da trinca e propagação da trinca. Analisando a Fig. 2.2 podemos classificar a fratura em duas categorias gerais, uma quando o material rompe para uma tensão menor que σ_y , denominada fratura frágil, e outra quando o material rompe para uma tensão maior que σ_y , denominada fratura dúctil. Não existe uma característica específica para o tipo de fratura de um material porque a desordem do material e as condições externas, tais como temperatura e pressão, influenciam fortemente no processo.

Desordem é um conceito muito amplo, que depende de fatores tais como a escala em que se analisa o material, se a desordem é intrínseca ou se foi introduzida

no material, entre outros. A influência do grau de desordem no processo de fratura, faz surgir dois comportamentos distintos como foi classificado acima pela análise da Fig. 2.2. O comportamento denominado de fratura frágil é observado para pouca desordem e é caracterizado por um rápido rompimento do material, separação perpendicular à tensão, não apresentar deformação macroscópica e apresentar pouca micro deformação, ocorrendo a baixas temperaturas ou para uma alta taxa de deformação. O comportamento de fratura dúctil ocorre para uma maior desordem e possui como características: um rompimento lento do material com considerável gasto de energia, uma apreciável deformação plástica, antes e durante a propagação da trinca, ocorrendo a altas temperaturas ou a baixas taxas de deformação.

2.3 Modelos de Fraturas

Vários modelos têm tentado explicar o processo de fraturas em materiais desordenados [4,8,9,15–17]. Estes modelos utilizam como simplificação para o estudo do comportamento do processo de fraturas a discretização do material, i.e., consideram o material como uma rede, onde cada ponto representa uma parte do material e suas características elásticas e de fratura tornam-se mais simples e descritas por poucos parâmetros.

Dentre os modelos mais utilizados estão o modelo de fibras e o modelo aleatório de fusíveis. O modelo de fibras ou elástico [2–5], é constituído de um conjunto de N fibras paralelas submetidas a uma força uniaxial. Essas fibras podem estar dispostas em uma rede unidimensional ou bidimensional, onde inicialmente todas estão na posição de equilíbrio e a cada instante de tempo elas sofrem uma deformação aplicada por uma

força externa, em geral igual para todas. O rompimento de uma fibra ocorre quando a deformação aplicada nela é maior que o limite de deformação que a fibra pode suportar, sendo este limite calculado através de uma dada distribuição de probabilidade. O processo de fratura continua desta forma até a ruptura total da rede.

Outra simplificação que pode ser feita é considerar o análogo elétrico do modelo elástico, substituindo a força elástica pela corrente elétrica, I , e o deslocamento pela tensão elétrica, V . Eletricidade e elasticidade possuem várias propriedades em comum, por exemplo, a lei de Ohm e a lei de Hooke (Fig. 2.3), mas também possuem uma importante diferença: o fato de o deslocamento elástico ser vetorial e o potencial elétrico ser escalar. É justamente a natureza escalar do potencial elétrico que o torna conceitualmente e numericamente mais simples.

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{F} = \mathbf{k} \mathbf{x} \\
 \updownarrow \quad \updownarrow \quad \updownarrow \\
 I = \frac{1}{R} V
 \end{array}$$

Figura 2.3: Comparação entre a Lei de Hooke e a Lei de Ohm.

Com base nesta analogia o modelo aleatório de fusíveis será descrito com mais detalhes na subseção seguinte.

2.3.1 Modelo Aleatório de Fusíveis (RFM)

De um modo geral, este modelo consiste em uma rede quadrada com um fusível em cada ponto da rede, sujeita a um aumento da tensão aplicada. Existem vários trabalhos que utilizam este modelo. Numa simulação computacional, Arcangelis *et*

al. [6], estudaram uma rede onde todos os fusíveis possuíam características idênticas e a desordem foi introduzida via diluição, i.e., alguns fusíveis foram removidos antes do início do processo de fratura. Em um outro trabalho de simulação computacional, Arcangelis e Herrmann [8] estudaram uma rede com todos os fusíveis tendo as mesmas características e a desordem estava contida nos limites de corrente suportada por cada fusível, os quais eram escolhidos aleatoriamente de acordo com uma distribuição de probabilidade. Neste trabalho foram observados dois tipos de regime: um regime catastrófico, onde as correlações entre as trincas dominam o processo e uma grande trinca macroscópica linear forma-se para promover a ruptura final da rede, e um segundo regime controlado pela desordem inicial, onde a corrente aumenta monotonicamente com a tensão aplicada e a ruptura da rede é devido à fusão de pequenas trincas isoladas que enfraquecem o sistema. O primeiro regime é característico de fratura frágil e o segundo de fratura dúctil. Para verificar a relação de escala entre a tensão e a corrente, em função do tamanho da rede para as distribuições de probabilidades utilizadas, Arcangelis e Herrmann colapsaram as curvas da corrente em função da tensão elétrica para diferentes tamanhos de rede. Somente no segundo regime a corrente I , a tensão V e o tamanho da rede L obedeceram à seguinte lei de escala:

$$I = L^\alpha (VL^{-\beta}). \quad (2.3)$$

Os expoentes encontrados foram $\alpha \sim 0,90$ e $\beta \sim 0,84$ com 5% de precisão. Dentro dos erros esses resultados são universais independentemente da distribuição utilizada.

Modelos aleatórios de fusíveis também foram investigados em duas [17–19] e

três dimensões [20,21] para calcular o expoente de rugosidade de superfícies de fraturas de materiais desordenados.

No modelo aleatório de fusíveis a queima dos fusíveis não depende de um estado anterior do sistema, i.e., ele não tem memória e, portanto o processo de ruptura da rede não possui qualquer dinâmica, mas somente um processo irreversível de ruptura sem qualquer escala de tempo. Desta forma com o intuito de estudar o aspecto dinâmico envolvido no processo de fratura de um material desordenado o modelo térmico de fusíveis [10, 11] foi proposto. Neste modelo um campo de temperatura é adicionado nos critérios de ruptura.

O modelo térmico de fusíveis foi experimentalmente investigado por Lamaignère [12]. Neste trabalho foi estudado o colapso elétrico de um compósito partícula-polímero. Esses compósitos eram formados de uma matriz de polímero isolante e de partículas condutoras. O contato entre as partículas condutoras evoluía devido à expansão térmica da matriz em consequência do aquecimento por efeito Joule causado pela corrente aplicada. Dentre os resultados obtidos neste trabalho, mostrou-se o comportamento da resistência R em função do tempo t (Fig. 2.4) onde se utilizou a seguinte lei de potência para encontrar o melhor ajuste dos dados:

$$R \propto (t_r - t)^{-\alpha}, \quad (2.4)$$

onde t_r é o tempo de ruptura da rede e α é um expoente que descreve como a resistência tende ao infinito quando $t \rightarrow t_r$. O melhor ajuste foi obtido com $\alpha \simeq 0,65$.

Outro resultado encontrado foi a dependência do tempo necessário para o com-

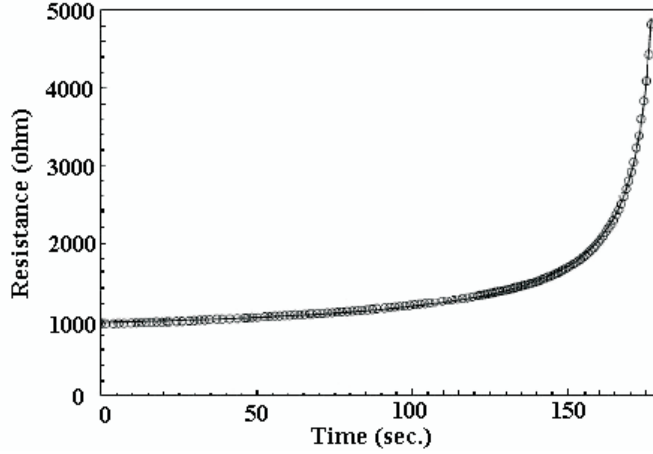


Figura 2.4: Gráfico da resistência da rede em função do tempo. Os pontos são os dados experimentais e a linha contínua representa o melhor ajuste [12].

pleto rompimento da rede em função da corrente aplicada (Fig. 2.5). Os ajustes realizados por Lamaignère [12] para estes experimentos foram feitos através da relação,

$$t_r = -\frac{1}{a} \log(1 - kI^{-b}), \quad (2.5)$$

onde os parâmetros a , k e b são ajustáveis. Nestes experimentos esperava-se que o expoente b fosse o mais próximo de dois para descrever, conseqüentemente, o efeito Joule.

Em um trabalho de simulação computacional realizado por Hansen *et al.* [17], foi verificado o comportamento da largura das trincas, w , em função do tamanho L da rede, para o modelo de fusíveis. Foi utilizada uma rede quadrada orientada a 45° em relação às bordas, separadas por uma distância de $\frac{L}{\sqrt{2}}$, e assumiu-se condições de contorno periódicas perpendiculares às duas bordas, nas quais eram aplicadas a diferença de potencial. Foram utilizadas redes de tamanhos $L = 5, 10, 15, 20, 30$ e 40 . A desordem foi introduzida assumindo que a corrente máxima suportada por cada

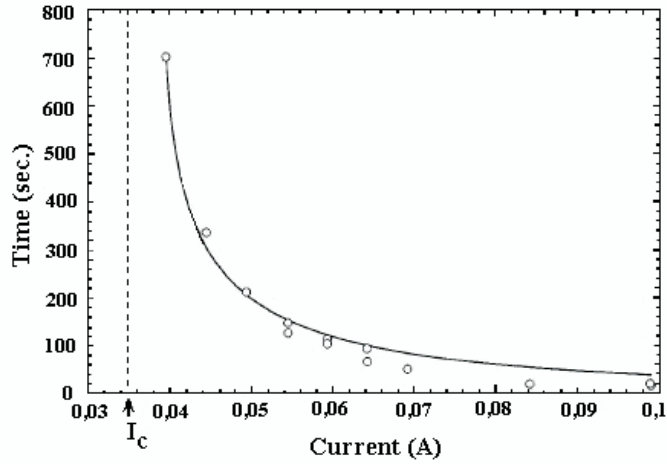


Figura 2.5: Gráfico do tempo para ruptura da rede em função da corrente aplicada. A linha contínua representa o melhor ajuste [12].

fusível obedecia uma distribuição estatística não correlacionada espacialmente.

Verificou-se que a largura w do caminho criado pela ruptura da rede e o tamanho L desta escalam de acordo com a relação:

$$w \sim L^\zeta, \quad (2.6)$$

onde w foi obtido através da expressão: $w^2 = \langle y_i^2 \rangle - \langle y_i \rangle^2$, onde y_i é a coordenada perpendicular à borda da rede para o fusível i , pertencente a região de ruptura. A Fig. 2.6 mostra a relação de w em função de L para vários tipos de distribuições utilizados.

Como resultado, Hansen *et al.* observaram dois comportamentos para o expoente ζ , um para pouca desordem presente na rede, no qual o valor encontrado para o expoente foi $\zeta \simeq 0,75$, e um segundo comportamento, para maior desordem presente na rede para o qual $\zeta \simeq 0,81$. Hansen *et al.* concluíram que o valor do expoente ζ depende do grau de desordem presente no sistema.

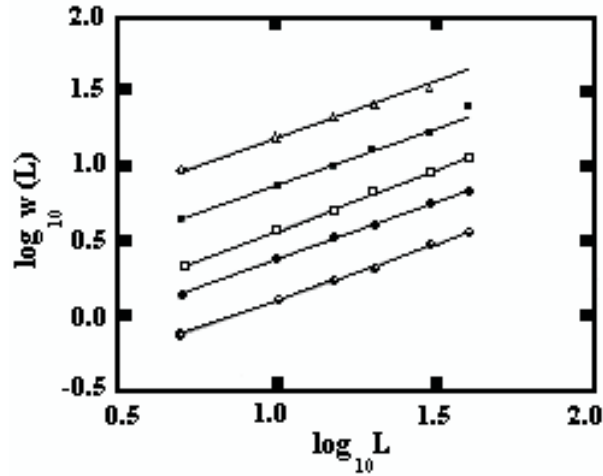


Figura 2.6: Curvas de $w \times L$ para várias distribuições, do modelo proposto por Hansen *et al.* [17].

2.4 Investigação Experimental do Modelo de Fusíveis

Um trabalho experimental baseado nos trabalhos supracitados foi realizado por Otomar *et al.* [13]. Esta seção será dedicada a um detalhamento de seus experimentos e resultados.

Em seu trabalho Otomar *et al.* utilizou uma placa de circuito impresso de tamanho $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Esta placa foi dividida em pequenas regiões quadradas de $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ através das quais os fusíveis eram soldados. Duas barras condutoras foram fixadas nas extremidades desta placa e através delas uma diferença de potencial era aplicada, conforme esquema representativo da Fig. 2.7.

Foram utilizados dois tipos de fios condutores: cobre e palha de aço. As redes utilizadas possuíam os seguintes tamanhos $L = 7, 14, 20$ e 28 . Neste trabalho redes formadas somente por fios de cobre de comprimentos e seção transversal iguais eram consideradas totalmente ordenada. Duas maneiras de se alterar a desordem do sistema

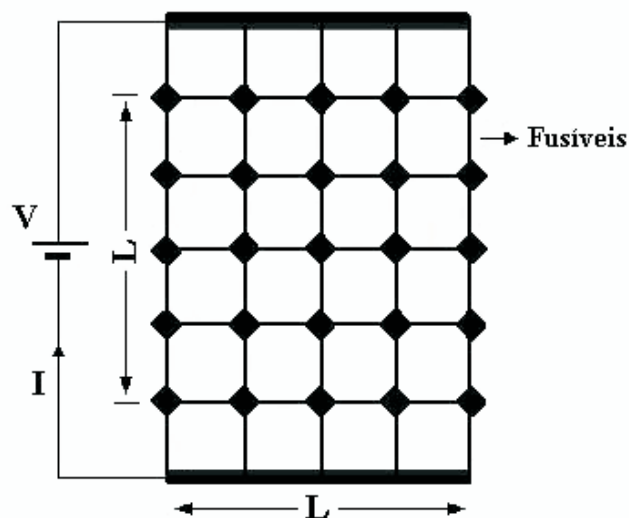


Figura 2.7: Representação esquemática da rede de fusíveis [13].

foram empregadas. Para sistemas compostos somente por fios de cobre, a desordem era alterada pela substituição de alguns fios por dois, três ou quatro fios conectados em paralelo e por fios de comprimento diferentes, inseridos na rede através de uma escolha aleatória. Outra maneira era a substituição aleatória de alguns fios de cobre por fios de palha de aço. A porcentagem de fios substituídos na rede representava o grau de desordem da mesma.

Os experimentos consistiam em aplicar uma diferença de potencial na rede e alterar o valor aplicado em passos de 0,10 V, registrando-se a corrente total através da rede.

A fim de determinar a influência da desordem sobre o processo de fratura, Otomar *et al.*, verificou as funções características $I \times V$ medidas para desordem variando de 0% a 100% para uma rede de tamanho $L = 28$ composta somente por fios de cobre. A Fig. 2.8 mostra a curva $I \times V$ para várias desordens.

Baseado nos dados obtidos pela curva da corrente máxima média $\langle I_{max} \rangle$

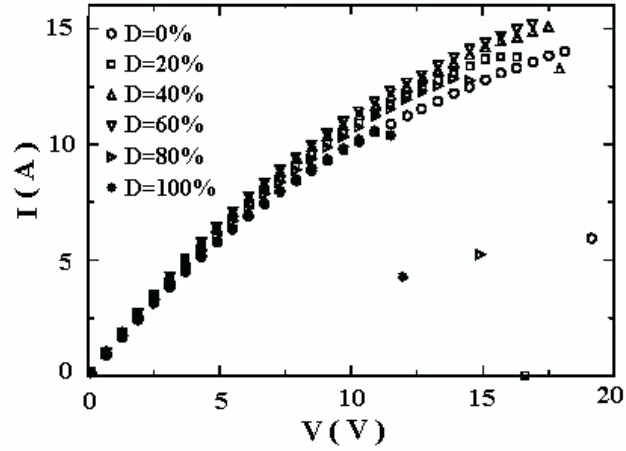


Figura 2.8: Função característica $I \times V$ medida para vários graus de desordem em uma rede composta somente por fios de cobre [13].

suportada pela rede em função da desordem D para certo tamanho de rede (Fig. 2.9)

Otomar *et al.* obteve dois regimes distintos: um para $D < 60\%$ e outro para $D > 60\%$.

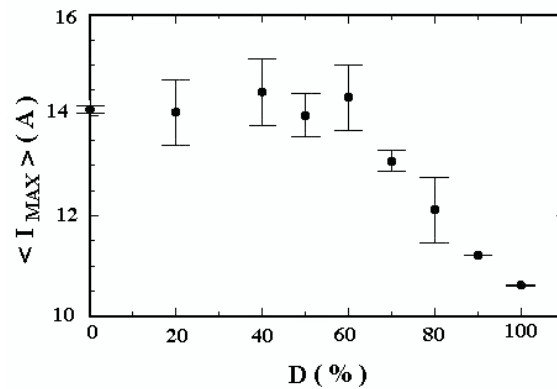


Figura 2.9: Corrente máxima média em função da desordem para a rede de tamanho $L = 28$ [13].

Para $D < 60\%$, o regime possui características de fratura frágil, pois, foi observado que a ruptura da rede é devido a uma única trinca que a percorre rapidamente. Algumas características encontradas neste regime são a independência do grau de desordem para o processo de fratura e a $\langle I_{max} \rangle$ manter-se aproximadamente constante

com o aumento da desordem. Para $D > 60\%$ o processo de fratura é similar ao regime dúctil, pois ocorre lentamente, onde pequenas trincas isoladas aparecem inicialmente, diminuindo o valor da corrente total na rede. Este processo continua sucessivamente até que ocorre a fusão destas trincas e uma grande trinca surge rompendo a rede. Uma característica deste regime é que o processo de fratura é controlado pela desordem.

