

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
(PPGEM)

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E CORRENTE DE TRABALHO,  
NAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DO COBRE  
ELETROLÍTICO.**

**SÉRGIO MARTINS BARCELOS**  
Bacharel em Ciência da Computação

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre (RS), Junho de 2010.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGEM

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E CORRENTE DE TRABALHO,  
NAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DO COBRE  
ELETROLÍTICO.**

**SÉRGIO MARTINS BARCELOS**  
Bacharel em Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Júnior

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre (RS), Junho de 2010.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGEM

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E CORRENTE DE TRABALHO, NAS  
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DO COBRE  
ELETROLÍTICO.**

**SÉRGIO MARTINS BARCELOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA**  
sendo aprovada em sua forma final.

Dr. Jaime Álvares Spim Junior – UFRGS/ RS – Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

Dra. Berenice Anina Dedavid – PUC/RS

Dr. Walman Benício de Castro – UFCG - Campina Grande/PB

Dr. Nestor Cezar Heck – UFRGS/RS

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine.”

(Coríntios I – 13:1)

À DEUS, por tudo.

À minha esposa Ana, companheira inseparável de todas as horas.

À minhas filhas Bruna e Rafaela, meus tesouros.

Aos meus pais Joaquim e Vardeli, sempre.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Professor Jaime Álvares Spim Jr. pela paciência e pela condução no processo de ensinar e aprender.

À minha esposa Ana, e minhas filhas Rafaela e Bruna, por compreenderem as horas não tão fáceis.

Aos colegas da SATC, principalmente os companheiros Ilen e Fábio Peruch, pelas horas agradáveis.

Aos colegas da CELESC, principalmente os grandes amigos Enaldo, Amilcar, Luiz Carlos, César, Fernando, ..., pela compreensão e colaboração.

À CELESC, SATC e UFRGS, por oportunizar essa etapa de minha vida.

À UNESC, principalmente aos professores Márcio Fiori e Márcio Rocha, pelo apoio e contribuição.

À todos meu MUITO OBRIGADO!

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – caracterização dos pontos de equilíbrio do Cobre.....	17
Figura 2 – Imagens de micrografias de cobre puro: (a) material solidificado - grãos equiaxiais, e (b) grão encruado após processo de trefilação.....	20
Figura 3 – influência do trabalho a frio nas características mecânicas do cobre.....	21
Figura 4 – Escala dimensional de representação de defeitos na estrutura cristalográfica dos materiais .....	23
Figura 5 – Quantidade de lacunas por $\text{cm}^3$ com variação da temperatura para o condutor de cobre .....	25
Figura 6 – Crescimento de grão pela difusão atômica.....	26
Figura 7 – Espalhamento tri-dimensional do elétron $e$ , orientado pelo vetor $k$ , na análise sob planos relacionados ao campo aplicado.....	30
Figura 8 - Curva esquemática da dependência da resistividade elétrica em função da temperatura de um metal qualquer .....	32
Figura 9 – Função representativa da variação da temperatura em relação a proporcionalidade da resistência .....	33
Figura 10 – Representação dos fatores influentes na composição da Resistividade total ....	35
Figura 11 – Comportamento da corrente elét. em CC no interior de um condutor elétrico .	37
Figura 12 – Comportamento da corrente elét. em CA no interior de um condutor elétrico .	38
Figura 13 – Diagrama de equilíbrio da composição de Oxigênio no Cobre .....	39
Figura 14 – Influência da presença de oxigênio na composição do cobre .....	40
Figura 15 – Capacidade de corrente para condutores de cobre nu limitados a índice da variação da temperatura.....	46
Figura 16 – Fio de cobre nu disponível para aplicação (disposto em rolos) .....	49
Figura 17 – Arranjo e disposição dos cabos nas redes de distribuição de energia.....	50
Figura 18 – Equipamento de ensaio de resistência elétrica: (a) detalhe instalação/medição, (b) detalhe medição efetuada.....	53
Figura 19 – (a) Equipamento de ensaio de Tração Unidirecional com estufa acoplada, (b) detalhe estufa Biopar .....	55
Figura 20 – Tendências do gradiente da temperatura do material em exposição a corrente elétrica, fixa, durante intervalo de tempo .....	56
Figura 21 – Variação da resistividade do cobre com o aumento da temperatura. ....	59
Figura 22 – Resultados de ensaio de resistência à tração das amostras 1, 2 e 3 à $80^\circ\text{C}$ .....	61
Figura 23 – Resultados de ensaio de resistência à tração da amostra 4, 5 e 6 à $80^\circ\text{C}$ .....	62
Figura 24 – alteração das características do fio em relação a influência da corrente circulante de trabalho.....	64
Figura 25 – Micrografia Longitudinais das amostras 1, 2 e 3 .....	65
Figura 26 – Micrografia Transversais das amostras 1, 2 e 3 .....	66
Figura 27 – Micrografia Longitudinais das amostras 4, 5 e 6 .....	67
Figura 28 – Micrografia Transversais das amostras 4, 5 e 6 .....	68

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade Térmica e Elétrica de alguns elementos materiais .....	18
Tabela 2 – Parâmetros para difusão do cobre e ligas .....	27
Tabela 3 – Propriedades mecânicas para fios de cobre meio duro (à 20°C) .....	28
Tabela 4 – Resistividade e coeficiente de variação da Resistência para temperatura de materiais à 20°C .....	34
Tabela 5 – Valores da resistência elétrica em condutores da classe 1A (condutor de cobre sólido) .....	36
Tabela 6 – Capacidade de corrente para condutores de cobre nu limitados a índice da variação da temperatura .....	45
Tabela 7 – Análise de espectroscopia de absorção atômica do fio de cobre ETP .....	51
Tabela 8 – Amostras submetidas a correntes possíveis numa linha de energia elétrica externa aérea .....	51
Tabela 9 – Valores de resistência e resistividade das amostras obtidos à 20°C .....	58
Tabela 10 – Valores obtidos no ensaio de tração unidirecional a 80°C .....	60



## LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASM – American Society for Metals

AWG – American Wire Gage.

BS EN – Padrão britânico aplicado na Europa.

C110 – Padrão JSA (Japanese Standards Association) do cobre ETP.

CA – Corrente Alternada.

CC – Corrente Contínua.

Celesc Distribuição S.A - concessionária de energia elétrica de Santa Catarina.

CFC – Cúbica de Face centrada (estrutura atômica).

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão.

ddp – diferença de potencial.

DHP – (Deoxydised High Phosphorus): cobre desoxidado com alto teor de Fósforo.

DLP – (Deoxydised Low Phosphorus): cobre desoxidado com baixo teor de Fósforo

ETP – Electrolytic Tough Pitch (Eletrolítico tenaz)

FEM – Força Eletro-Motriz

IACS – International Annealed Copper Standard (for conductivity)

MVS – Microscopia de Varredura por Sonda.

OF – (Oxygen Free): cobre com percentual não significativo de conteúdo de Oxigênio.