A Fig. 2.10 mostra a tentativa de colapso da função $I \times V$ para diferentes tamanhos de rede onde somente fios de cobre foram usados. Para o colapso das curvas, Otomar *et al.* utilizou a relação de escala (2.3) sugerida por Arcangelis e Herrmann [8] e considerou somente dois graus de desordem, $D = 0\%$ e $D = 100\%$.

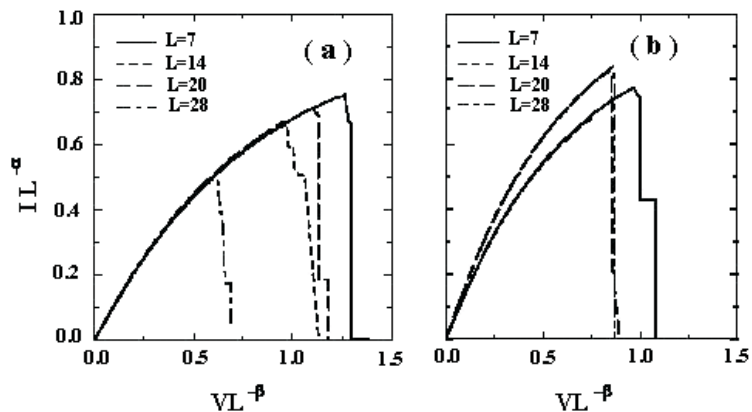


Figura 2.10: Gráfico da relação de escala $IL^{-\alpha} \times VL^{-\beta}$ para redes de fios de cobre. (a) Para $D = 100\%$. (b) Para $D = 0\%$ [13].

Para $D = 0\%$ não foi possível o colapso de todas as curvas simultaneamente, o que ocorreu foi um agrupamento das curvas duas a duas, com as redes de tamanho $L = 7$ e $L = 14$ em um grupo e $L = 20$ e $L = 28$ em outro. Somente no regime fortemente desordenado ($D = 100\%$) os dados obedeceram à relação de escala (2.3).

O mesmo procedimento acima foi realizado para diferentes tamanhos de redes que continham somente fios de palha de aço, Fig. 2.11.

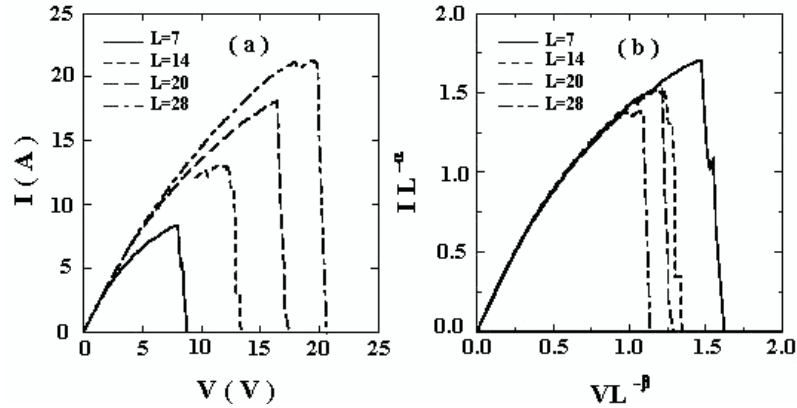


Figura 2.11: Resultados obtidos para redes de fios de palha de aço. (a) Curva da função $I(V)$. (b) Relação de escala $IL^{-\alpha} \times VL^{-\beta}$ [13].

Os resultados obtidos indicaram que as curvas $I(V)$ não dependiam do tipo de material embora dependiam da desordem da rede, porque, obteve-se o colapso para $D = 100\%$ (somente fios de cobre) e para a rede formada somente por fios de palha de aço, cuja desordem é $D = 100\%$. Outro resultado sugerido por Otomar neste trabalho, é uma dependência do expoente α com o tipo de material utilizado. Para a rede composta somente por fios de cobre os valores dos expoentes são $\alpha = 0,92$ e $\beta = 0,87$, para a rede composta somente por fios de palha de aço $\alpha = 0,82$ e $\beta = 0,87$. Vale ressaltar que o mesmo comportamento foi encontrado por Arcangelis e Herrmann [8].

Neste trabalho também relacionou-se o número médio de fusíveis queimados, $\langle n \rangle$, ao fim do processo de fratura em função do tamanho L da rede. Foram consideradas duas desordens, como mostrado na Fig. 2.12.

Para $D = 100\%$ (somente fusíveis de palha de aço), o expoente encontrado para a relação de escala entre $\langle n \rangle$ e L foi $1,14 \pm 0,03$, indicando que a relação não é linear. Neste caso a ruptura da rede ocorreu devido à fusão de pequenas trincas, caracterizando um regime dúctil. Já para $D = 0\%$ o expoente encontrado para a relação

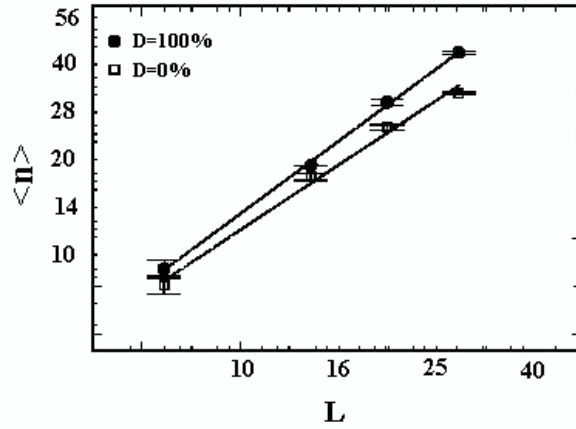


Figura 2.12: Número médio de fusíveis queimados em função do tamanho da rede [13].

entre $\langle n \rangle$ e L foi $1,02 \pm 0,04$, um valor aproximadamente linear e a ruptura da rede ocorreu por uma única trinca, caracterizando um regime frágil, como observado também nas referências [1, 8].

Em sua dissertação de mestrado Otomar [14], apresentou alguns resultados para a rede de tamanho $L = 28$ formada inicialmente por fios de cobre, cuja desordem foi introduzida soldando-se fios de palha de aço até formar uma rede totalmente desordenada, composta somente por fios de palha de aço, tal como no presente trabalho.

Um destes resultados é a curva de $\langle I_{max} \rangle$ suportada pela rede em função da desordem D (Fig. 2.13). Observou-se nesta rede uma queda no valor de $\langle I_{max} \rangle$ partindo de $D = 100\%$ até $D = 20\%$, e de $D = 20\%$ até $D = 0\%$ $\langle I_{max} \rangle$ voltou a aumentar. Concluiu-se que a queda de $\langle I_{max} \rangle$ ocorreu porque ao se diminuir a desordem a partir de $D = 100\%$ mais fios de cobre estavam presentes na rede, e como os fios de cobre possuem uma resistividade menor que a dos os fios de palha de aço, logo, para uma mesma diferença de potencial, a corrente necessária para rompê-los era menor. O aumento de $\langle I_{max} \rangle$ a partir de $D = 20\%$ ocorreu porque havia uma

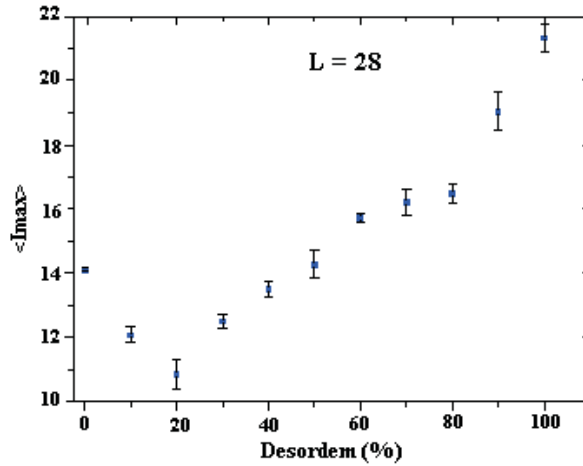


Figura 2.13: Corrente máxima média em função da desordem para a rede de tamanho $L = 28$ [14].

maior presença de fios de cobre na rede, tornando-a predominantemente ordenada, fazendo com que $\langle I_{max} \rangle$ voltasse a aumentar.

Outro resultado apresentado foi $\langle n \rangle$ em função da desordem D (Fig. 2.14).

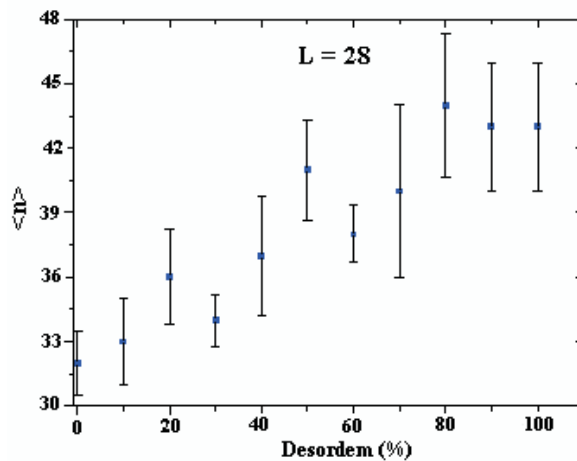


Figura 2.14: Número médio de fusíveis queimados em função da desordem para a rede de tamanho $L = 28$ [14].

Neste resultado foi observado que $\langle n \rangle$ aumentou com o aumento da desordem. Isto ocorreu porque à medida que aumentava-se a desordem, a rede exibia características de fraturas ductéis, i.e., a trinca principal tornava-se cada vez mais sinuosa.

Capítulo 3

Experimentos

3.1 Materiais e Métodos

Para realizar os experimentos desta dissertação, criou-se um circuito utilizando chapas quadradas de cobre com 1 cm de lado e 1 mm de espessura dispostas sobre uma placa de madeira de forma a permitir que os os contatos elétricos dos fusíveis estivessem orientados a 45° em relação à direção de aplicação da diferença de potencial. Estes contatos elétricos foram feitos colocando-se pontos de solda nas extremidades de cada chapa de cobre. Para uma melhor visualização dos fios pintou-se de branco a região entre as chapas de cobre. Detalhes da montagem deste circuito são mostrado na Fig. 3.1.

Neste trabalho foram utilizados como fusíveis dois tipos de fios: fios de cobre e fios de palha de aço. Os fios de cobre possuíam resistividade $\rho = 1,69 \times 10^{-8} \Omega m$ e diâmetro de 0,031 mm. Os fios de palha de aço possuíam resistividade ρ entre $14 \times 10^{-8} \Omega m$ e $22 \times 10^{-8} \Omega m$ e diâmetros variados. Os fios de cobre foram todos cortados com o mesmo comprimento de 2 cm, enquanto os fios de palha de

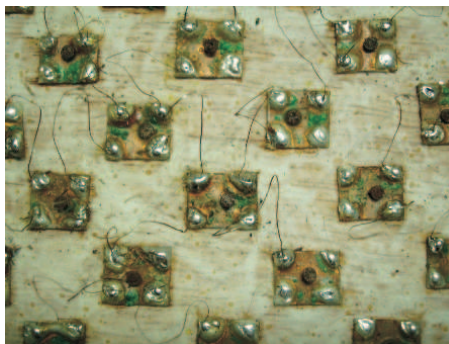
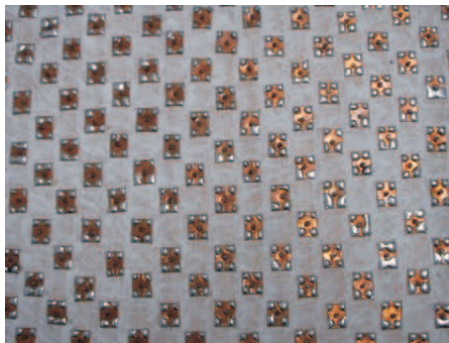
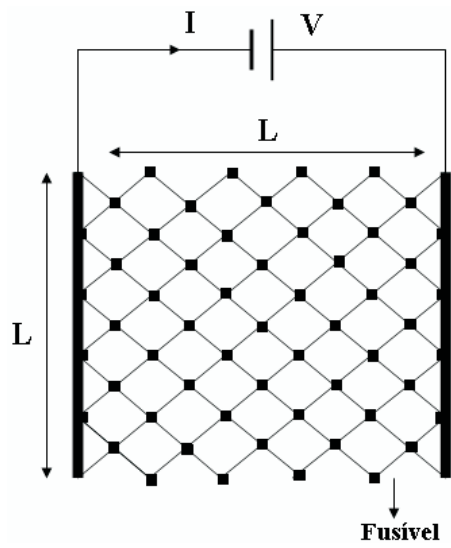


Figura 3.1: Detalhes do circuito utilizado. (a) Representação esquemática da rede. (b) Foto parcial da montagem do circuito. (c) Detalhe dos contatos elétricos.

aço possuíam comprimentos variados.

No processo de soldagem dos fios de cobre, os quais possuíam uma camada de esmalte que não permitia a realização dos contatos elétricos, era necessário o uso de uma pasta para soldar que retirava o esmalte e permitia a efetivação dos contatos elétricos. Dessa forma colocava-se a pasta sobre um dos pontos de solda nas extremidades da chapa de cobre e com o soldador já aquecido fixava-se uma das pontas do fio de cobre neste ponto de solda. A outra ponta do fio de cobre sofria o mesmo processo só que era fixada na extremidade de outra chapa de cobre, criando um fusível. Tomou-se o cuidado de que as pontas dos fios soldados nas chapas de cobre fossem sempre do mesmo tamanho. Procedeu-se desta forma até que todos os fusíveis da rede fossem soldados. Para os fios de palha de aço o processo de soldagem não exigia a utilização da pasta para soldar, pois os mesmos não eram esmaltados.

Uma observação no processo de soldagem é o uso de equipamentos de segurança, neste caso, foram utilizados um respirador $\frac{1}{4}$ facial com filtro combinado Químico Classe 1 e Mecânico Classe P2 e óculos. Este cuidado foi necessário devido às substâncias contidas tanto na solda (chumbo e estanho) quanto na pasta para soldar (cloreto de zinco e amônia), que são nocivas à saúde.

Os tamanhos de redes utilizados neste trabalho foram $L = 7, 14, 20$ e 28 , e as desordens variavam de 0% a 100% de 10% em 10% para todos os tamanhos de rede. Para as redes cuja desordem era $D = 0\%$ utilizava-se somente fios de cobre como fusíveis. Para se variar a desordem introduzia-se na rede fios de palha de aço na proporção em porcentagem do número total de fusíveis da rede, por exemplo, para a rede $L = 20$, o número total de fusíveis é 1600 , se a rede possui uma desordem $D =$

10%, o número de fios de palha de aço nesta rede é 160. As posições para a introdução da desordem eram escolhidas através de uma função aleatória que sorteava posições na vertical e na horizontal formando assim, um contato, no qual o fusível era soldado. Esta função foi feita através de um algoritmo escrito no programa Mathematica 5.0.

Para as redes cuja desordem era $D = 100\%$, somente fios de palha de aço eram utilizados. A vantagem de utilizar fios de palha de aço para gerar a desordem é que eles são heterogêneos viabilizando, com efeito, construções de redes desordenadas.

Foram realizados três tipos distintos de experimentos, um com a finalidade de obter as curvas características $I \times V$ para os diferentes tamanhos de redes e suas desordens, outro para verificar a resistência da rede em função do tempo quando uma corrente fixa era aplicada e um terceiro para verificar o tempo que a rede levava para romper-se por aquecimento em função da corrente aplicada.

Os experimentos de um modo geral procediam da seguinte maneira: definia-se o tamanho e a desordem da rede e soldavam-se todos os fusíveis. Após isso, a rede era submetida a uma diferença de potencial V obtida através de uma fonte de alimentação modelo FA-2030 (Instrutherm). Para registrar os valores da tensão e da corrente foram usados dois multímetros digitais modelo MD-320 (Instrutherm). A resistência dos cabos utilizados para conectar a fonte à rede e aos multímetros era $R = 0,03 \Omega$. Foi utilizada também uma câmera Sanyo Color CCD ligada a um monitor de vídeo e a um vídeo cassete Panasonic S-VHS AG-1970 Pro-Line. A câmera filmava os multímetros durante todo o experimento com o intuito de registrar os valores da tensão e da corrente porque no limiar de ruptura não era possível anotar os valores destas grandezas sem a utilização do recurso quadro a quadro do vídeo cassete. A

Fig. 3.2 ilustra o aparato experimental utilizado.



Figura 3.2: Equipamentos utilizados nos experimentos.

Para as medidas das curvas $I \times V$, os dados coletados foram obtidos variando-se a tensão em passos de 0,10 V, com um intervalo de relaxação a cada passo de, em média, seis segundos. O intervalo de relaxação era necessário para a estabilização da corrente. Este processo prosseguia até a ruptura total da rede. Para assegurar a reprodutibilidade dos dados foram realizadas cinco amostras para todos os tamanhos de rede e desordens utilizadas. Vale ressaltar que para repetir os experimentos era necessário refazer todas as ligações rompidas e para evitar uma mudança na desordem da rede e manter um caráter de igualdade entre as novas ligações e as antigas, antes de se iniciar o experimento, circulava-se uma corrente na rede até quase o ponto de início de ruptura. Com este procedimento tentava-se assegurar às novas ligações as mesmas características das ligações que se queimaram, como por exemplo, a oxidação.

As medidas da resistência da rede em função do tempo também foram feitas através de cinco amostras para cada tamanho de rede e desordem utilizada, isto para

assegurar a reprodutibilidade dos dados. Estes experimentos foram feitos fixando-se um certo valor de tensão na rede. Com o passar do tempo, à medida que a rede era aquecida, o número de fusíveis queimados tornava-se cada vez maior e conseqüentemente a resistência da rede também aumentava. Esse processo continuava até que, finalmente, a rede estivesse totalmente rompida. Neste ponto a resistência da rede era infinita.