OFHC – (Oxygen free High Conductivity): cobre considerado livre de Oxigênio.

SEM – (MEV) Microscópio Eletrônico de Varredura

SEP – Sistema Elétrico de Potência.

TEM – (MET) Microscópio Eletrônico de Transmissão.

A – Amper

cm – centímetro.

eV – Elétron-Volt.

MCM – Mil Circular Mil

MPa – Mega Pascal

T<sub>f</sub> – Temperatura de Fusão.

## RESUMO

Fatores críticos no controle de um sistema elétrico, sem dúvida alguma, são os desafios de manter-se toda a sua estrutura física em plenas condições de operação. A infraestrutura passiva, materiais e acessórios, devem manter suas propriedades elétricas e mecânicas, minimizados aos impactos da descaracterização por excedentes de correntes elétricas circulantes. Um dos elementos passivos nas redes de distribuição de energia elétrica é motivo deste estudo, sendo o condutor de corrente elétrica, por meio de fios de cobre eletrolíticos – ETP C110 têmpera meio-duro, seção circular, 101% IACS. As condições operacionais dos fios de cobre instalados numa rede estão sujeitos a intensidade da corrente elétrica de trabalho em períodos e eventos diversos; as correntes podem variar desde a mínima corrente de carga, carga média, carga pesada, sobrecarga ou sobrecorrentes por curto circuitos; todos esses eventos são relacionados a difusidade térmica do material, sendo relacionado para cada um deles uma temperatura obtida.

No total foram investigadas 6 amostras, sendo 5 delas denotando um evento de intensidade de corrente elétrica, objetivando apontar os resultados das análises realizadas sobre os efeitos da temperatura imposta pela corrente elétrica circulante em fios. As amostras, originadas de produto, “material base” foram caracterizados, em fio de cobre nu rígido de diâmetro de 4,515 mm ( $\approx 16,00 \text{ mm}^2$ ), utilizando-se dispositivo gerador de corrente elétrica, produziu-se intensidade da mesma para cada espécime; cinco amostras foram caracterizadas, sendo respectivamente, em 143 Amper (capacidade nominal do fio), 214.5 Amper, 286 Amper, 400 Amper e 700 Amper; cada qual denotando um evento com duração de tempo específica, sendo efetuado o monitoramento do gradiente de temperatura, individualmente, obtendo-se como resultado estruturas de material recristalizado, bem como produtos com recozimento severo. Inicialmente foi investigada a composição química percentual do material encruado pelo processo de trefilação do cobre puro ETP, e também a tração unidirecional e obtenção da estrutura metalográfica de todas as amostras, bem como a resistividade/condutibilidade de ambas.

Palavras chaves: cobre ETP, fio rígido, propriedades mecânicas, recozimento, resistividade e corrente elétrica.

## ABSTRACT

Critical factor in the control of an electrical system, undoubtedly, are the provocation in maintain it all your physical structure in total operation conditions. Static infrastructure, materials and complement, must to maintain it's electrical and mechanicals proprieties reduced at impacts loss characteristic for excess of electrical current. One of those statics elements in the electrical power distribution system it's reason this work, being conductor of electrical current, through de electrolytic copper wire – ETP C110 hardness half-hard, cross-section, 101% IACS. Operations conditions of the copper wire installed in network are subjects to intensity of electrical current in cycle and several events; the currents can alter it from current minim, middle, absolute, overload or short circuit; all those events it's connected to thermal diffusivity of material, being connected to each and all a temperature have achieved.

In total was investigated six samples, being five indicating an event of intensity of electrical current, intending obtain results of the analyses made with effects of temperature achieved by electrical current in wires. The samples, made of “base material” were characterized, in copper wire, without isolation, hardness half-hard, diameter 4.515mm ( $\approx 16,00 \text{ mm}^2$ ), using it electrical current generator device, makes to circulate intensity of electrical current for each sample; five sample was characterized, being respectively, 143 Amper (nominal capacity of product), 214.5 Amper, 286 Amper, 400 Amper e 700 Amper; every one denoting an event with specific duration, being made the monitoring temperature rate of change, individually, obtaining as resulted structure of recrystallized material, and too severe annealing. Previously was investigated the percentage chemical composition of hardened material by drawing process of pure copper ETP, and too unidirectional tensile strength and metallography of all sample, and too the resistivity/conductivity in every one.

Words key: copper ETP, hard wire, mechanical proprieties, annealing, resistivity e electrical current.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Motivação.....	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo geral.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Cobre e suas características.....	17
2.1.1 Caracterização do produto sob estudo – fios de cobre ETP.....	19
2.2 Caracterização e capacidade de condução de corrente elétrica do cobre ETP.....	21
2.3 Difusão no comportamento de crescimento de grão.....	22
2.3.1 Mobilidade atômica no crescimento de grãos.....	22
2.4 Características e comportamento impostos pela Resistência à Tração do cobre ETP.....	28
2.5 Resistividade e Condutividade elétrica em materiais metálicos.....	29
2.5.1 Aspectos influentes no comportamento da Resistividade elétrica.....	31
2.5.2 Comportamento da Resistividade elétrica em função da variação da temperatura.....	32
2.5.2.1 Coeficiente de variação da Resistência para temperatura.....	33
2.5.2.2 Caracterização da Resistividade sob efeito da deformação.....	35
2.6 Comportamento da circulação da corrente elétrica acerca da ocupação na seção transversal do condutor elétrico.....	36
2.6.1 Circulação da corrente elétrica em circuitos de Corrente Contínua - CC.....	37
2.6.2 Circulação da corrente elétrica em circuitos de Corrente Alternada – CA.....	38
2.7 Oxidação e corrosão.....	39
2.8 Capacidade de transporte de corrente elétrica dos condutores.....	41
2.8.1 Suportabilidade térmica dos condutores em função da corrente elétrica drenada.....	41
2.8.1.1 Comportamento térmico em condutores para corrente limitada aos valores nominais em regime contínuo.....	42
2.8.1.2 Comportamento térmico em condutores para corrente com grandes variações de valores.....	44
2.8.2 Capacidade de corrente elétrica nominal em função da variação da temperatura.....	44
2.9 Condições funcionais das redes de distribuição de energia elétrica.....	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 Caracterização das amostras para análises.....	49
3.2 Monitoramento da temperatura.....	52
3.3 Medições da resistência elétrica.....	53
3.4 Ensaio de Tração Unidirecional.....	54
3.5 Análise por microscopia óptica.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1 Monitoramento da temperatura.....	56
4.2 Obtenção da Resistividade Elétrica.....	58
4.3 Ensaio de Tração Unidirecional.....	60
4.4 Análise por microscopia óptica.....	65
4.5 Considerações finais.....	69
5. CONCLUSÕES.....	72
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
7. BIBLIOGRAFIA.....	75

## 1. INTRODUÇÃO

O comportamento pontual das características físicas de metais condutores em ocorrências de variação de temperatura demonstra, para muitos deles, alterações em suas estruturas constitutivas, e conseqüente, alternâncias no comportamento de condutibilidade e resistência à tração.

Especificamente tratando-se do cobre, algumas particularidades devem ser observadas na investigação das características físicas sob efeito da variação de temperatura. Este metal apresenta propriedades intrínsecas que o credenciam à aplicação sistemática em condutores de energia elétrica, independente do nível de tensão elétrica sob utilização, no formato de produtos trefilados. Contudo, a exposição do cobre a correntes elétricas, com valores percentualmente acima das condições nominais de funcionamento, e dependendo do tempo de exposição, produz acentuada variação na temperatura do material e pode alterar significativamente seu comportamento e estrutura cristalográfica.

Concessionárias de fornecimento de energia elétrica sofrem com eventuais descaracterizações do cobre ao longo de suas linhas de distribuição em razão da variação do valor de corrente elétrica circulante, que podem variar de alguns poucos à milhares de Amper, quando da ocorrência de um curto-circuito durante períodos de tempo prolongados, onde dependendo da intensidade da mesma, alguns poucos segundos são desastrosos para o sistema. Essa descaracterização produz efeitos indesejáveis na estruturação das referidas linhas, ou seja, para linhas com espaçamento horizontal pode ocorrer a dilatação dos condutores até atingir alturas críticas para a segurança dos terceiros, já nos espaçamentos verticais, fatalmente, ocorrerá o entrelaçamento entre a fiação e conseqüente curto-circuito, podendo ainda acarretar no rompimento dos condutores.

O presente trabalho descreve a investigação através de experimentos e pesquisas, fundamentando-se em condições nominais e de intensidades de corrente elétrica circulante acima destes valores, bem como no regime de exposição, observando-se assim as temperaturas apresentadas. As características observadas denotam propriedades do cobre puro – ETP C110, trefilado, meio-duro, assim como também deste mesmo material desde a recristalização até o recozimento.

## 1.1 Motivação

O Sistema Elétrico de Potência – SEP, em ambientes que apresentam agressividade na sua composição em combinação com agentes e substâncias poluidoras, como soluções salinas (salitre ou maresia da orla) e enxofre dos compostos peritosos, são constituídos com predominância dos condutores de fio de cobre eletrolítico - ETP em linhas para tensões elétricas nominais até a classe de 15.000 Volts (Alta e Baixa Tensão), haja vista a excelente resistência a corrosão e oxidação sob efeitos de exposição a reagentes à níveis de temperaturas aceitáveis, já que o mesmo tem constituição percentual muita baixa de oxigênio [CDA,1998].

Sendo a corrente elétrica inversamente proporcional a tensão elétrica, pela primeira lei de Ohm<sup>1</sup>, conclui-se que as seções circulares dos fios de Baixa Tensão serão maiores que as necessárias para os de Alta Tensão (acima de 1.000 Volts). Então, em função da corrente elétrica circulante para cargas de Potência nominal (pela regra de Potência constante [Gallardo, 2005]) tem-se uma bitola de seção circular específica, para cada nível de tensão e corrente, minimizando as perdas por aquecimento dos fios quando da passagem da corrente elétrica.

Por menor que sejam os efeitos da circulação de correntes elétricas em curto-circuito, em razão do tempo de exposição nos fios de cobre, há sempre um gradiente acumulativo na degradação dos mesmos, disso decorre, em muitos casos, o recozimento precoce desses fios diminuindo a capacidade operativa dos mesmos. Desta causa surge o efeito, em função da temperatura de exposição, da dilatação dos condutores dispostos em espaçamento vertical de 20 (vinte) centímetros entre eles, ancorados entre distâncias que variam de 30 (trinta) até algumas centenas de metros [Celesc,2002]. Essa dilatação pode produzir a conseqüência indesejável de contato dos condutores entre fases ou neutro, estabelecendo a formação de curto-circuito, que em algumas situações provoca o rompimento do fio de Cobre naquele determinado ponto.

---

<sup>1</sup> Lei de Ohm – segundo George Simon Ohm, em 1827, a resistência elétrica de um fio tem dependência direta entre a diferença de potencial e corrente, assim  $V = R.i$

## **1.2 Justificativa**

A análise destes eventos, onde ocorre o aquecimento extremo no fio de cobre em consequência da intensidade de corrente elétrica circulante, possibilita a indicação de pontos onde existem fortes indicativos de ocorrências futuras de rompimentos da fiação quando da ação de curto-circuito, sendo através de manutenções preditivas e/ou preventivas minimizado substancialmente intervenções de manutenções corretivas das concessionárias de energia elétrica nas linhas de distribuição de energia elétrica. Decorre disso a eliminação de re-trabalho operacional e conseqüente incremento no índice de satisfação dos consumidores destas concessionárias, tanto pela qualidade, reduzindo os níveis de perdas apresentados, quanto pela confiabilidade/continuidade do fornecimento.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O presente trabalho teve como objetivo estudar as prováveis causas de alterações das características mecânica e elétrica do fio de cobre eletrolítico ETP C110, têmpera meio-duro, aplicado em linhas aéreas de distribuição de energia elétrica. Este estudo verificou a influência decorrente das variações da temperatura de incidência, originadas pela passagem da corrente elétrica conjuntamente às condições ambientais de exposição, na resistência a tração e resistência elétrica nominal.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Sob corpos de prova do material, submetidos em diferentes níveis de intensidade de corrente elétrica, pretende-se:

- analisar as propriedades elétrica através da medição de resistividade e condutibilidade elétrica nominal.

- analisar as propriedades térmica buscando avaliar o comportamento para temperaturas de exposição.
- analisar as propriedades mecânicas, microestrutura, em função da resistência máxima à tração e tenacidade.
- analisar o estabelecimento das relações entre a vida útil do fio em função das condições de corrente.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cobre utilizado como cabo para a condução de eletricidade na rede de distribuição tem algumas como japonês da JSA (Japan Standart Association) é denominado como C1100; No Reino Unido é denominado de Cu-ETP através do padrão britânico BS EN; na Alemanha pelo sistema DIN como E-Cu-5X (Eletrolítico Tenaz); no sistema americano ASTM B é denominado ETP-UNS (Unificate Number Sistem) é denotado por C11000. Neste trabalho o cobre está referenciado como eletrolítico tenaz desoxidado à Fósforo – ETP, de seção circular, trefilado à frio em têmpera meio-duro.

### 2.1 Cobre e suas características

O elemento químico Cobre, derivado do Latim Cumprum, identificado na tabela periódica pelo acrônimo Cu, apresenta como características de composição genérica, entre outras: estrutura cristalina CFC (Cúbica de Face Centrada),  $8.940\text{kg/m}^3$  de densidade, ponto de fusão em  $1084^\circ$  à pressão constante conforme figura (1). Sua utilização tem sido as mais diversas desde sua difusão, seja em ligas, como é desde a era do bronze, há alguns milhares de anos anteriormente a era cristã, ou tendo seu uso como metal considerado puro em aplicações objetivando a condução de calor ou eletricidade.