Com o intuito de se verificar o tempo que a rede levava para romper-se por aquecimento em função da corrente aplicada na rede, foram realizados experimentos onde aplicava-se um certo valor de corrente, próximo ao valor de ruptura, medindo-se o tempo gasto para a ruptura da rede. Para a realização desses experimentos era necessário circular uma corrente próxima do valor de ruptura antes do início do experimento para evitar flutuações na corrente de ruptura. A seguir a corrente era abaixada para o valor escolhido para a realização do experimento.

Os resultados obtidos com estes experimentos serão apresentados e discutidos na seção seguinte.

3.2 Resultados e Discussão

3.2.1 Curvas $I \times V$

Os experimentos para obtenção das curvas características $I \times V$, foram realizados seguindo uma ordem crescente de tamanho de rede e de desordem, ou seja, iniciou-se com uma rede de tamanho $L = 7$, com desordem $D = 0\%$ e variou-se a desordem até $D = 100\%$ de 10% em 10% . Seguiu-se este mesmo procedimento para

todos os outros tamanhos de rede ($L = 14, 20, 28$). Foram feitas cinco amostras para cada tamanho de rede e desordem, um exemplo destas repetições para a rede de tamanho $L = 28$ e desordem $D = 100\%$ é mostrado na Fig. 3.3.

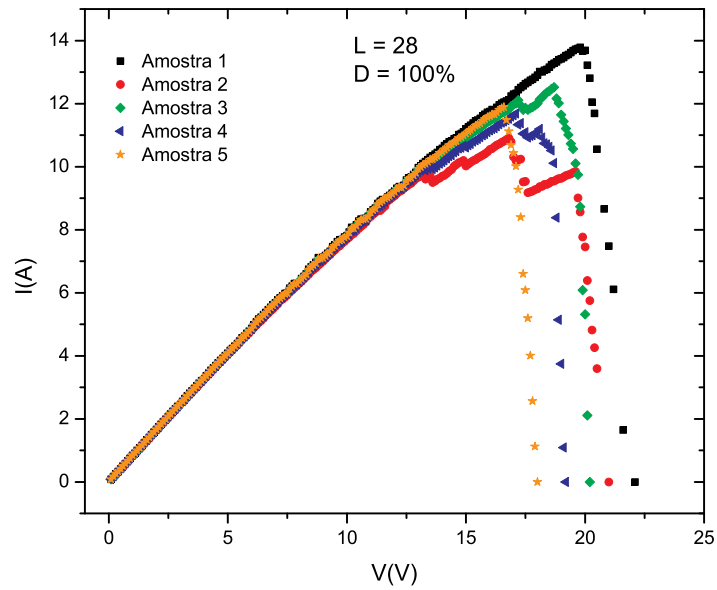


Figura 3.3: Curvas $I \times V$ para a rede com $L = 28$ e desorden de 100%.

Os gráficos $I \times V$ para as respectivas redes e suas desordens são mostrados nas Figs. 3.4 a 3.7.

Com o objetivo de verificar as leis de escala para as curvas características $I \times V$ em relação à desordem das redes, tentou-se o colapso das mesmas. A função utilizada para tentar o colapso foi:

$$I \sim (1 + D)^{-\eta} f(V(1 + D)^\nu) \quad (3.1)$$

onde η e ν são dois parâmetros ajustáveis.

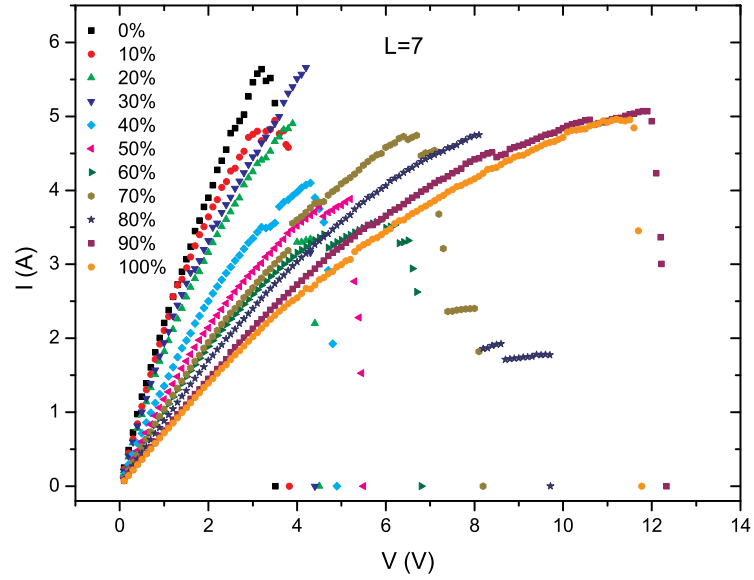


Figura 3.4: Curvas $I \times V$ para a rede com $L = 7$ e desordens de 0% a 100%.

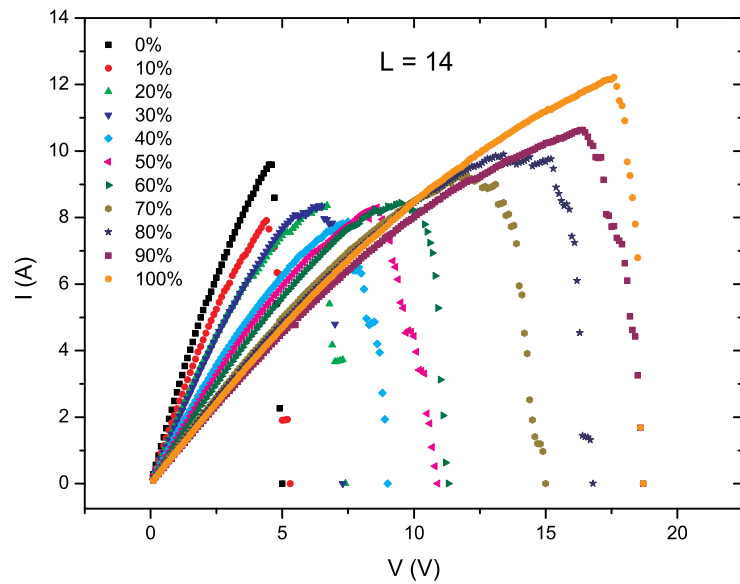


Figura 3.5: Curvas $I \times V$ para a rede com $L = 14$ e desordens de 0% a 100%.

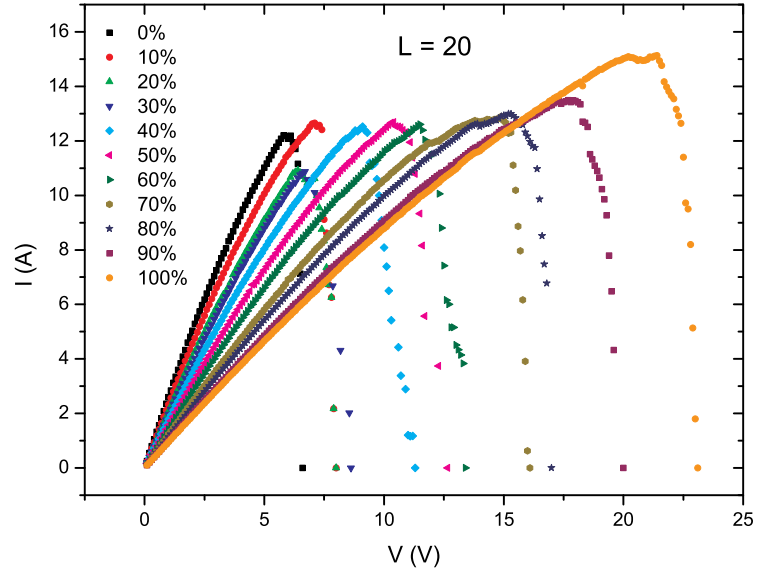


Figura 3.6: Curvas $I \times V$ para a rede com $L = 20$ e desordens de 0% a 100%.

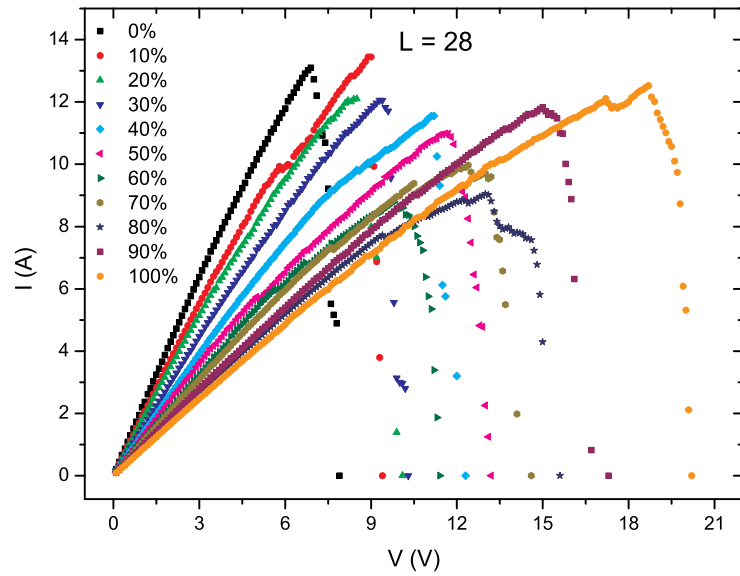


Figura 3.7: Curvas $I \times V$ para a rede com $L = 28$ e desordens de 0% a 100%.

O colapso simultâneo das curvas para todas as desordens para as redes de tamanhos $L = 7$ e $L = 28$ não foi possível, porém, estas redes apresentaram o mesmo comportamento, no qual as curvas se dividiram em três grupos como mostrado nas Figs. 3.8 e 3.9. Para a rede de tamanho $L = 7$, as curvas agrupadas foram, $D = 0\%$ até $D = 20\%$, $D = 30\%$ até $D = 60\%$ e $D = 70\%$ até $D = 100\%$. Para a rede de tamanho $L = 28$, as curvas agrupadas foram, $D = 0\%$ até $D = 40\%$, $D = 50\%$ até $D = 70\%$ e $D = 80\%$ até $D = 100\%$.

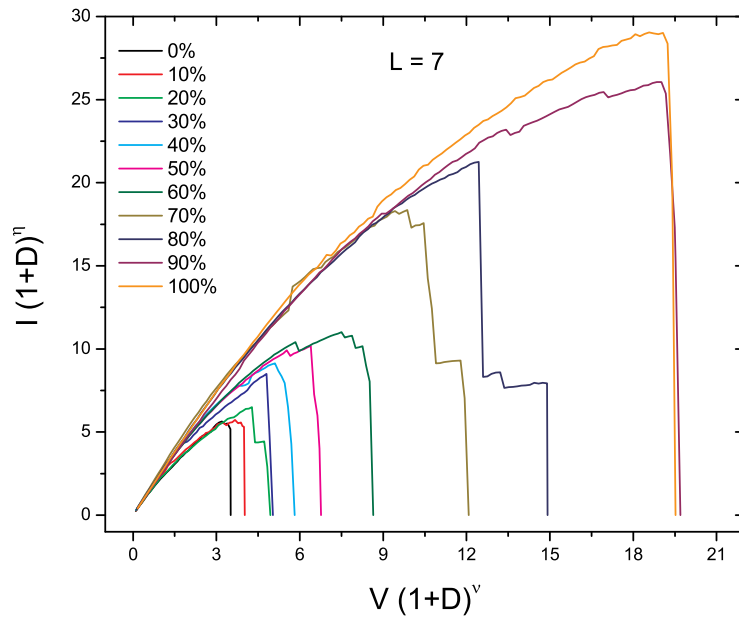


Figura 3.8: Colapso das curvas $I \times V$ para a rede com $L = 7$ e desordens de 0% a 100%.

Para a rede de tamanho $L = 7$ as curvas de $D = 0\%$ até $D = 20\%$, o perfil das fraturas foi formado por uma única trinca (Fig. 3.10(a)). Para $D = 30\%$ até $D = 60\%$ ainda se tinha o perfil formado por uma única trinca, no entanto este perfil apresentou um formato mais sinuoso (Fig. 3.10(b)). Para $D = 70\%$ a $D = 100\%$,

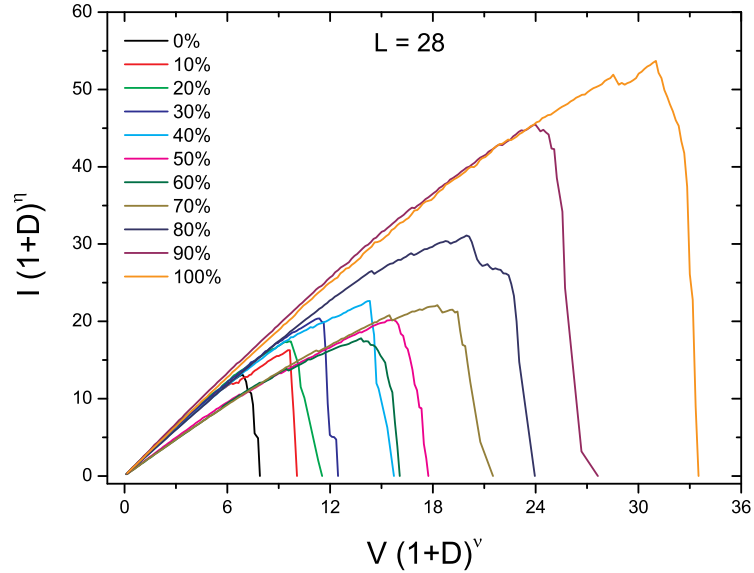
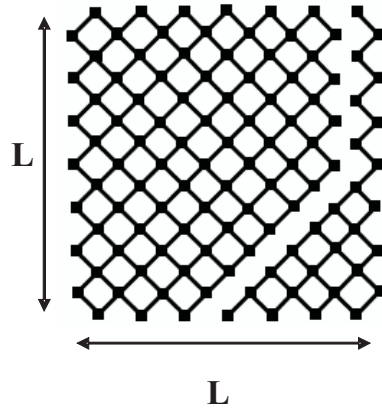


Figura 3.9: Colapso das curvas $I \times V$ para a rede com $L = 28$ e desordens de 0% a 100%.

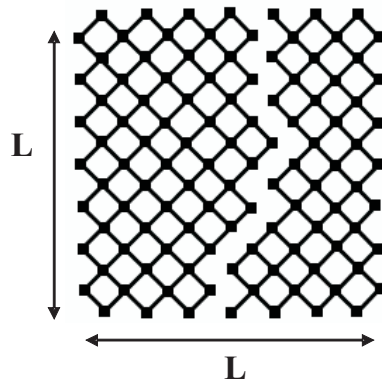
o perfil das fraturas era formado por diversas trincas e com um formato bastante sinuoso (Fig. 3.10(c)). Baseado nestes perfis pode-se conjecturar que para $D < 60\%$ o comportamento observado foi característico de fraturas frágeis e para $D > 60\%$ o comportamento observado foi de fraturas ductéis.

Para a rede de tamanho $L = 28$, o comportamento de fratura frágil foi observado nas desordens de $D = 0\%$ até $D = 40\%$. Um comportamento onde se teve a formação de uma única trinca mas com perfil sinuoso é visto de $D = 50\%$ até $D = 70\%$, e o comportamento característico de fraturas ductéis ocorreu para as desordens de $D = 80\%$ a $D = 100\%$. A Fig. 3.11 ilustra os perfis típicos de fratura para as desordens de $D = 0\%$ a $D = 100\%$ para este tamanho de rede.

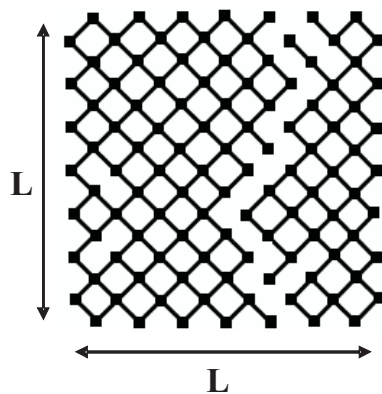
Para as redes de tamanhos $L = 14$ e $L = 20$, também não foi possível colapsar todas as curvas $I \times V$ simultaneamente, mas estas duas redes também apresentaram



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10: Perfis típicos de fratura da rede de tamanho $L = 7$ para diferentes desordens. (a) Desordens de $D = 0\%$ a $D = 20\%$. (b) Desordens de $D = 30\%$ a $D = 60\%$. (c) Desordens de $D = 70\%$ a $D = 100\%$.

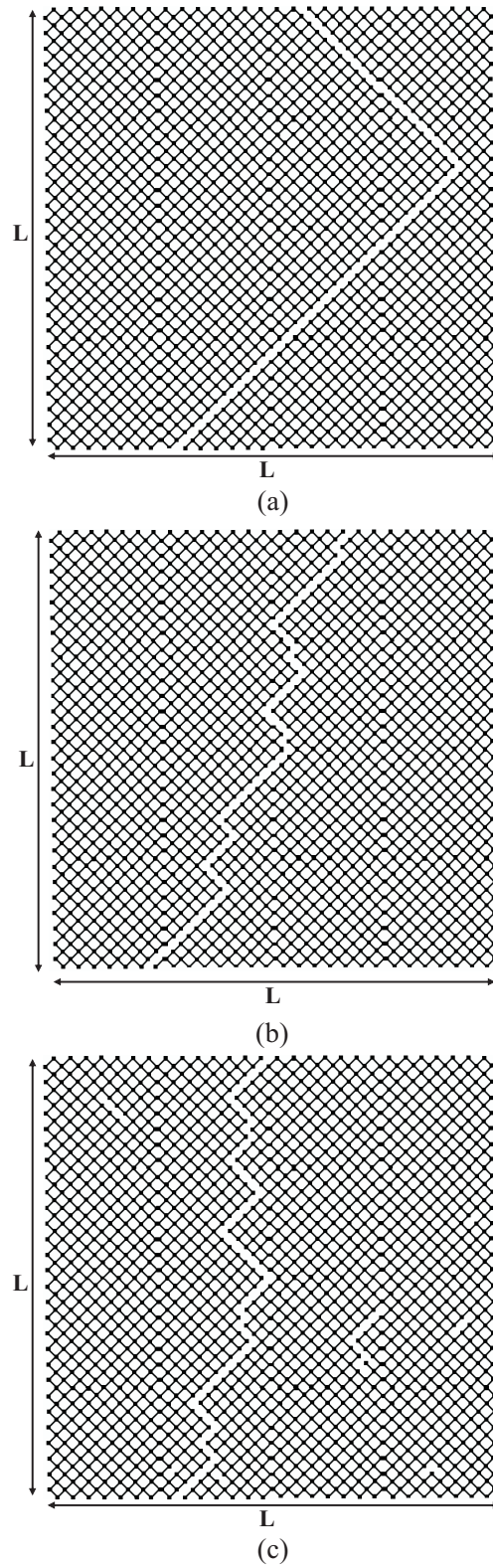


Figura 3.11: Perfis típicos de fratura da rede de tamanho $L = 28$ para diferentes desordens. (a) Desordens de $D = 0\%$ a $D = 40\%$. (b) Desordens de $D = 50\%$ a $D = 70\%$. (c) Desordens de $D = 80\%$ a $D = 100\%$.

um comportamento em comum, a divisão das curvas em dois grupos, um para $D < 50\%$ e outro para $D > 50\%$. Este comportamento é apresentado nas Figs. 3.12 e 3.13.

Para a rede com $L = 14$, de $D = 0\%$ até $D = 40\%$, a ruptura da rede foi formada

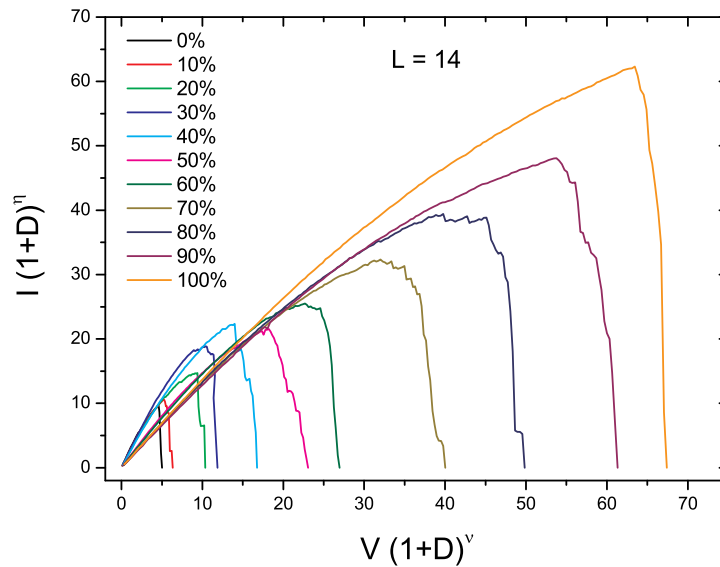


Figura 3.12: Colapso das curvas $I \times V$ para a rede com $L = 14$ e desordens de 0% a 100% .

por uma única trinca e o perfil da fratura é praticamente linear, características de uma fratura frágil. Para $D \geq 50\%$, o perfil da fratura tornou-se sinuoso, formado por diversas trincas, comportamento característico de fraturas ductéis. A Fig. 3.14 ilustra os perfis típicos de fratura para a rede de tamanho $L = 14$. Para a rede com $L = 20$, o comportamento de fraturas frágeis foi visto da desordem $D = 0\%$ até $D = 50\%$, e o comportamento de fraturas ductéis foi visto para $D = 60\%$ até $D = 100\%$. Os perfis obtidos para as redes de tamanho $L = 20$ estão ilustrados na Fig. 3.15.

A Fig. 3.16 mostra o comportamento da desordem em função dos diferentes tamanhos de redes utilizados. Nesta figura pode-se observar a mudança de compor-

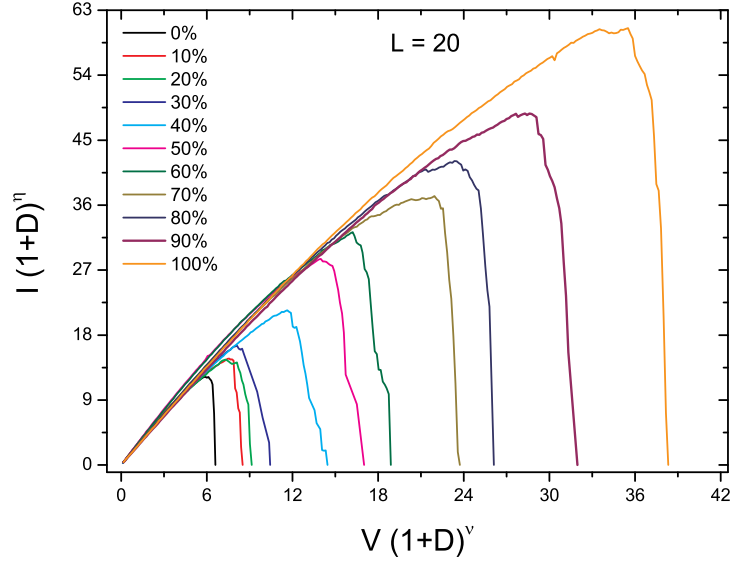


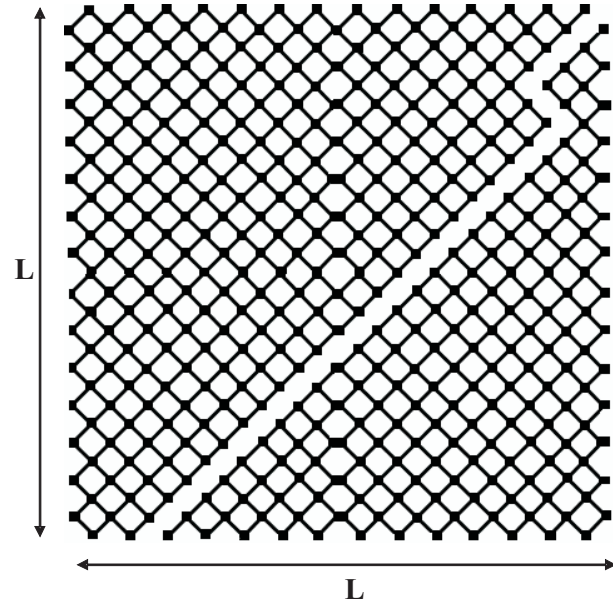
Figura 3.13: Colapso das curvas $I \times V$ para a rede com $L = 20$ e desordens de 0% a 100%.

tamento do processo de fratura passar de fraturas frágeis à ductéis com o aumento da desordem. Para as redes de tamanho $L = 7$ e $L = 28$, existe uma região de desordem onde o comportamento das fraturas não é bem definido, como foi citado anteriormente.

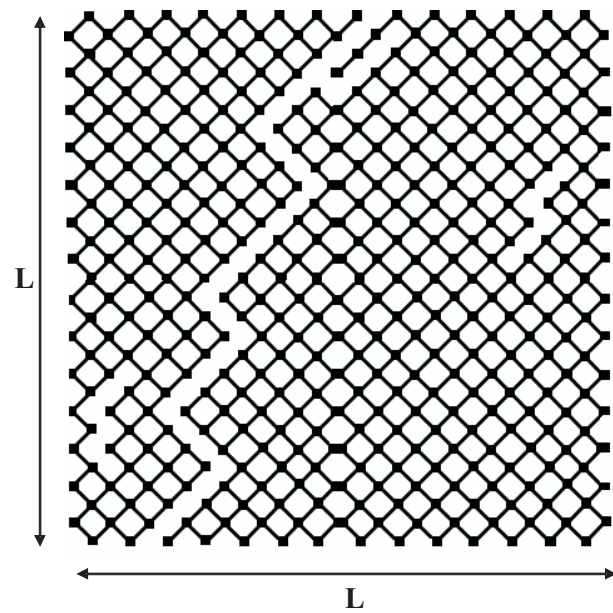
As tabelas 3.1 a 3.4, detalham os valores dos expoentes η e ν , encontrados no colapso das curvas para as rede com $L = 7$, 14, 20 e 28, respectivamente.

Para as redes $L = 14$, 20 e 28 foi possível obter o colapso das curvas utilizando o mesmo expoente ν para todas as desordens, e para as redes $L = 20$ e $L = 28$ o expoente ν possui o mesmo valor.

Estes expoentes foram encontrados variando-se seus valores e analisando o colapso das curvas, no melhor colapso das curvas, era registrado o valor do expoente. Para se obter o erro relacionado com os expoentes, variava-se o valor do expoente

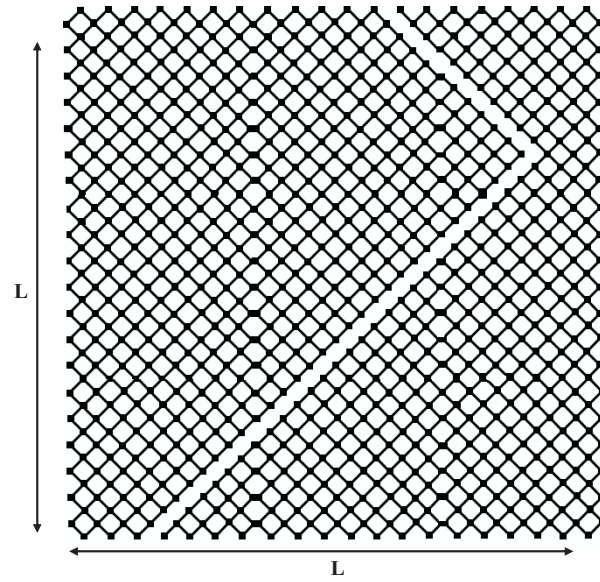


(a)

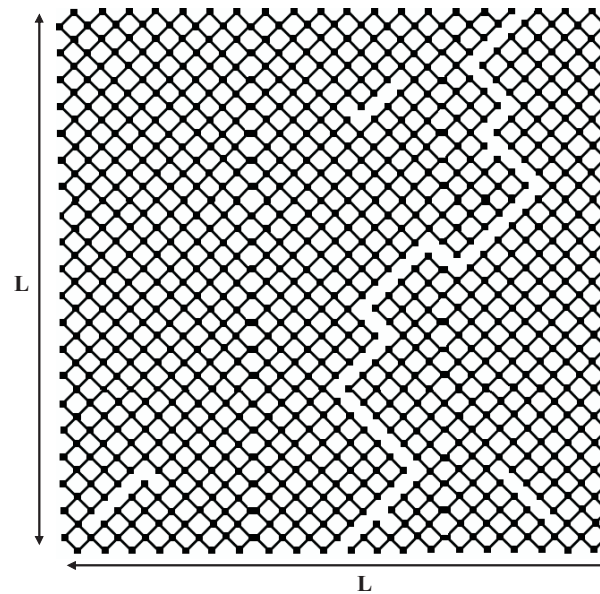


(b)

Figura 3.14: Perfis típicos de fratura da rede de tamanho $L = 14$ para diferentes desordens. (a) Desordens de $D = 0\%$ a $D = 40\%$. (b) Desordens de $D = 50\%$ a $D = 100\%$.



(a)



(b)

Figura 3.15: Perfis típicos de fratura da rede de tamanho $L = 20$ para diferentes desordens. (a) Desordens de $D = 0\%$ a $D = 50\%$. (b) Desordens de $D = 60\%$ a $D = 100\%$.

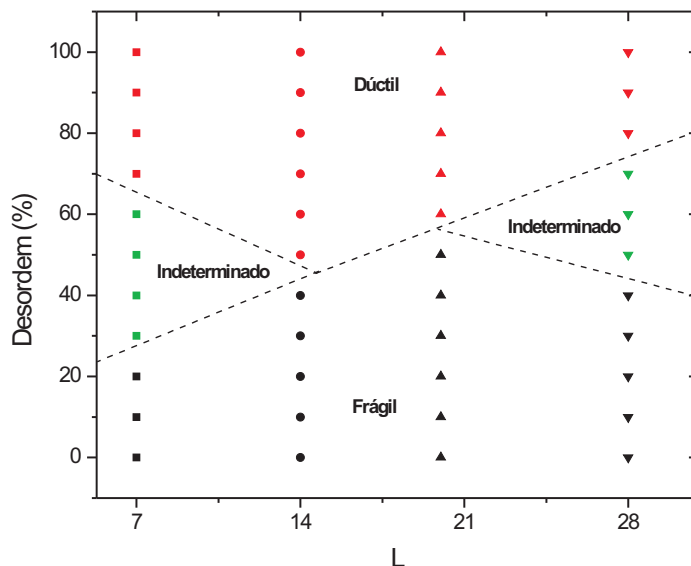


Figura 3.16: Gráfico do comportamento da desordem em função dos diferentes tamanhos de rede. A linha tracejada indica a região de mudança de comportamento do processo de fratura.

<i>Desordem</i>	η	ν
D=0	$1,6 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$
D=10	$1,6 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$
D=20	$1,6 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$
D=30	$1,6 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$
D=40	$2,4 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
D=50	$2,4 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
D=60	$2,4 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
D=70	$2,6 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$
D=80	$2,6 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$
D=90	$2,6 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$
D=100	$2,6 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$

Tabela 3.1: Valores dos expoentes η e ν para rede $L = 7$.

<i>Desordem</i>	η	ν
D=0	$3,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,2$
D=10	$3,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,2$
D=20	$3,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,2$
D=30	$3,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,2$
D=40	$3,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,2$
D=50	$2,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
D=60	$2,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
D=70	$2,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
D=80	$2,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
D=90	$2,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
D=100	$2,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$

Tabela 3.2: Valores dos expoentes η e ν para rede $L = 14$.

para valores maiores e menores que o valor do expoente encontrado no melhor colapso das curvas. Os valores encontrados nesta variação para os quais o colapso deixava de existir eram registrados, daí, calculava-se o desvio padrão da medida. A Fig. 3.17

<i>Desordem</i>	η	ν
D=0	$1,6\pm 0,4$	$0,7\pm 0,4$
D=10	$1,6\pm 0,4$	$0,7\pm 0,4$
D=20	$1,6\pm 0,4$	$0,7\pm 0,4$
D=30	$1,6\pm 0,4$	$0,7\pm 0,4$
D=40	$1,6\pm 0,4$	$0,7\pm 0,4$
D=50	$2,0\pm 0,1$	$0,7\pm 0,2$
D=60	$2,0\pm 0,1$	$0,7\pm 0,2$
D=70	$2,0\pm 0,1$	$0,7\pm 0,2$
D=80	$2,0\pm 0,1$	$0,7\pm 0,2$
D=90	$2,0\pm 0,1$	$0,7\pm 0,2$
D=100	$2,0\pm 0,1$	$0,7\pm 0,2$

Tabela 3.3: Valores dos expoentes η e ν para rede $L = 20$.

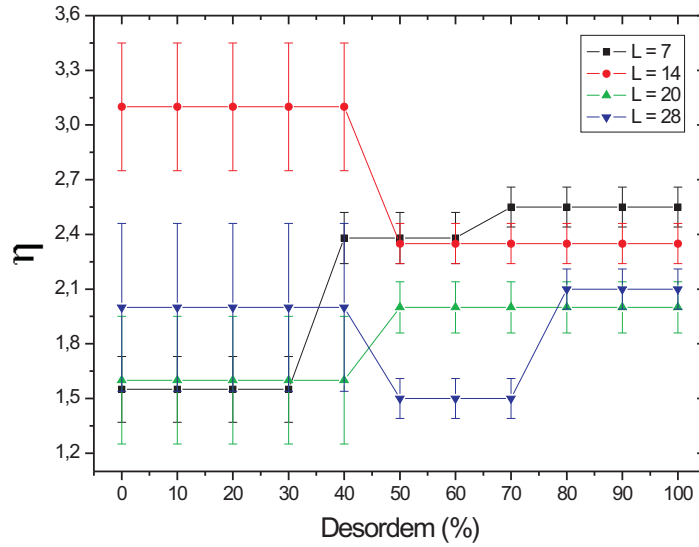
<i>Desordem</i>	η	ν
D=0	$2,0\pm 0,5$	$0,7\pm 0,4$
D=10	$2,0\pm 0,5$	$0,7\pm 0,4$
D=20	$2,0\pm 0,5$	$0,7\pm 0,4$
D=30	$2,0\pm 0,5$	$0,7\pm 0,4$
D=40	$2,0\pm 0,5$	$0,7\pm 0,4$
D=50	$1,5\pm 0,1$	$0,7\pm 0,1$
D=60	$1,5\pm 0,1$	$0,7\pm 0,1$
D=70	$1,5\pm 0,1$	$0,7\pm 0,1$
D=80	$2,1\pm 0,1$	$0,7\pm 0,1$
D=90	$2,1\pm 0,1$	$0,7\pm 0,1$
D=100	$2,1\pm 0,1$	$0,7\pm 0,1$

Tabela 3.4: Valores dos expoentes η e ν para rede $L = 28$.