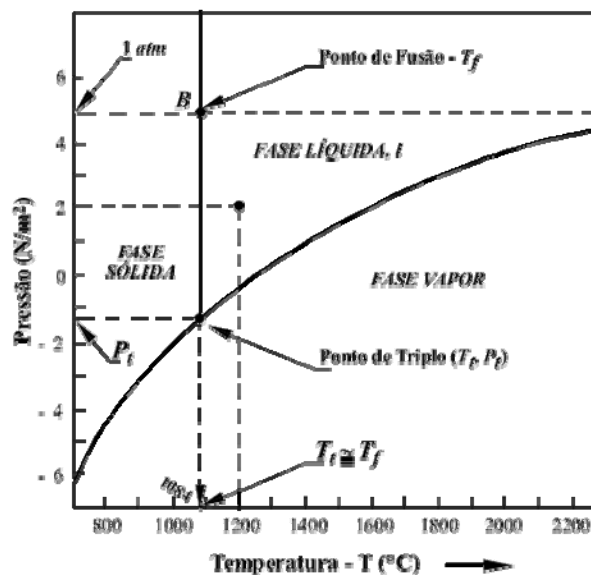


Figura 1 – caracterização dos pontos de equilíbrio do Cobre  
Fonte: adaptado de [Davis,2001].

[Fernández, 2004] descreve em seu trabalho, conforme tabela (1) com exceção da Prata, o Cobre é o metal de melhor comportamento sob os aspectos de condutividade elétrica e térmica, além de boa conformabilidade em razão da sua ductibilidade, boa resistência à corrosão quando exposto a soluções aquosas e químicas.

Tabela 1 – Condutividade Térmica e Elétrica de alguns elementos materiais

Características	Cobre puro	Cobre ETP	Prata (Ag)	Alumínio (Al)	Ouro (Au)	Ferro (Fe)	Níquel (Ni)	Zinco (Zn)	Tungstênio (W)
<b>Condutividade Elétrica (%IACS)</b>	103,6	101	106	65	73,4	17,6	25,2	28,27	30
<b>Condutividade Térmica (W/m.K)</b>	398	391	428	247	317,9	80,4	82,9	113	160

Fonte: adaptado de [Fernández, 2004]

Disposto na natureza, o minério de cobre, apresenta até 2,5 % de cobre no composto; através de processos de moagem e imersão química obtém-se a concentração de cobre com cerca de 30 à 38 % de pureza; seqüencialmente aplicando-se metodologia de pirometalurgia (oxidação em estado líquido por fundição) o produto apresenta pureza de 98,5 %; posteriormente com aproximadamente 99,7% de pureza têm-se o anodo de cobre, após eliminação de impurezas como enxofre, ferro, cobalto, níquel, arsênio, chumbo, zinco, entre outros; por fim é obtido o cobre eletrolítico, com 99,9 % de pureza, nos catodos de cobre, utilizando-se técnicas de refinamento por eletrólise (íons de cobre suspensos migram do anodo para o catodo); o teor de oxigênio deve estar com valores menores que 450 ppm [Caraíba, 2007].

Cobres com aplicações comerciais específicas em condutividade, sendo elétrica ou térmica, são qualificados e classificados em razão do percentual de Oxigênio em sua composição. Nesse contexto, segundo [SCDA,2008] e [Fernández, 2004], quatro tipos estão dispostos no mercado com funções pontuais quanto a sua aplicação: o Cobre Livre de Oxigênio (Cu-OF), o Cobre contendo Oxigênio (Cu-O), o Cobre Desoxidado à fosforo (DHP ou DLP) e o Cobre refinado à altas temperaturas.

O Cobre Livre de Oxigênio Cu-OF quando fundido é protegido da interferência do ambiente da atmosfera, ou seja, o Oxigênio é mantido ausente do ambiente de fundição, seja pela utilização de elementos isolantes ou produzindo-se a fusão no vácuo, contudo o

composto pode ter uma concentração próximo a 10 ppm de Oxigênio, [Fernández, 2004]. Deste processo obtém-se o produto com pureza mínima de 99,95%, ou 99,99% para o Cobre Livre de Oxigênio de alta pureza (Cu-OFE), condutividade variando entre 101 e 101,8% do IACS<sup>2</sup>, qualificando-o para aplicações onde a necessidade de condutividade esteja acentuada, como é o caso de dispositivos eletrônicos. Para esses tipos de cobres a condutividade é extremamente influenciável pela variação de impurezas.

O Cobre contendo Oxigênio (Cu-O), também denominado Cu-ETP, apresenta o Oxigênio dissolvido no processo de fundição do mesmo em cerca de 100 a 650 ppm, [Fernández, 2004], durante a formação da estrutura cristalina solidificada, fato este que o torna, bem, menos sensível a impurezas no composto.

Ainda, segundo [SCDA,2008] e [Fernández, 2004] o Cobre apresenta outras formatações de refinamento. Em uma dessas, adiciona-se ao composto um agente desoxidante, em alguns casos o Fósforo em cerca de 5 à 40 ppm, objetivando, diretamente, a remoção do Oxigênio durante a fundição e o controle do tamanho de grão da estrutura cristalina. A nomenclatura relacionada a esse tipo é classificada como Phosphorus Deoxidized, Cu-DHP (High-0,015-0,040% de P) e Cu-DLP (Low-0,005-0,013% de P). Outro tipo, o Cobre refinado à altas temperaturas agrega elementos em sua formação como por exemplo, Prata, Arsênio, Antimônio, Fósforo e Telúrio, contudo a pureza deve permanecer em parâmetros próximos a 99,88% de pureza.

### **2.1.1 Caracterização do produto sob estudo – fios de cobre ETP**

Inicialmente o produto obtido apresenta formato laminado em placas, tiras e barras; através do processo de trefilação, o cobre ETP, adquire seção transversal circular. As têmperas mole, meio-mole, meio-duro ou duro denominam o grau de encruamento absorvido, e conseqüente alongamento no formato dos grãos como mostra a fig. (2). Deste processo têm-se no produto, características ótimas para utilização do mesmo na função de condutores de energia elétrica, em razão do formato e tamanho de grão na cadeia cristalina deste cobre, ou seja, o condutor produzido absorve propriedades satisfatórias de resistência

---

<sup>2</sup> IACS – International Annealed Copper Standart: padrão de condutividade elétrica mundial, sendo 100% IACS designado como 58 MegaSiemens por metro (MS/m), apresentando a equivalência de 1/58 ohm por metro ( $\Omega/m$ ) de resistividade elétrica para um fio com seção transversal em  $mm^2$ . [Fernández, 2004].

a tração, através da formação de têmpera meio-duro, sem produzir acentuadas modificações nas características elétricas do mesmo.