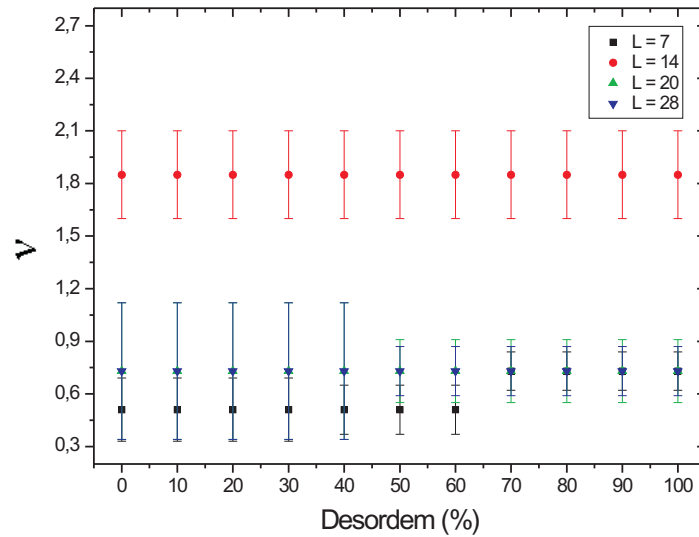
mostra o comportamento dos expoentes η e ν em função da desordem para os diferentes tamanhos de rede. Na Fig. 3.17(a), pode-se observar uma variação no comportamento do expoente η , para todos os tamanhos de rede, quando a desordem atingiu $D = 40\%$. As linhas contínuas são apenas guias para melhor visualização dos resultados e não ajustes. Mantendo-se uma certa desordem fixa, verificou-se também o comportamento das curvas $I \times V$ em função do tamanho da rede. Algumas curvas obtidas são mostradas na Fig. 3.18. Observou-se nestes resultados que para um dado valor de V o valor da corrente aumenta da rede com tamanho $L = 7$ até a rede com $L = 20$ e diminui para a rede com $L = 28$. Esse comportamento ainda não é entendido.

Tentou-se o colapso destas curvas utilizando a relação de escala (2.3). A Fig. 3.19 mostra algumas dessas tentativas.

No entanto, como pode se observar, não foi possível obter o colapso das quatro curvas simultaneamente. O melhor colapso obtido foi das curvas agrupadas duas a duas, com as redes $L = 7$ e $L = 28$ em um grupo e $L = 14$ e $L = 20$ em outro.



(a)



(b)

Figura 3.17: Gráficos dos expoentes η e ν em função da desordem para os diferentes tamanhos de rede. (a) Gráfico do expoente η , as linhas contínuas representam as guias dos pontos. (b) Gráfico do expoente ν .

Em seu trabalho Otomar *et al.* [13, 14] não tentou o colapso simultâneo das redes formadas por fios de cobre e palha de aço. Os resultados dos colapsos para as curvas $I \times V$ obtidos por ele, mostrados nas figuras 2.10 e 2.11, são referentes as redes

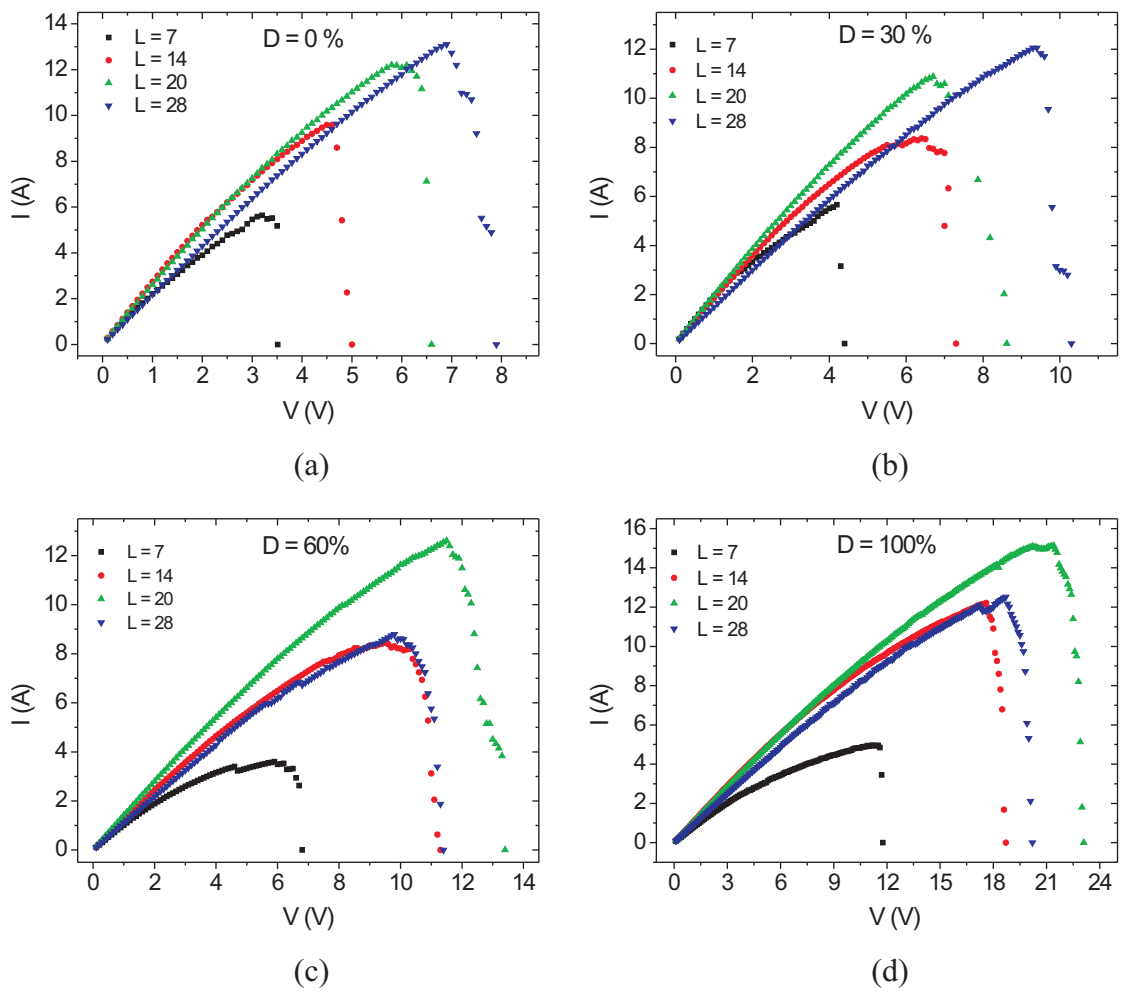


Figura 3.18: Curvas $I \times V$ em função da desordem. (a) $D = 0\%$. (b) $D = 30\%$. (c) $D = 60\%$. (d) $D = 100\%$.

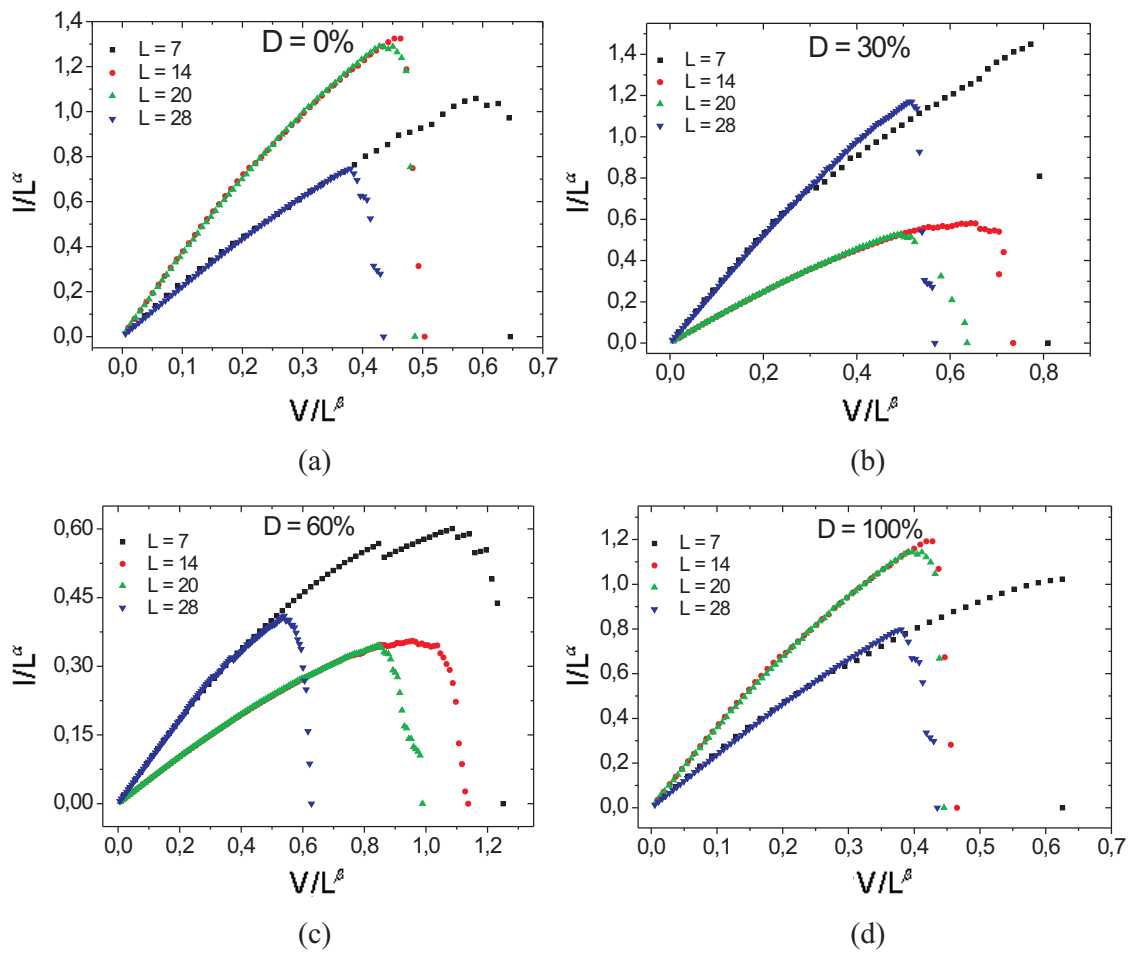


Figura 3.19: Colapso das curvas $I \times V$ em função da desordem. (a) $D = 0\%$. (b) $D = 30\%$. (c) $D = 60\%$. (d) $D = 100\%$.

formadas somente por fios de cobre, cuja desordem era $D = 100\%$ e $D = 0\%$, e para as redes formadas somente por fios de palha de aço. Nestes resultados ele obteve o colapso simultâneo das curvas $I \times V$ para os quatro tamanhos de rede somente para as redes formadas por fios de palha de aço e para a rede formada somente por fios de cobre, cuja desordem era $D = 100\%$. Para a rede formada somente por fios de cobre e desordem $D = 0\%$ não foi observado colapso. Este resultado também foi obtido por Arcangelis e Herrmann [8].

Neste trabalho para as rede formadas somente por fios de cobre e desordem $D = 0\%$ não foi observado o colapso simultâneo das curvas $I \times V$, resultado semelhante ao observado por Otomar *et al.* [13,14]. Uma possível explicação para a diferença entre o resultado obtido neste trabalho para as redes formadas somente por fios de palha de aço ($D = 100\%$), para os resultados obtidos por Otomar *et al.* [13,14] em suas redes também formadas somente por fios de palha de aço ($D = 100\%$), é a orientação de 45° na direção de aplicação da diferença de potencial introduzida neste trabalho. Para outras desordens não foi possível comparar os resultados obtidos neste trabalho com os de Otomar *et al.* porque os resultados apresentados por Otomar *et al.* para outras desordens eram de redes formadas somente por fios de cobre ou somente por fios de palha de aço, e não uma mistura dos fios na mesma rede.

Investigou-se também neste trabalho o comportamento da corrente máxima média $\langle I_{max} \rangle$ suportada pela rede em função da desordem D . Os resultados são mostrados na Fig. 3.20. As barras de erro foram obtidas considerando-se cinco amostras e as linhas contínuas são apenas guias para melhor visualização dos resultados e não ajustes. Observou-se certa semelhança entre os comportamentos das

redes $L = 7$ e $L = 28$, e entre $L = 14$ e $L = 20$.

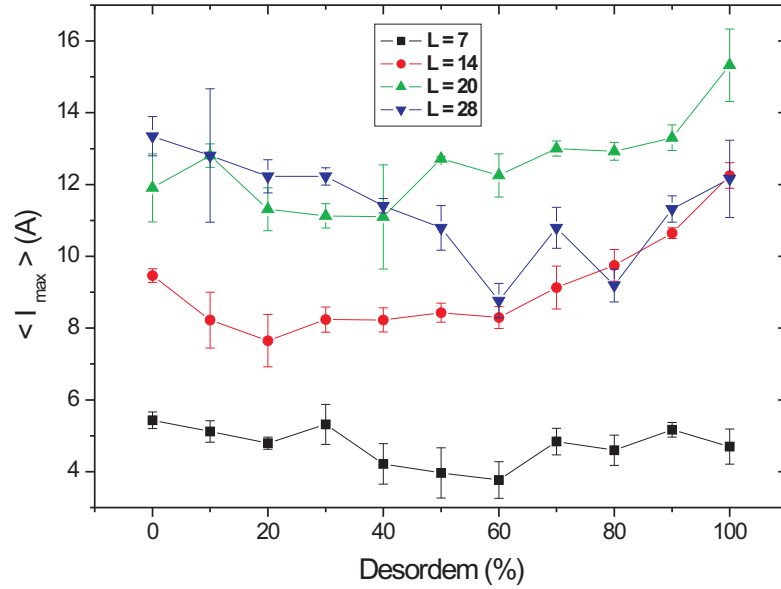


Figura 3.20: Gráfico comparativo da corrente máxima média em função da desordem D para os diversos tamanhos de rede. As linhas contínuas representam as guias dos pontos.

Analisando a Fig. 3.20, observa-se que para as redes de tamanho $L = 14$ e $L = 20$, partindo de $D = 100\%$, $\langle I_{max} \rangle$ decai até $D = 20\%$ e volta a aumentar até $D = 0\%$. Para a rede de tamanho $L = 28$, $\langle I_{max} \rangle$ decai de $D = 100\%$ até aproximadamente $D = 60\%$ e volta a aumentar até $D = 0\%$. Para a rede de tamanho $L = 7$, $\langle I_{max} \rangle$ aparentemente diminui até aproximadamente $D = 50\%$ e volta a aumentar até $D = 0\%$. Devido ao seu pequeno tamanho é mais difícil observar o comportamento real de $\langle I_{max} \rangle$ em função da desordem para a rede de tamanho $L = 7$ em comparação com as outras redes.

O comportamento de $\langle I_{max} \rangle$ à medida que a desordem é diminuída a partir de $D = 100\%$ não é bem entendido. Podemos ver da Fig. 3.7 que à medida que fios de

cobre são introduzidos na rede, composta inicialmente apenas por fios de palha de aço, a resistência da rede diminui (este comportamento é o oposto do que foi observado por Otomar *et al.* em seu trabalho de mestrado para as redes compostas de cobre e palha de aço). Além disso, a resistência dos fios de cobre usados ($\simeq 0,2 \Omega$) é menor que a resistência média dos fios de palha de aço ($\simeq 0,8 \Omega$). Sendo a potência dissipada dada por $P = RI^2$, seria necessário um aumento de corrente para que a potência dissipada pelos fios de cobre fosse igual à dissipada pelos fios de palha de aço. Entretanto, o ponto de fusão do cobre (1084 °C) é menor que o do aço ($\simeq 1500$ °C). Portanto, seria necessária uma potência menor (e, conseqüentemente uma corrente menor) para queimar os fios de cobre. Isto poderia explicar a diminuição inicial de $\langle I_{max} \rangle$ com a diminuição da desordem. No entanto, $\langle I_{max} \rangle$ volta a aumentar para desordens baixas, o que não era esperado.

O resultado obtido por Otomar *et al.*, para $\langle I_{max} \rangle$ em função da desordem para a rede de tamanho $L = 28$ composta por fios de cobre e fios de palha de aço (Fig. 2.13), mostrou uma queda no valor da $\langle I_{max} \rangle$ para as desordens de $D = 100\%$ até $D = 20\%$, a partir de $D = 20\%$ até 0% , o valor da $\langle I_{max} \rangle$ teve um aumento. Comparando o resultado obtido por Otomar *et al.* com os resultados apresentados neste trabalho para a rede de tamanho $L = 28$, observa-se uma diferença no comportamento de $\langle I_{max} \rangle$. Essa diferença de comportamento pode ter ocorrido por causa da introdução da orientação de 45° na aplicação da diferença de potencial.

Também foi investigado neste trabalho, o comportamento da corrente máxima média $\langle I_{max} \rangle$ suportada pela rede em função do tamanho L da rede para uma desordem D fixa. Com os resultados obtidos tentou-se verificar, se $\langle I_{max} \rangle$ depende

do tamanho da rede L de acordo com a expressão:

$$\langle I_{max} \rangle \propto L^\lambda. \quad (3.2)$$

As curvas obtidas para estas tentativas são apresentadas na Fig. 3.21, onde as linhas contínuas indicam o melhor ajuste. Os valores obtidos para o expoente λ são

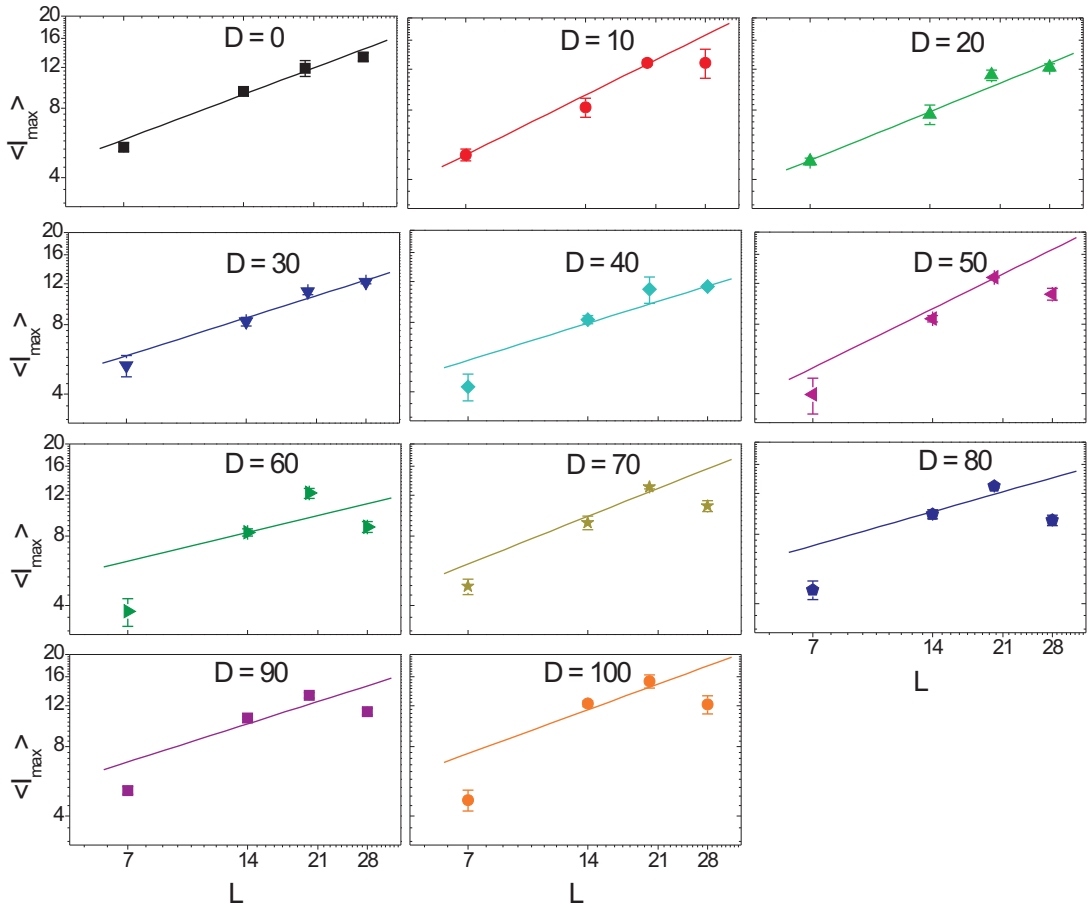


Figura 3.21: Ajustes log-log para $\langle I_{max} \rangle$ em função do tamanho L da rede para as desordens de $D = 0\%$ a $D = 100\%$. As linhas contínuas indicam o melhor ajuste.

mostrados na tabela (3.5) e o comportamento do expoente λ é mostrado na Fig. 3.22.

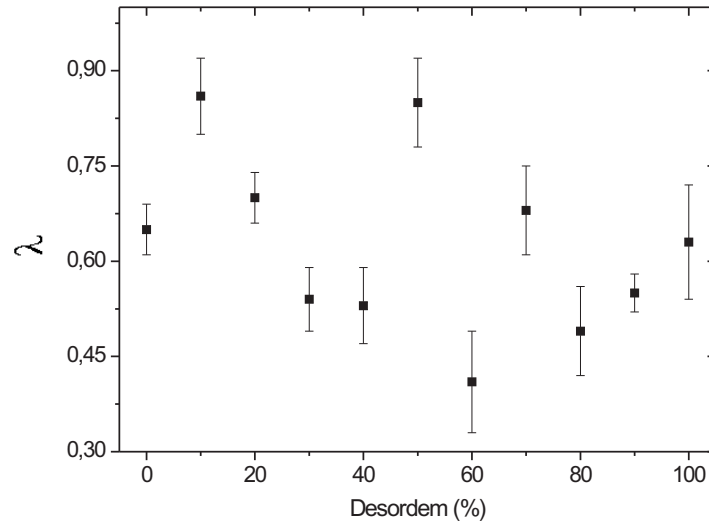
<i>Desordem</i>	λ
D=0	0,65±0,04
D=10	0,86±0,06
D=20	0,70±0,04
D=30	0,54±0,05
D=40	0,53±0,06
D=50	0,85±0,07
D=60	0,41±0,08
D=70	0,68±0,07
D=80	0,49±0,07
D=90	0,55±0,03
D=100	0,63±0,09

Tabela 3.5: Valores do expoente λ para as diversas desordens.

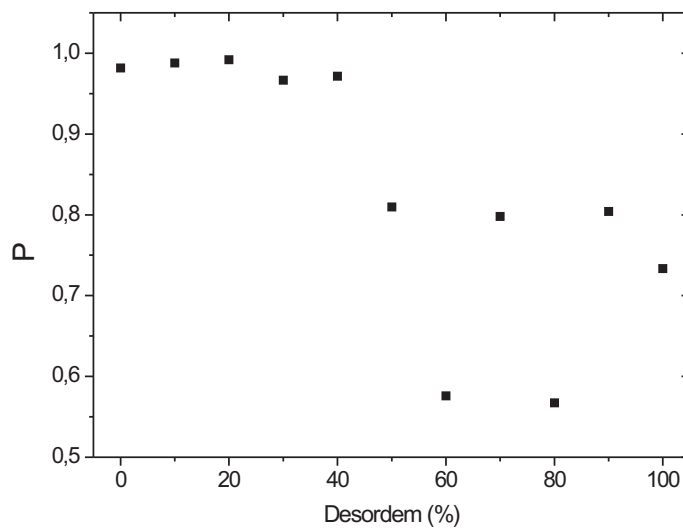
Não foi possível obter um bom ajuste para todas as desordens utilizando a expressão (3.2). Para verificar este resultado foi feito um gráfico do parâmetro de ajuste da regressão linear em função da desordem da rede (Fig. 3.22(b)). Este parâmetro é considerado ótimo quanto mais próximo de um for seu valor. Observa-se através da Fig. 3.22(b) que até a desordem $D = 40\%$ o parâmetro de ajuste possui valores próximos a um, indicando que para as desordens de $D = 0\%$ até $D = 40\%$, as redes obedecem a lei de escala (3.2). A partir de $D = 50\%$ as redes deixam de obedecer a lei de escala (3.2).

Foram ainda feitos gráficos do número médio de fusíveis queimados $\langle n \rangle$ em função da desordem D , para cada tamanho de rede. Estes resultados são mostrados na Fig. 3.23. As barras de erro foram obtidas considerando-se cinco amostras.

Para as redes de tamanhos $L = 14, 20$ e 28 , houve um aumento do número médio de fusíveis queimados durante o processo de ruptura, somente para a rede de tamanho $L = 7$ não foi observado este aumento. Um aumento no número de fusíveis queimados era esperado, porque o aumento da desordem faz com que o material exiba



(a)



(b)

Figura 3.22: Comportamento do expoente λ em função da desordem. (a) Gráfico do expoente λ em função da desordem. (b) Gráfico do parâmetro de ajuste em função da desordem.

características de fraturas dúcteis.

O resultado obtido por Otomar *et al.* para $\langle n \rangle$ em função da desordem para uma rede de tamanho $L = 28$ (Fig. 2.14) composta por fios de cobre e palha de aço, mostrou um aumento de $\langle n \rangle$ com o aumento da desordem. Os valores

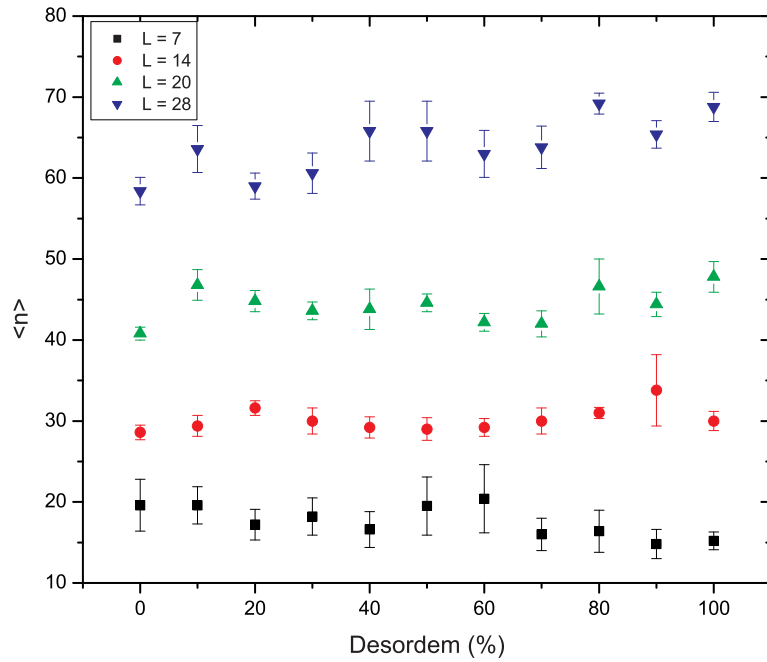


Figura 3.23: Gráfico comparativo do número médio de fusíveis queimados em função da desordem D para os diversos tamanhos de rede.

obtidos variaram de $\langle n \rangle \sim 32$ para $D = 0\%$ até $\langle n \rangle \sim 44$ para $D = 100\%$.

Neste trabalho como pode-se observar, os valores de $\langle n \rangle$ para a rede de tamanho

$L = 28$, variam de $\langle n \rangle \sim 58$ para $D = 0\%$ até $\langle n \rangle \sim 70$ para $D = 100\%$.

Este resultado indica que a orientação de 45° introduzida na aplicação da diferença

de potencial gerou mudanças no comportamento de $\langle n \rangle$, fazendo com que mais

fusíveis fossem queimados durante o processo de ruptura da rede. Isto pode ser visto

comparando-se os perfis de fratura produzidos neste trabalho (Figs. 3.10, 3.11, 3.14

e 3.15) com os obtidos por Otomar. No presente trabalho os perfis são bem mais

sinuosos e apresentam muito mais fusíveis queimados fora da trinca principal.

Curvas do número médio de fusíveis queimados $\langle n \rangle$ em função do tamanho

da rede L para uma desordem fixa, também foram feitas. Com o intuito de verificar a relação entre $\langle n \rangle$ e o tamanho da rede L , utilizou-se a lei de potência:

$$\langle n \rangle \propto L^\phi, \quad (3.3)$$

Os resultados são apresentados na Fig. 3.24. As barras de erro foram obtidas considerando-se cinco amostras.

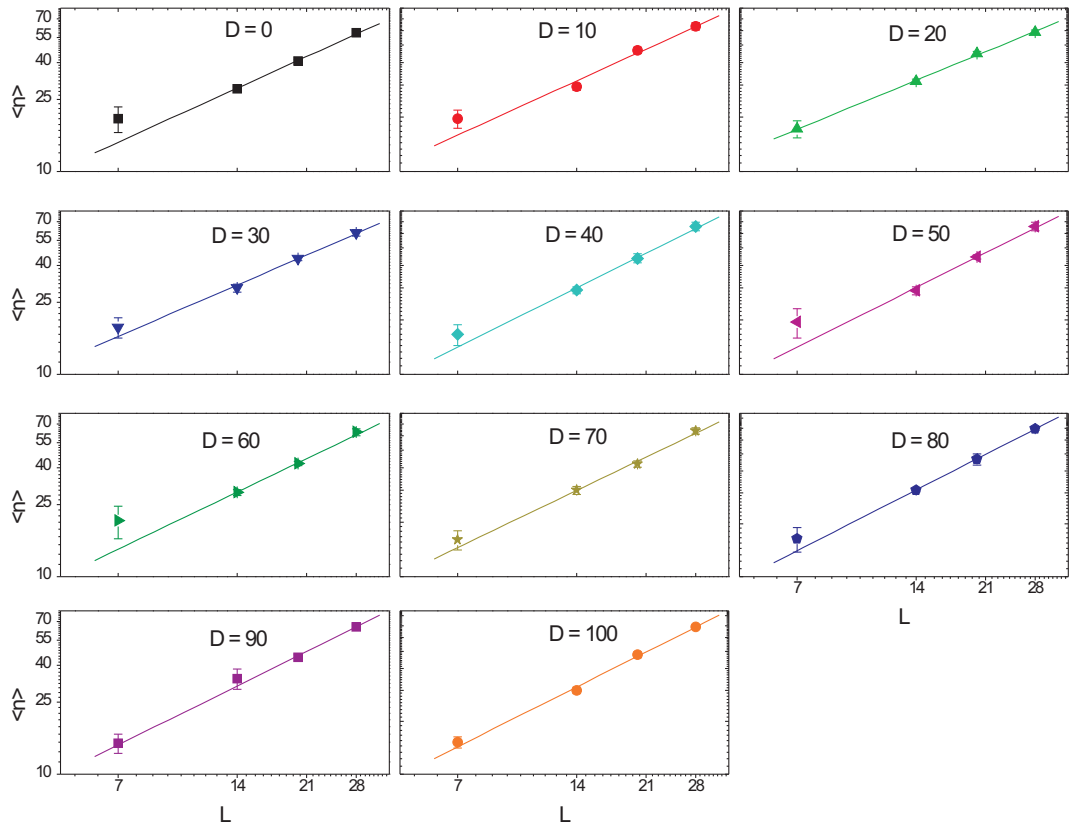


Figura 3.24: Ajustes log-log para $\langle n \rangle$ em função do tamanho L da rede para as desordens de $D = 0\%$ a $D = 100\%$. As linhas contínuas indicam o melhor ajuste.

A tabela 3.6 detalha os valores do expoente ϕ encontrados para cada desordem

<i>Desordem</i>	ϕ
D=0	0,99±0,06
D=10	1,00±0,07
D=20	0,90±0,05
D=30	0,94±0,08
D=40	1,08±0,09
D=50	1,1±0,1
D=60	1,05±0,08
D=70	1,05±0,08
D=80	1,15±0,04
D=90	1,08±0,08
D=100	1,13±0,05

Tabela 3.6: Valores do expoente ϕ para as diversas desordens.

e a Fig. 3.25 mostra o comportamento de ϕ em função de D.

Podemos observar que o valor de ϕ aumenta com a desordem, indicando que o comportamento da rede passa de frágil ($\phi = 1$) a dúctil ($\phi > 1$).

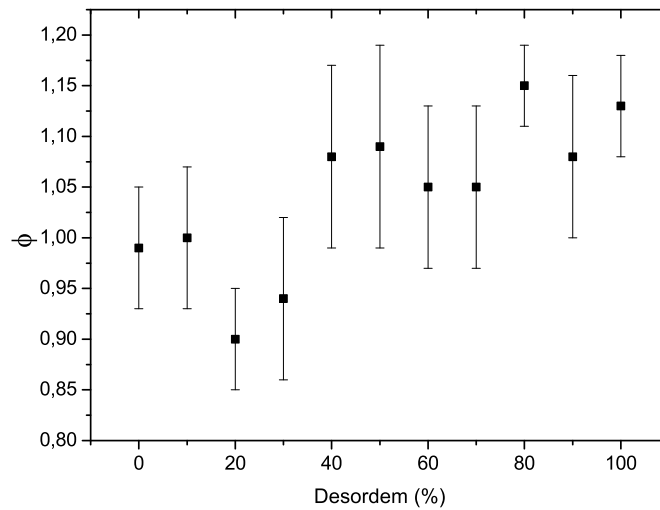


Figura 3.25: Gráfico do expoente ϕ em função da desordem.

3.2.2 Curvas da resistência em função do tempo

Os experimentos para obtenção das curvas da resistência R em função do tempo t , foram realizados seguindo a ordem crescente de tamanho de rede e de desordem, ou seja, iniciou-se com uma rede de tamanho $L = 14$, com desordem $D = 0\%$ e variou-se esta rede até uma desordem $D = 100\%$ de 10% em 10% . Para cada desordem foram testadas pelo menos cinco valores diferentes de corrente, com uma variação de até aproximadamente 15% do valor da corrente crítica. A Fig. 3.26 mostra esse teste para a rede de tamanho $L = 14$ e desordem $D = 70\%$. Seguiu-se este procedimento também para as redes com $L = 20$ e $L = 28$. Não foi possível realizar estes experimentos para a rede com $L = 7$ devido à grande flutuação dos valores da corrente.

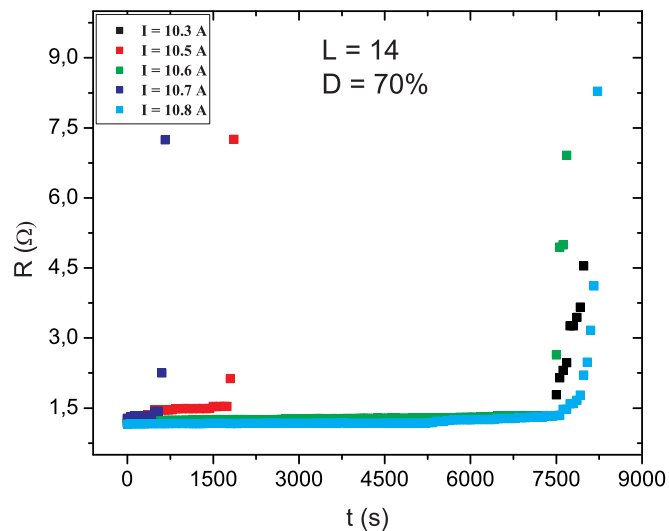


Figura 3.26: Comparativo das curvas da resistência em função do tempo para a rede de tamanho $L = 14$ e desordem $D = 70\%$.

Para garantir um regime de igualdade entre os resultados mostrados nas Figs. 3.27 a 3.29, foram escolhidas as curvas que possuíam os maiores valores de correntes

entre os diferentes valores de correntes testados para cada tamanho de rede e desordem.