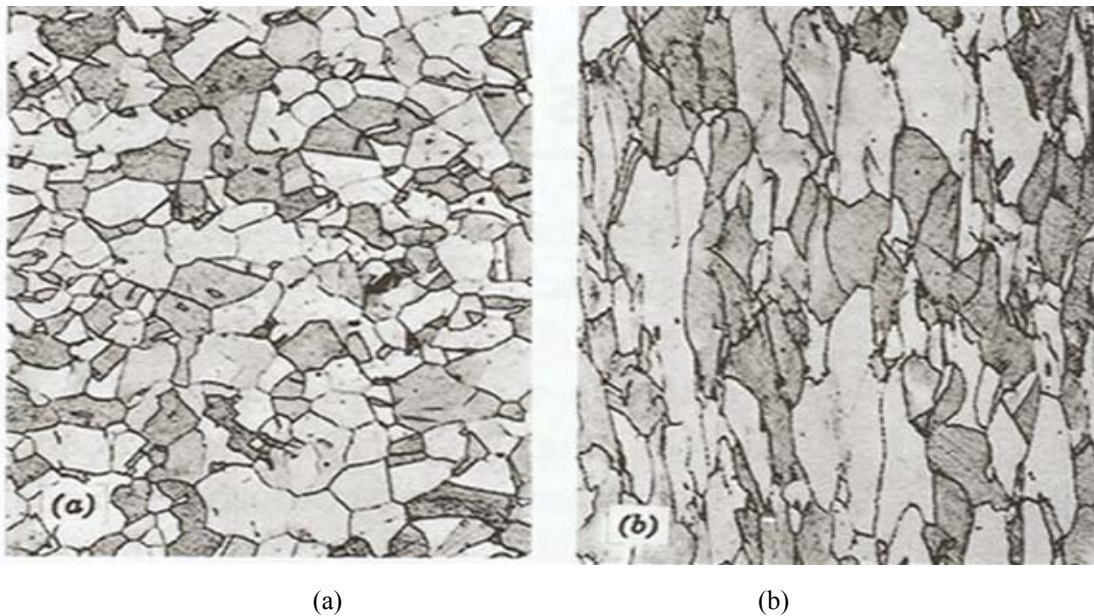


Figura 2 – Imagens de micrografias de cobre puro: (a) material solidificado - grãos equiaxiais, e (b) grão encruado após processo de trefilação

Fonte: [callister,2008].

Percebe-se, na fig. (2), os contornos de grão e as maclas. Torna-se evidente a manutenção da quantidade de grãos produzindo desta forma grãos alongados progressivamente; ainda é possível identificar que quanto maior o ângulo entre os grãos, menor será o escorregamento do mesmo. Contudo quanto maior o alongamento, em concordância com a teoria da constância do volume, menor é o diâmetro sob o ponto de vista da seção transversal do material, em sendo assim, o encruamento disponibiliza ao produto maior resistência a deformações plásticas futuras, já que a redução no tamanho (diâmetro) do grão aumenta substancialmente o limite de escoamento, como demonstra a fig. (3) a seguir.

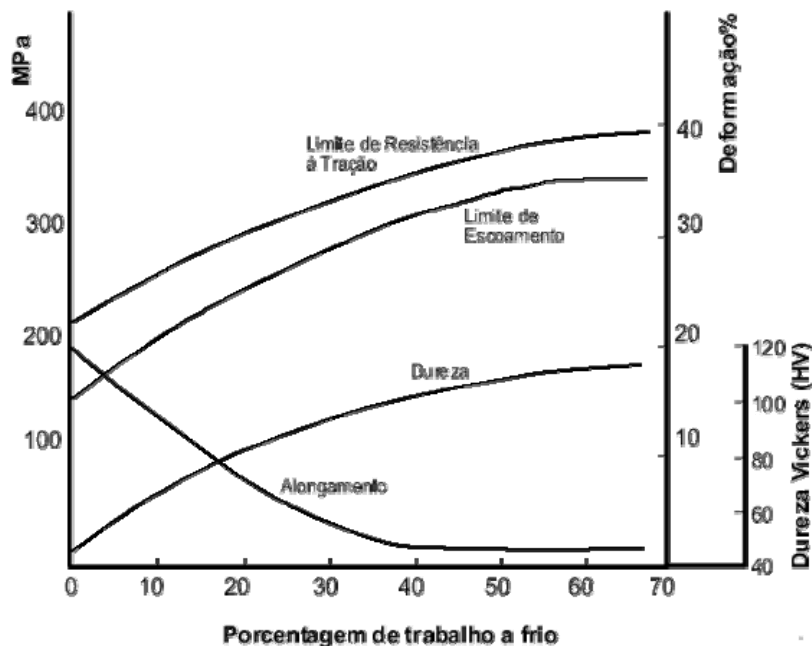


Figura 3 – influência do trabalho a frio nas características mecânicas do cobre  
 Fonte: adaptado de [Askeland, 1988].

## 2.2 Caracterização e capacidade de condução de corrente elétrica do cobre ETP

Um bom condutor por definição é um material que apresenta ligações metálicas entre átomos diferentes de mesma configuração, através da mobilidade e do espalhamento dos mesmos, produzido pela forças de atração dos núcleos dos átomos (íons), induzindo a esses elétrons direções aleatórias, formando uma “nuvem” de elétrons.

Sabe-se pelos conceitos científicos que os átomos da estrutura dos cristais mantêm-se inertes somente na referência de zero absoluto, ou seja, 0 (zero) Kelvin [Padilha,1996] e [Padilha, 2000]; a partir da variação da temperatura os mesmos se dispersam, nos limites da rede, influenciados pelas frequências da energia térmica impostas aos átomos de forma vibracional, estabelecendo conceitos de mobilidade aos mesmos ao longo do reticulado, difundindo-se na massa do volume interno, superficialmente e entre as fronteiras de orientação dos grãos, produzindo efeitos do mecanismo de transporte de material pelo movimento atômico aleatório.

## 2.3 Difusão no comportamento de crescimento de grão

Em materiais sólidos, mantendo-se condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o deslocamento de átomos no reticulado cristalino ocorre de forma imperceptível, devido a existência de posições de equilíbrio bem definidas, sendo condicionado aos limites da superfície da estrutura do material, o que corresponde a diferentes intensidades de concentração de energia necessárias para mobilização dos átomos. O gradiente de energia sofre variação com influência da quantidade de átomos adjacentes a migração; dessa forma quanto maior a quantidade de ligações adjacentes maior a energia necessária para produzir o deslocamento do átomo na cadeia do reticulado.

Para materiais com grau pureza como o cobre ETP o deslocamento atômico ocorre pelo fenômeno da *autodifusão*, cuja dispersão de átomos acontece pela migração e alocação em distorções/imperfeições da estrutura do reticulado, sendo este deslocamento produto da ocupação em lacunas atômicas através da ocorrência de efeitos termodinâmicos. Na autodifusão o soluto e solvente são átomos de mesmas características, não ocorrendo variação na concentração de elementos difundidos.

### 2.3.1 Mobilidade atômica no crescimento de grãos

Todos os metais contêm imperfeições intrínsecas no arranjo reticulado dos átomos, as quais possuem um efeito significativo no comportamento deste metal sob eventos controlados ou aleatórios; entre esses eventos inclui-se influência da temperatura nas propriedades elétricas e outros.

As imperfeições da rede são divididas em três tipos:

- defeitos pontuais: defeitos associados a posições atômicas (uma ou duas); são interrupções no arranjo atômico de uma estrutura cristalina. Normalmente, estas imperfeições, nos materiais, são impostas pela movimentação de átomos através de princípios termodinâmicos, durante o processamento do material, introduzindo impurezas. São exemplos de defeitos pontuais: lacunas atômicas, defeitos substitucionais ou intersticiais e pares de imperfeições;
- defeitos lineares: defeitos associados geralmente a estrutura de um único plano cristalográfico (uma dimensão); são impostos pela distorção da estrutura cristalina através

de tensões de tração, compressão ou de cisalhamento. A resistência Mecânica pode ser aumentada restringindo-se o movimento das discordâncias. São exemplos de defeitos lineares: discordâncias advindas de tensões na produção ou conformação mecânica;

– defeitos superficiais: defeitos associados a estrutura entre dois planos cristalográficos (duas dimensões); são os contornos que separam o material em regiões (grãos), cada região possuindo a mesma estrutura cristalina, mas orientação diferente. São exemplos de defeitos superficiais: contornos de grãos e contornos de macla.

A figura a seguir (fig. 4) ilustra a escala dimensional das imperfeições impostas por defeitos na estrutura cristalina dos materiais.

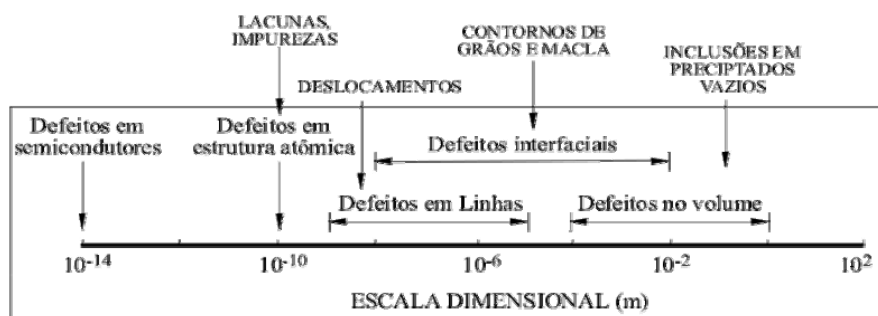


Figura 4 – Escala dimensional de representação de defeitos na estrutura cristalográfica dos materiais  
Fonte: adaptado de [Czichos et al, 2006]

Lacunas, ou imperfeições na forma de rupturas de sua organização cristalina causadas no processo de solidificação ou devido a vibrações térmicas do material, são consideradas os defeitos pontuais mais simples na estrutura cristalográfica dos sólidos, sendo descrita como a ausência de um átomo na cadeia de formação do reticulado, disponibilizando energia de ativação vibracional suficiente para novas ocupações por átomos migrantes; possui características de migração/deslocamento de local de átomos entre sítios da estrutura do material; apresenta a característica de aumento na concentração desses defeitos termodinâmicos com valores de temperatura incrementados, produzindo proporcionalidade do número de lacunas em razão da quantidade de átomos no espaço observado. Este tipo de defeito é importante no transporte de matéria no interior do cristal (difusão volumétrica).

A partir da determinação da quantidade de lacunas [Mercier et al,2005] especifica a eq. (1), como sendo parâmetros descritos pela Lei de Arrhenius<sup>3</sup>, e intrinsecamente podemos atentar para propriedades importantes na condutividade térmica/elétrica, principalmente, para o cobre, em virtude da dificuldade impostas pelos espaços vazios adjacentes ao sentido dos elétrons livres.

$$N_l = N. \exp\left(-\frac{Q}{K_B \cdot T}\right) \quad (01)$$

Onde:

$N_l$ : número de lacunas por  $\text{cm}^3$ ;

$N$ : quantidade de átomos no espaço observado por  $\text{cm}^3$ ;

$Q_l$ : Energia necessária para formação de uma lacuna (eV/átomo) (eV/at);

$k_B$ : Constante de Boltzmann<sup>4</sup>; e

$T$ : Temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{C} + 273$ ) em K.

Produzindo-se variações de temperatura e analisando o comportamento das características do cobre ETP, teremos conseqüências diretas nas funcionalidades intrínsecas ao mesmo enquanto condutor de energia elétrica; dessa forma teremos num volume referente a 1 (um)  $\text{cm}^3$ : um átomo de cobre apresenta Densidade (d) igual a  $8,94 \text{ g/cm}^3$ , Massa Molar (M) de  $63,55 \text{ g/mol}$ , e sabendo-se que o número de Avogrado ( $N_A$ ) é  $6,023 \times 10^{23}$  átomos/mol [Padilha et al, 1996], podemos calcular a quantidade de lacunas e elétrons livres para a unidade de volume, como sendo:

$N = 8,476 \times 10^{22} \rightarrow$  quantidade de átomos de cobre por volume ( $\text{cm}^3$ ). Segundo [Peralta,1995] cada átomo de cobre disponibiliza à rede cristalográfica em média um elétron livre; assim pode-se inferir que em cada  $\text{cm}^3$  de material de cobre teremos em média até  $8,476 \times 10^{22}$  *elétrons livres*.

Analogamente, aplicando-se a eq. (1) nos valores obtidos teremos a quantidade de lacunas na estrutura de cobre com gradiente de temperatura em função da variação na aplicação de corrente elétrica de trabalho médias, onde:  $Q_l = 0,9 \text{ eV/átomo}$ ; para o gradiente de temperatura, demonstra-se na fig. (5) o comportamento do gradiente da

<sup>3</sup> Svante August Arrhenius, químico sueco (1859-1927). Estabeleceu critérios em sua lei para processos dependentes da influência da variação da temperatura.

<sup>4</sup> Ludwig Eduard Boltzmann, físico austríaco (1844-1906). Obtém-se o valor da constante de Boltzmann ( $k_B$ ) fazendo-se a relação da constante dos gases perfeitos ( $R$ ) pelo número de Avogadro ( $N_A$ ). Então  $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ou  $8,617 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$  ou  $\text{J/Mol}$ .



temperatura produzido por corrente em eventos possíveis em redes elétricas e a variação da quantidade de lacunas por  $\text{cm}^3$  no cobre.