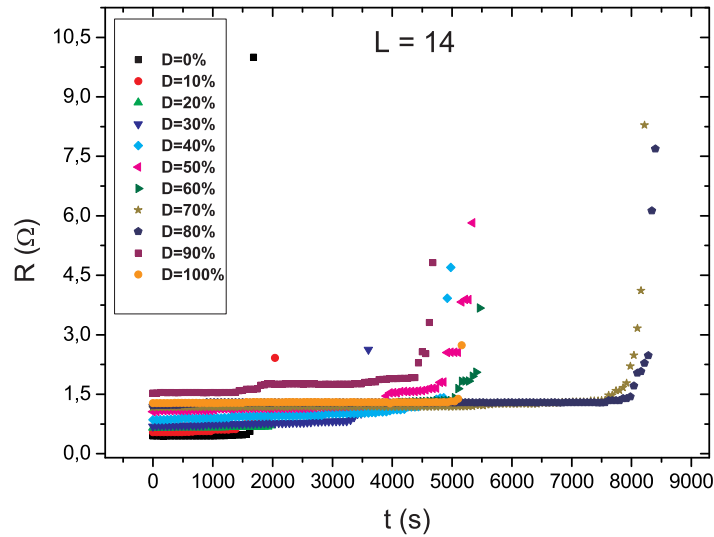


Figura 3.27: Curvas da resistência em função do tempo para diversas desordens para a rede com $L = 14$.

Agrupando-se as curvas selecionadas em função da desordem da rede, verificou-se nestes resultados, que as redes obedeceram a lei de potência dada pela expressão (2.4), a mesma utilizada por Lamaignère [12]. A Fig. 3.30 mostra algumas destas curvas de resistência em função do tempo para algumas desordens. As linhas contínuas representam o melhor ajuste.

Observa-se nestas curvas que o tempo de ruptura aumenta da rede com $L = 28$ até a rede com $L = 14$. Os valores dos expoentes encontrados nos ajustes são mostrados na tabela 3.7. Os expoentes apresentam uma grande dependência em relação ao tamanho e desordem da rede, impedindo dessa forma uma comparação entre os valores obtidos para cada tamanho de rede e sua respectiva desordem. Entretanto,

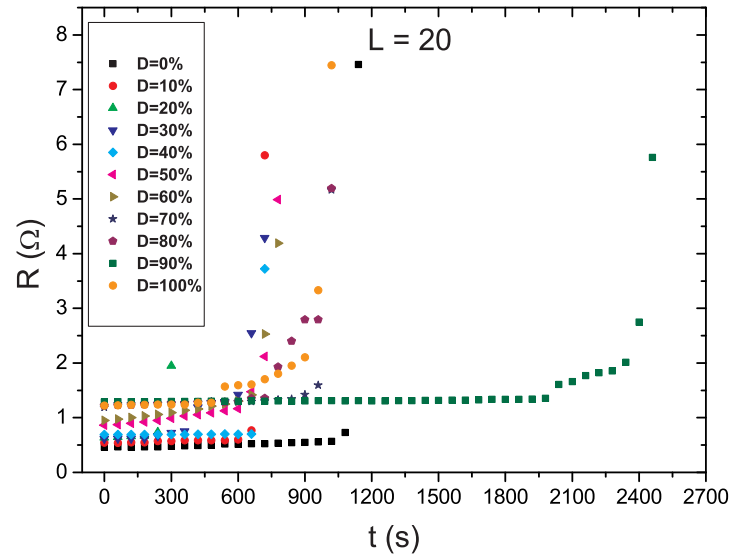


Figura 3.28: Curvas da resistência em função do tempo para diversas desordens para a rede com $L = 20$.

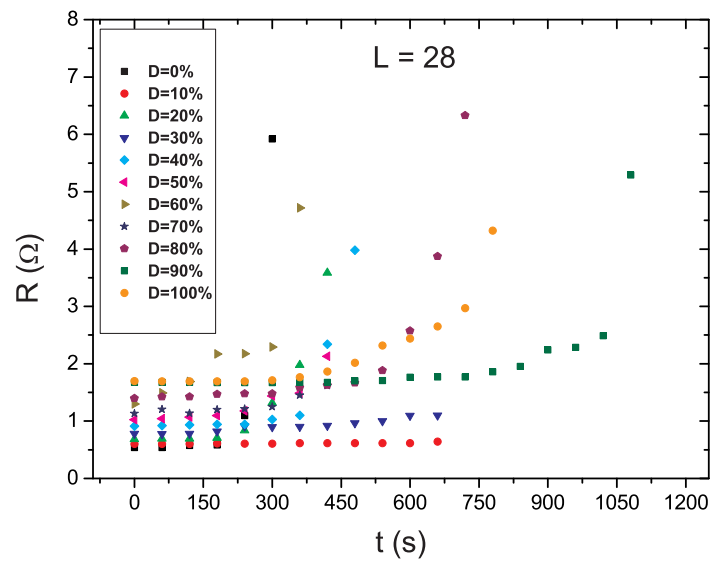


Figura 3.29: Curvas da resistência em função do tempo para diversas desordens para a rede com $L = 28$.

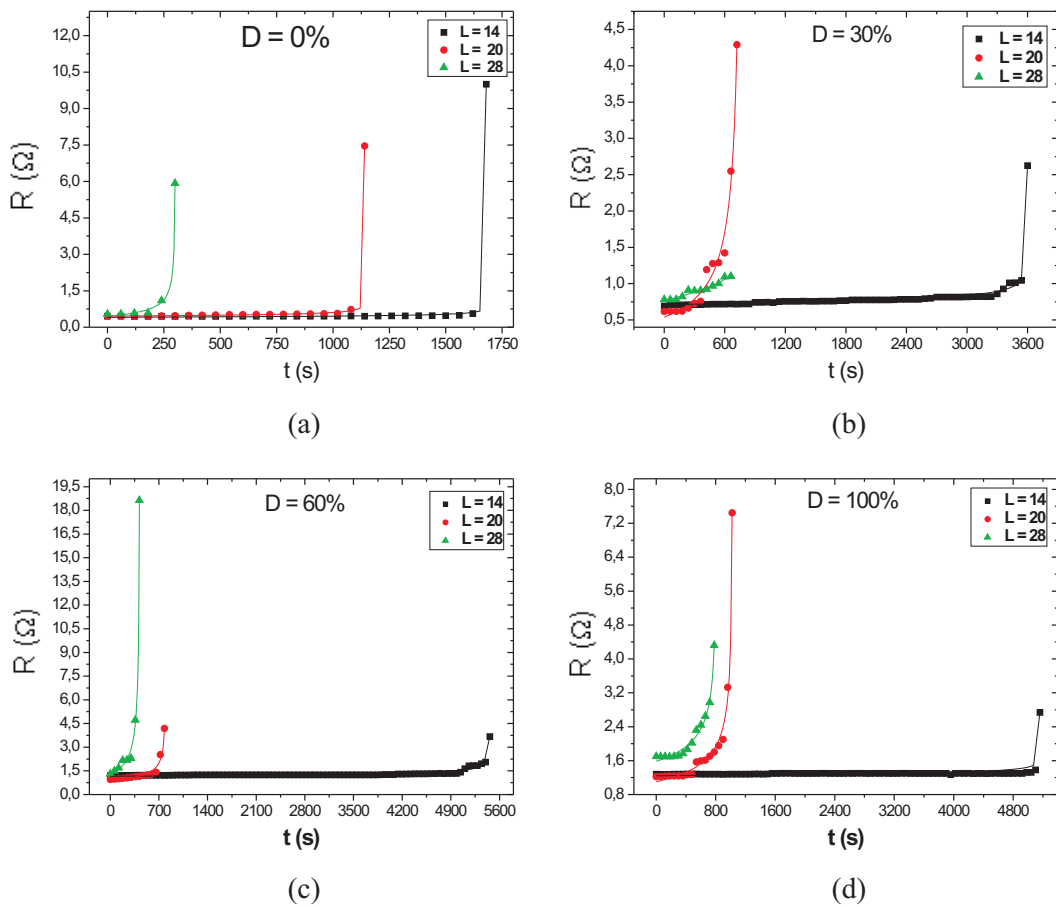


Figura 3.30: Curvas $R \times t$ para diferentes tamanhos de redes agrupadas em função da desordem. As linhas contínuas representam o melhor ajuste. (a) $D = 0\%$. (b) $D = 30\%$. (c) $D = 60\%$. (d) $D = 100\%$.

podemos ver que os valores obtidos são significativamente menores que o valor $\alpha \simeq 0,65$ encontrado por Lamaignère [12].

<i>Desordem</i>	$L = 14$	$L = 20$	$L = 28$
D=0	0,13±0,01	0,13±0,01	0,5±0,1
D=10	0,18±0,01	0,04±0,01	0,01±0,01
D=20	0,01±0,01	0,09±0,01	0,02±0,01
D=30	0,09±0,01	0,8±0,1	0,5±0,4
D=40	0,22±0,02	0,06±0,02	0,6±0,2
D=50	0,36±0,02	0,36±0,03	0,25±0,05
D=60	0,11±0,01	0,38±0,06	0,7±0,1
D=70	0,14±0,01	0,08±0,01	0,13±0,04
D=80	0,13±0,02	0,40±0,05	0,50±0,07
D=90	0,14±0,01	0,19±0,01	0,15±0,01
D=100	0,04±0,01	0,37±0,02	0,29±0,02

Tabela 3.7: Valores do expoente α para as redes de tamanhos $L = 14, 20$ e 28 .

3.2.3 Curvas do tempo de ruptura em função da corrente

Foram realizados experimentos para as redes de tamanhos $L = 14, 20$ e 28 , onde se mediu o tempo de ruptura em função da corrente aplicada. Nestes experimentos aplicava-se um certo valor de corrente, próximo ao valor de ruptura, e media-se o tempo gasto para a ruptura da rede, que rompia em consequência do efeito Joule. Os resultados obtidos são mostrados nas Figs. 3.31 a 3.33. As linhas contínuas são apenas guias para melhor visualização dos resultados e não ajustes.

Tentou-se verificar se os resultados obtidos estavam de acordo com o resultado obtido por Lamaignère [12], onde para valores de corrente próximo ao da corrente crítica tinha-se um ajuste logarítmico, dado pela expressão (2.5) ($t_r = -\frac{1}{a} \log(1 - kI^{-b})$), e para valores maiores que a corrente crítica tinha-se um ajuste de lei de

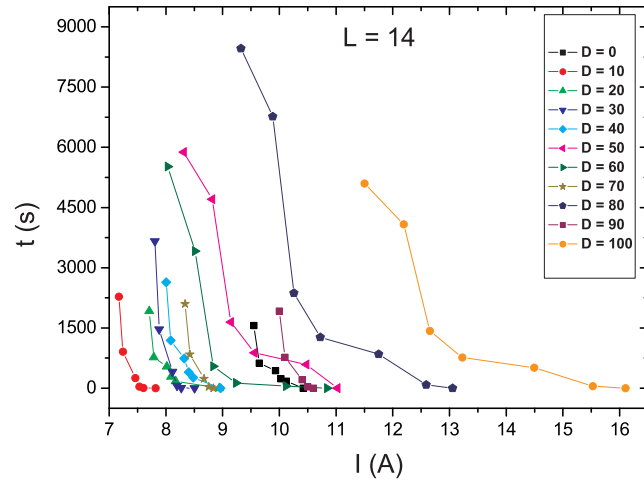


Figura 3.31: Curvas $t \times I$ para as diferentes desordens para a rede de tamanho $L = 14$. As linhas contínuas representam as guias dos pontos.

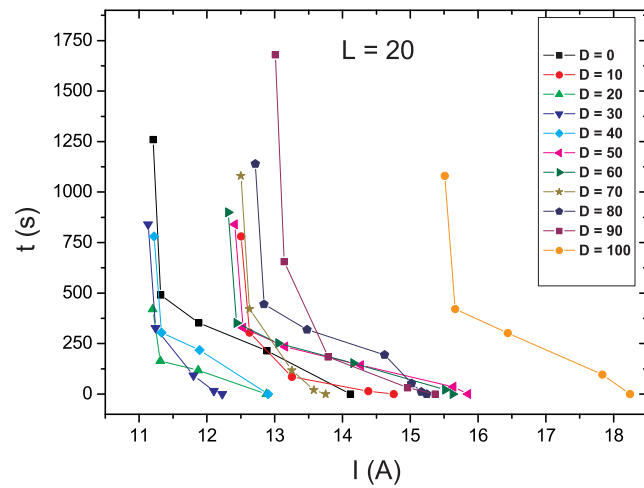


Figura 3.32: Curvas $t \times I$ para as diferentes desordens para a rede de tamanho $L = 20$. As linhas contínuas representam as guias dos pontos.

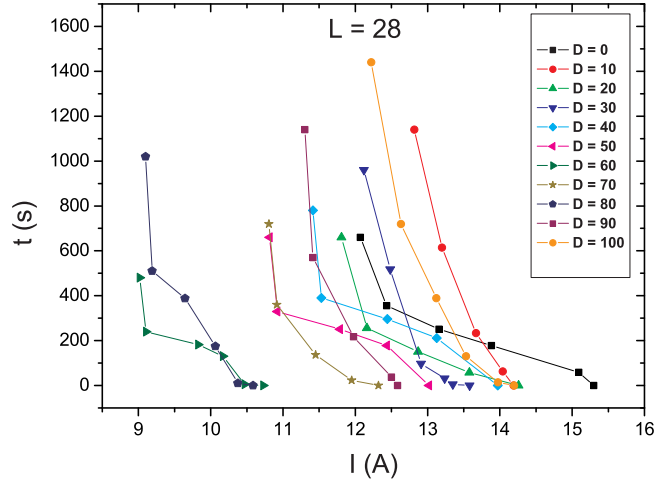


Figura 3.33: Curvas $t \times I$ para as diferentes desordens para a rede de tamanho $L = 28$. As linhas contínuas representam as guias dos pontos.

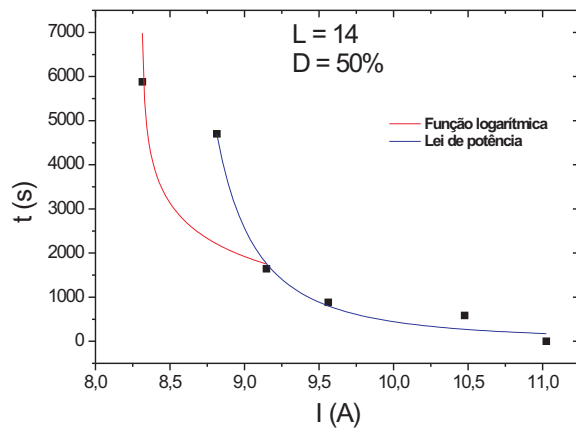
potência, dado pela expressão:

$$t_r = a|k - I|^{-b}, \quad (3.4)$$

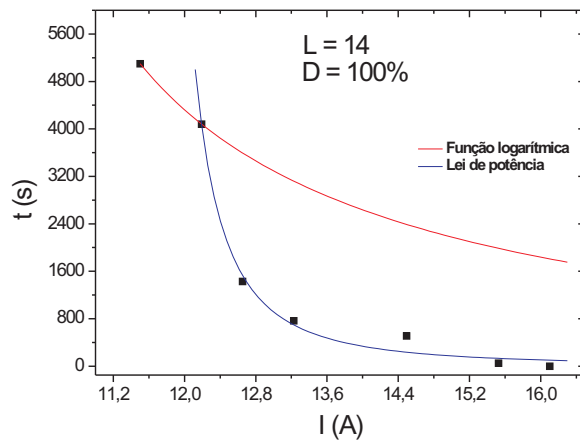
As Figs. 3.34 a 3.36, mostram os ajustes feitos para algumas desordens para os tamanhos de rede $L = 14, 20$ e 28 . Nos gráficos a curva vermelha indica o melhor ajuste para a função logarítmica (2.5) e a curva azul, indica o melhor ajuste para a lei de potência (3.4). Os resultados apresentaram comportamento semelhante ao sugerido por Laignère [12], e o valor encontrado para o expoente b foi $2,000 \pm 0,001$, que era o valor esperado, pois descreve o efeito Joule. As tabelas 3.8 a 3.10 mostram os valores dos parâmetros de ajustes utilizados nas expressões.



(a)

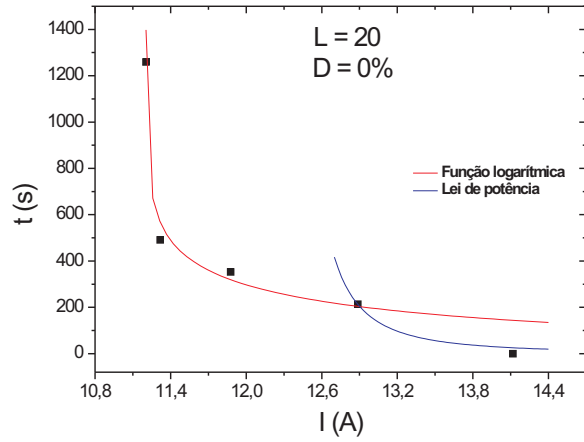


(b)

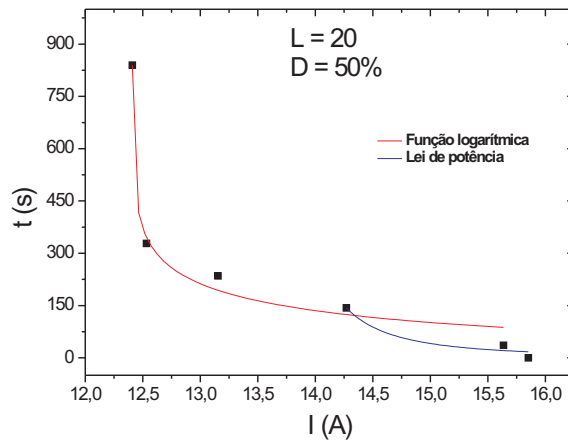


(c)

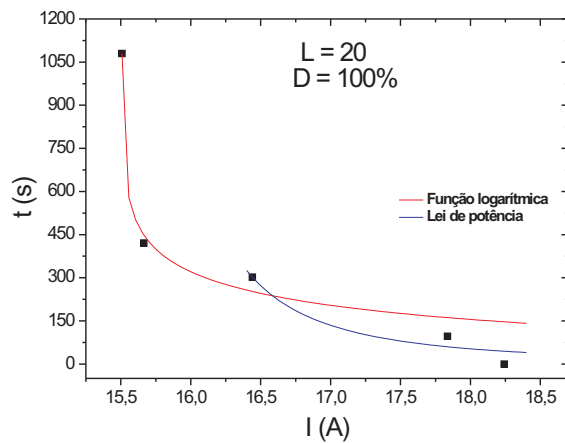
Figura 3.34: Ajustes para a rede de tamanho $L = 14$. (a) $D = 0\%$. (b) $D = 50\%$. (c) $D = 100\%$.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.35: Ajustes para a rede de tamanho $L = 20$. (a) $D = 0\%$. (b) $D = 50\%$. (c) $D = 100\%$.