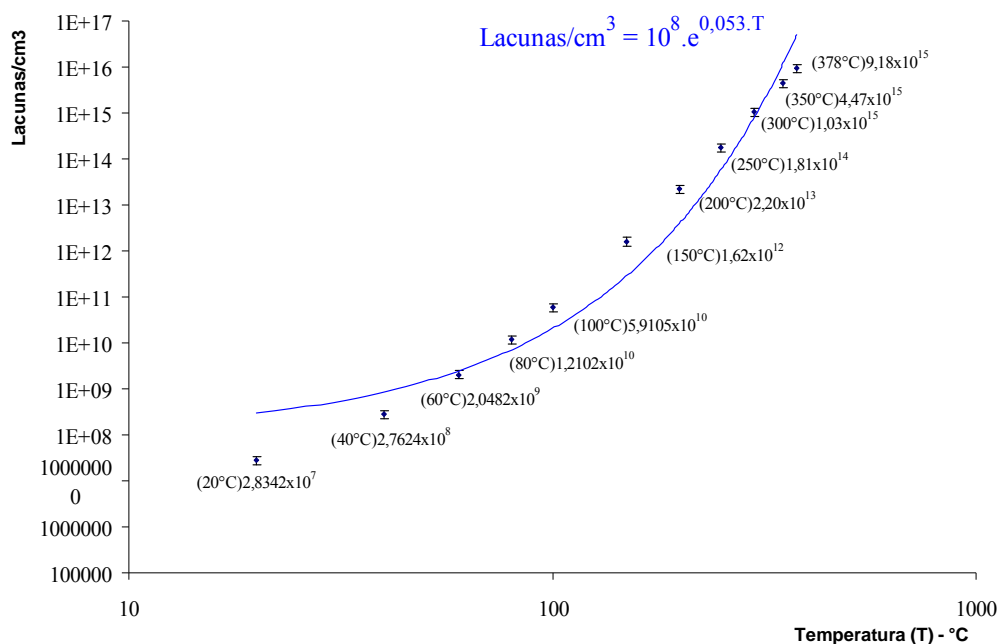


Figura 5 – Quantidade de lacunas por  $\text{cm}^3$  com variação da temperatura para o condutor de cobre

Analisando-se o trabalho de [Mercier et al,2005], o mesmo aponta a existência de equilíbrio na concentração de lacunas em função da temperatura. Este fator aumenta com a variação da temperatura, e tende a valores muito baixos com temperaturas próximas a 0K. À temperaturas próximo ao ponto de fusão (1356K), a concentração é cerca de 1 para 2500 locais (0,04%). À baixas temperaturas, o equilíbrio na concentração de lacunas, é consideravelmente reduzido; a temperatura ambiente, por exemplo, é igual a  $10^{-17}$  contra  $3 \times 10^{-4}$  próximo ao ponto de fusão.

Ainda, segundo a eq. (1) para uma temperatura próximo a de fusão do cobre a quantidade de lacunas chegará ao seu estágio de maior percentual sobre a quantidade de átomos; assim para 1273K (1000°C) teremos aproximadamente  $2,32388 \times 10^{19}$  lacunas ( $T_{f_{\text{cobre}}} \approx 1.084^\circ\text{C}$ ), o que representa 0,027417173% sobre o total de átomos num  $\text{cm}^3$ , ou seja 3.650 vezes a quantidade de lacunas. Para um valor de temperatura próximo a 353K (80°C), foco deste trabalho, tem-se  $2,330955 \times 10^{10}$  lacunas, cerca de  $2,75 \times 10^{-11}\%$  sobre o total de átomos em um  $\text{cm}^3$ .

O cobre ETP em função de suas características intrínsecas, cuja estrutura dos cristais se apresenta como Cúbica de Face Centrada – CFC, sofre alterações significativas no formato e tamanho do grão, quando da exposição à temperaturas acima do valor limite conhecido como de recuperação (20% da temperatura de fusão) [Padilha et al, 1996], através do princípio da *autodifusão*; se um átomo que está adjacente a uma lacuna tiver energia de ativação (vibracional) suficiente, pode quebrar sua ligação atômica que une-o à átomos vizinhos, e então, mover-se para a posição da lacuna, conforme descrito em [Padilha,1996]. Portanto quanto maior a temperatura, maior a energia de ativação do átomo na autodifusão; daí a implicação da variação de temperatura influenciar no crescimento de grãos pela migração dos contornos desses, resultante do alívio de tensões nos próprios contornos fig. (6) e conseqüente fluência das lacunas.

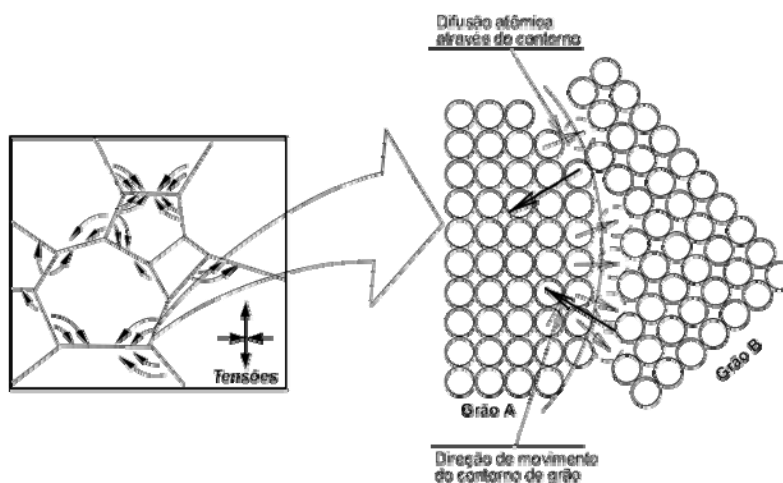


Figura 6 – Crescimento de grão pela difusão atômica  
Fonte: Adaptado de [Callister,2008]

Segundo [Mehrer,2007] o período médio de deslocamento de átomos entre sítios de lacunas, é dado pelo recíproco da frequência vibracional, sendo aproximadamente entre  $10^{-12}$  e  $10^{-13}$  segundos.

A velocidade com que se desenvolve a autodifusão está associada diretamente a variação de temperatura do material, haja vista que quanto maior a temperatura, maior será a dissipação de lacunas pela formação de defeitos atômicos e, naturalmente, maior será a mobilidade atômica.

A difusão em sólidos acontece em três meios de propagação diferentes: difusão na superfície, difusão no volume do material e difusão nos contornos de grão.

Tabela 2 – Parâmetros para difusão do cobre e ligas

Elementos da Difusão	Difusão Volumétrica		Difusão superficial	
	$D_0$ ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ )	$Q_v$ (kcal/mol)	$D_0$ ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ )	$Q_v$ (kcal/mol)
Cobre (autodifusão)	0,6 – 0,78	50,5 – 50,9	1000	39
Níquel em cobre	$6,5 \times 10^{-5}$	30	--	--
Estanho em cobre	$4,1 \times 10^{-3}$	31	--	--
Zinco em cobre	$2,4 \times 10^{-3}$	30	--	--
Bronze	$6,0 \times 10^{-6}$	25	800	49

Fonte: [Davis, 2001]

Segundo [Davis, 2001] a energia de ativação na difusão volumétrica é a maior dos três casos, seguida pela energia na difusão nos contornos de grão e na difusão superficial, respectivamente; a energia de ativação, que é responsável pela frequência vibracional dos átomos, estão descritas na tabela (2).