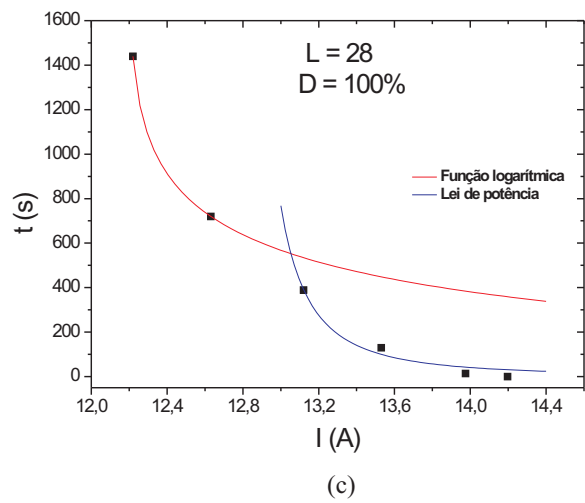
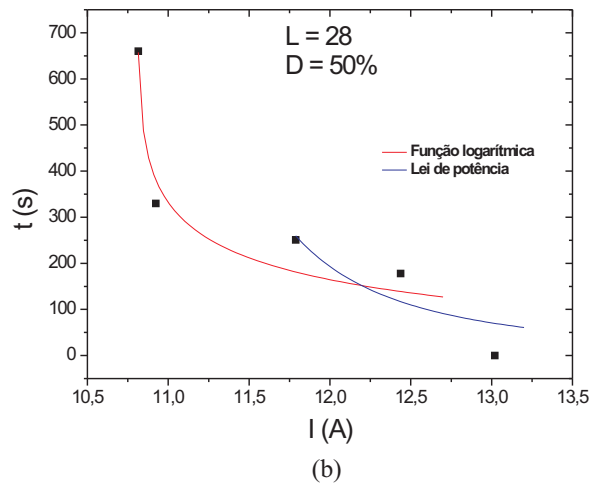
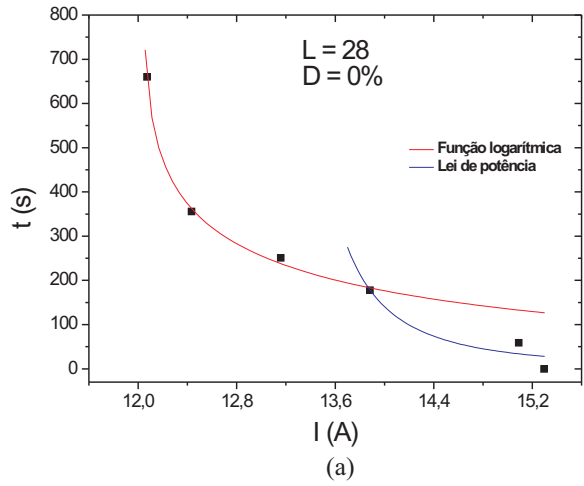


Figura 3.36: Ajustes para a rede de tamanho $L = 28$. (a) $D = 0\%$. (b) $D = 50\%$. (c) $D = 100\%$.

L = 14	Função logarítmica		Lei de potência		
	Desordem	a	k	a	k
0	0,003	91,2	91,3	9,3	
10	0,003	51,4	32,1	7,1	
20	0,003	59,4	73,2	7,5	
30	0,004	60,9	58,9	7,7	
40	0,002	64,1	133,5	7,8	
50	0,001	69,0	332,3	8,6	
60	0,001	64,5	247,2	8,2	
70	0,003	69,6	38,9	8,2	
80	0,001	86,2	167,6	8,0	
90	0,004	100,0	51,5	9,8	
100	0,004	131,1	551,0	11,8	

Tabela 3.8: Valores dos parâmetros a e k encontrados para os ajustes da rede de tamanho L = 14.

L = 20	Função logarítmica		Lei de potência		
	Desordem	a	k	a	k
0	0,003	125,5	90,7	10,9	
10	0,007	156,3	37,7	12,3	
20	0,01	125,4	25,1	11,0	
30	0,008	123,9	31,0	10,9	
40	0,006	125,9	46,1	11,0	
50	0,005	154,0	76,3	12,1	
60	0,005	151,7	79,1	12,0	
70	0,006	156,3	50,6	12,3	
80	0,004	161,7	108,9	12,4	
90	0,003	169,2	83,0	12,8	
100	0,004	240,5	133,0	15,2	

Tabela 3.9: Valores dos parâmetros a e k encontrados para os ajustes da rede de tamanho L = 20.

L = 28	Função logarítmica		Lei de potência		
	Desordem	a	k	a	k
0	0,004	145,2	133,2	10,6	
10	0,003	164,2	581,2	12,1	
20	0,006	139,4	302,9	11,1	
30	0,005	146,9	302,0	11,6	
40	0,004	130,2	51,6	11,2	
50	0,005	116,9	98,4	9,5	
60	0,007	81,3	110,0	9,0	
70	0,006	116,8	65,0	10,5	
80	0,004	82,8	248,5	8,6	
90	0,004	127,7	109,8	11,0	
100	0,003	149,3	90,0	11,4	

Tabela 3.10: Valores dos parâmetros a e k encontrados para os ajustes da rede de tamanho L = 28.

3.2.4 Curvas da largura do perfil em função do tamanho da rede

Baseado nos resultados de Hansen *et al.* [17], tentou-se verificar neste trabalho se a largura do perfil da fratura w em função do tamanho L obedeciam a relação (2.6). Para essa análise foram traçadas as curvas de w em função de L para as redes de tamanhos L = 7, 14, 20 e 28 e para as desordens de D = 0% até D = 100% de 10% em 10%, como mostra a Fig. 3.37. As linhas contínuas representam o melhor ajuste.

Os valores dos expoentes ζ encontrados nos ajustes são apresentados na tabela (3.11) e o comportamento destes expoentes é mostrado na Fig. 3.38.

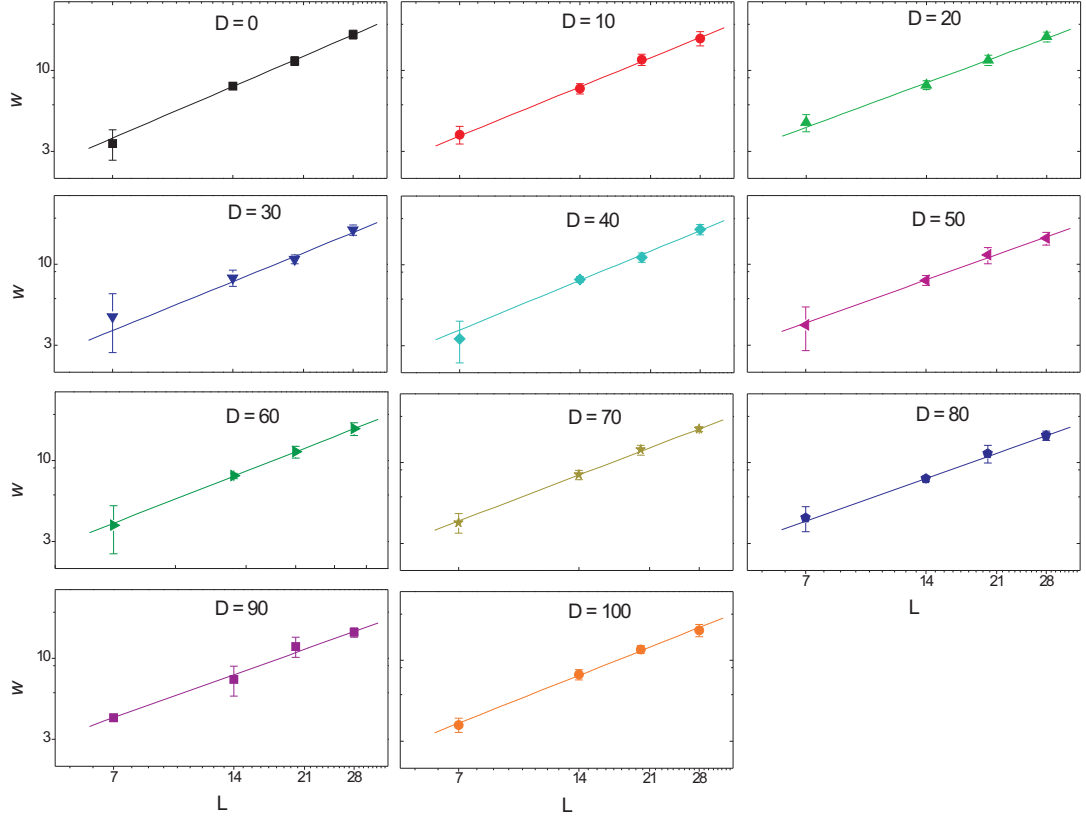


Figura 3.37: Curvas de $w \times L$ para as desordens de $D = 0\%$ a $D = 100\%$, para redes de tamanhos $L = 7, 14, 20$ e 28 . A linha contínua representa o melhor ajuste.

<i>Desordem</i>	ζ
D=0	$1,1 \pm 0,1$
D=10	$1,1 \pm 0,1$
D=20	$1,0 \pm 0,1$
D=30	$1,1 \pm 0,2$
D=40	$1,1 \pm 0,1$
D=50	$1,0 \pm 0,2$
D=60	$1,0 \pm 0,1$
D=70	$1,0 \pm 0,1$
D=80	$1,0 \pm 0,1$
D=90	$0,93 \pm 0,06$
D=100	$1,0 \pm 0,1$

Tabela 3.11: Valores do expoente ζ para as diversas desordens.

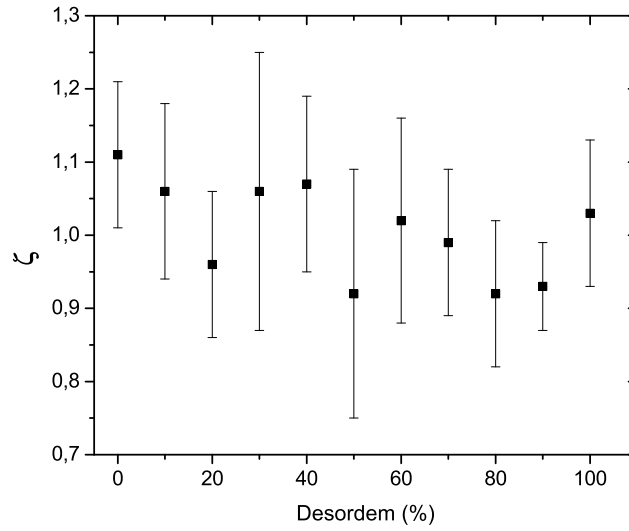


Figura 3.38: Expoente ζ em função da desordem.

O valor encontrado para o expoente no trabalho de Hansen *et al.* foi $\zeta = 0,7$ o qual difere bastante dos valores observados neste trabalho, que em média foi $\zeta = 1,0 \pm 0,1$. Uma possível explicação para as diferenças nos resultados são os tamanhos de rede utilizados neste trabalho e a forma como a desordem foi introduzida.

Capítulo 4

Conclusões e Perspectivas

4.1 Conclusões

Na tentativa de colapso das curvas $I \times V$ para várias desordens D para um dado tamanho de rede L , utilizando a equação (3.1), não foi possível um colapso simultâneo de todas as curvas para um tamanho de rede.

Na tentativa de colapso das curvas $I \times V$ mantendo-se a desordem fixa e variando-se o tamanho da rede, também não foi observado um colapso simultâneo para os quatro tamanhos de redes utilizados. Este resultado é diferente do resultado observado por Otomar *et al.* [13] e do resultado observado por Arcangelis e Herrmann [8], que para as redes cuja desordem era $D = 100\%$, observou-se o colapso simultâneo para os tamanhos de redes utilizados. Uma possível explicação para a diferença nos resultados observados é a inclinação de 45° dos fusíveis em relação a aplicação da diferença de potencial.

Para $\langle I_{max} \rangle$ em função da desordem, observou-se dois comportamentos que dependiam do grau de desordem na rede. Para os resultados de $\langle I_{max} \rangle$ em função

do tamanho da rede, pôde-se concluir que até a desordem $D = 40\%$, os quatro tamanhos de rede utilizados obedecem a relação (3.2). Acima de $D = 40\%$ e com o aumento da desordem as redes deixam de obedecer a esta relação.

Para o número médio de fusíveis queimados em função da desordem da rede, observou-se um aumento de $\langle n \rangle$ com o aumento da desordem para as redes com $L = 14, 20$ e 28 . Somente para a rede com $L = 7$ não ocorreu este o aumento. Comparando o número médio de fusíveis queimados neste trabalho para a rede de tamanho $L = 28$ composta por fusíveis de cobre e palha de aço para a rede semelhante descrita por Otomar em sua dissertação de mestrado ([14]), no presente trabalho houve um aumento significativo do número de fusíveis queimados. Este aumento de n_i comparado ao resultado obtido por Otomar, é explicado pela inclinação de 45° introduzida nas redes.

Para $\langle n \rangle$ em função do tamanho L da rede, concluiu-se que o valor de ϕ aumenta com a desordem, indicando uma tendência de mudança de comportamento do processo de ruptura da rede de frágil ($\phi = 1$) a dúctil ($\phi > 1$).

Os ajustes dos resultados dos experimentos das curvas da resistência em função do tempo estão de acordo com a lei de potência (2.4). Entretanto, os valores do expoente α são significantemente diferentes do valor encontrado por Lamaignère.

Nos resultados obtidos para o tempo de ruptura em função da corrente aplicada, observou-se que para valores próximos ao valor da corrente crítica o ajuste das curvas segue uma função logarítmica e para valores maiores que a corrente crítica os ajustes seguem uma lei de potência, como observado por Lamaignère. O valor do expoente $b = 2,000 \pm 0,001$ descreve o efeito Joule, responsável pela ruptura da rede.

Para os resultados da largura do perfil da fratura em função do tamanho da rede, os valores obtidos para o expoente $\zeta \sim 1,0 \pm 0,1$ foram bastantes diferentes dos valores sugeridos por Hansen *et al.* [17].

4.2 Perspectivas

Pretende-se analisar os dados restantes obtidos pelos experimentos realizados neste trabalho, por exemplo, utilizar novas funções para tentar o colapso simultâneo das desordens para um tamanho fixo de rede e verificar o comportamento das outras amostras das curvas $R \times t$.

Pretende-se medir a corrente em função da desordem para tamanhos de redes maiores que $L = 28$ e introduzir ligações mais complexas nas redes, por exemplo, ligações triangulares, ligações de extremidades distantes, etc.

Criar uma placa de aquisição automática de dados para agilizar a efetivação dos experimentos.

Referências Bibliográficas

- [1] H. J. Herrmann, S. Roux, *Statistical Models for the Fracture of Disordered Media* (North-Holland, Amsterdam 1992).
- [2] A. T. Bernardes, J. G. Moreira, *Phys. Rev. B* **49**, 15035 (1994).
- [3] I. L. Menezes-Sobrinho, J. G. Moreira, *Eur. Phys. J. B* **13**, 313 (2000).
- [4] I. L. Menezes-Sobrinho, A. T. Bernardes, J. G. Moreira, *Phys. Rev. E* **63**, 025104(R) (2001).
- [5] I. L. Menezes-Sobrinho, *Phys. A* **328**, 493 (2003).
- [6] L. de Arcangelis, S. Redner, H. J. Herrmann, *Journal Physique Letters* **46**, (Paris), L585, (1985).
- [7] B. Kahng, G. G. Batrouni, S. Redner, L. de Arcangelis, H. J. Herrmann, *Phys. Rev. B.* **37**, 7625, (1988).
- [8] L. de Arcangelis, H. J. Herrmann, *Phys. Rev. B.* **39**, 2678, (1989).
- [9] A. Hansen, E. L. Hinrichsen, S. Roux, *Phys. Rev. B.* **43**, 665, (1991).
- [10] C. Vanneste, D. Sornette, *J. Phys. I.* **2**, 1621, (1992).

- [11] D. Sornette, C. Vanneste, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 612, (1992).
- [12] L. Lamaignère, F. Carmona, D. Sornette, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2738, (1996).
- [13] D. R. Otomar, I. L. Menezes-Sobrinho, M. S. Couto, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 095501, (2006).
- [14] D. R. Otomar, **Investigação Experimental do Modelo de Fusíveis**. 2005. 48p. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- [15] A. Delaplace, G. Pijaudier-Cabot, S. Roux, *J. Mech. Phys. Solids.* **44**, 99, (1996).
- [16] P.K.V.V. Nukala, S. Simunovic, *J. Phys. A.* **36**, 11403, (2003).
- [17] A. Hansen, E. L. Hinrichsen, S. Roux, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2476, (1991).
- [18] AE. T. Seppala, V. I. Raisanen, M. J. Alava, *Phys. Rev. E.* **61**, 6312, (2000).
- [19] S. Zapperi, P. Ray, H. E. Stanley, A. Vespignani, *Phys. Rev. E.* **59**, 5049, (1999).
- [20] V. I. Raisanen, E. T. Seppala, M. J. Alava, P. M. Duxbury, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 329, (1998).
- [21] G. G. Batrouni, A. Hansen, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 325, (1998).