Geralmente, a difusão atômica em metais se propaga mais rapidamente ao longo dos contornos de grão, e a frequência vibracional nestes pontos pode atingir valores em torno de um milhão de vezes maior do que em átomos do reticulado regular à temperaturas de  $2T_f/3$  (onde  $T_f$  é a temperatura de fusão). Devido a alta mobilidade no contorno de grão tem-se uma condição crucial na cinética das alterações das microestruturas durante os processos metalúrgicos de reações no estado sólido. [Davis, 2001].

O cobre ETP apresenta propriedades importantes quanto a condução elétrica, onde um percentual da quantidade de elétrons livres, inicialmente dispersos no material a velocidade proporcional e desordenados orientam-se a partir da aplicação de uma força eletromotriz (no caso a diferença de potencial - ddp) entre as duas extremidades do material, fazendo-os realizar o deslocamento, agora, ordenado e seqüencial ao longo do circuito conectado, com intensidade diretamente proporcional à carga elétrica concentrada no mesmo, em direção oposta ao campo elétrico a qual o deslocou; emergindo assim os conceitos de intensidade de corrente elétrica, haja vista que tem-se para cada elétron o valor de carga elementar ( $e^-$ ) igual a  $-1,602 \times 10^{-19}$  Coulomb. Desta forma ocorre a implicação de proporcionalidade da seção transversal e da intensidade de corrente elétrica no condutor de cobre, já que num fio de maior diâmetro há um incremento na quantidade de elétrons livres deslocados.

A facilidade com que a “doação” de elétrons ocorre denomina-se condutividade, que está vinculado ao recíproco da resistividade de determinado material.

## 2.4 Características e comportamento impostos pela Resistência à Tração do cobre ETP

Para o cobre utilizado em fios sem camada de isolamento (nu), das redes de energia, as características mecânicas em comportamento à esforços na tração por ancoragem em estruturas de postes ou portais são cruciais a estabilidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica.

Utiliza-se condutores com seção circular em tempera meio-duro, que apresenta comportamento razoável a maleabilidade e flexibilidade no manuseio de adequação da infra-estrutura, uma vez que a tração é significativa em função do próprio peso dos condutores com representatividade intensificada no meio dos vão entre os postes, variando em função da distância entre eles.

A têmpera obtida, no processo de trefilação, é consequência da quantidade de passagem, controladas, do material por fieiras seqüenciais até resultar-se no diâmetro esperado. O resultado desse processo é um produto de resistência a tração e dureza compatíveis com as necessidades específicas na aplicação em esforço contínuo imposto pela ação de ventos e variação da temperatura ambiente. A tab. (3), a seguir, indica propriedades mecânicas do fio de cobre meio duro de diâmetros diversos.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas para fios de cobre meio duro (à 20°C)

<i>Diâmetro Nominal (mm)</i>		<i>Resistência à Tração (MPa)</i>		<i>Alongamento pelo comprimento da amostra (%)</i>	
<i>Superior à</i>	<i>Inferior à</i>	<i>Minima</i>	<i>Máxima</i>	<i>250 mm</i>	<i>1.500 mm</i>
1,00	1,06	366	432	-	0,88
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3,75	4,25	338	401	-	1,15
4,25	4,75	336	397	2,00	1,20
4,75	5,30	333	392	2,10	1,25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10,60	11,80	290	332	3,75	-

Fonte: adaptado da tabela A.3 da NBR 5111.

Conforme descreve [CDA,1998] os valores apresentados para caracterização dos diversos tipos de cobre apontam para as propriedades mecânicas típicas referentes ao cobre ETP como sendo: Resistência a tração de 200-400 N/mm<sup>2</sup>, Deformação produzida de 50-5 %, e Dureza de 40-120 HV, dependendo do grau de encruamento obtido em processos de trefilação e laminação do material, observadas na fig. (3),

Percebe-se pela figura anterior que a relação entre as propriedades mecânicas produzidas por processos envolvendo deformação, mesmo que proporcional não apresentam linearidade, e dependendo do nível de encruamento produzido torna-se necessário proceder-se com o processo de recristalização para alívio das tensões impostas. No caso do cobre caracterizado com fio condutor de energia este encruamento traz benefícios a resistência à tração, haja vista a necessidade de material com região elástica razoavelmente equilibrada quando da tração imposta por mecanismo de retensionamento de condutores (catracas e/ou esticadores), ou seja o condutor é tracionado para simetria entre as distâncias das fases e fase e neutro, entretanto o mesmo deve retornar a posição de partida quando retirado do retensionamento. Este efeito não acontece nos condutores com alto índice de recristalização, onde o recozimento produzido pela variação excessiva de corrente elétrica diminui a elasticidade a níveis críticos, tornando o fio descaracterizado para a condução de eletricidade a níveis operacionais.

Dureza de um material é a propriedade física que descreve a resistência deste quando sendo penetrado por outro material, conforme descrito em [Fernández, 2004].

No trabalho publicado de [Ferreira et al, 1999] aponta-se como dureza média para condutores de cobres analisadas pelo ensaio de dureza Vickers o valor de 55,2HV, indicando um desvio padrão máximo para análises em cinco (5) corpos de provas de 3,14%.

## **2.5 Resistividade e Condutividade elétrica em materiais metálicos**

Quando relata-se aspectos influentes às propriedades elétricas de metais considerando-se a microestrutura do material as particularidades do comportamento, no contexto de Condutividade ou Resistividade elétrica, estende-se a compreensão das estruturas à nível sub-atômico, considerando-se os conceitos de estrutura eletrônica, níveis de energia e bandas de energia, descrito em [Padilha, 2000].

A resistividade de um material está diretamente relacionada ao evento de mobilização de elétrons livres na migração dos mesmos nas regiões da estrutura cristalina, onde ocorre a difusão de átomos por razões de concentração acentuada da energia de ativação (térmica), nesta situação uma quantidade de elétrons livres desorienta-se, redirecionando-se suas rotas, por influência direta do impacto/choque dos mesmos nos átomos em frequência de vibração.

A definição de Resistividade elétrica é exibida claramente em [Rossiter, 1991], onde numa estrutura cristalina sob influência de um campo (que produza diferença de potencial entre as extremidades) a “Resistividade é determinada pela taxa com que alguns elétrons, do contingente do vetor (nuvem) iônico, sofrem espalhamento de um estado inicial  $\phi_k$  até um estado final  $\psi_k$ ”.

As postulações de Einstein<sup>5</sup> e Fermi<sup>6</sup> propunham a influência dos íons em materiais metálicos sólidos, a partir de vibrações, produzidas por excitações térmicas, considerando influência do calor específico do material. A quantização dessa energia produz vínculo vibracional, assim como na trajetória de espalhamento do elétron livre.

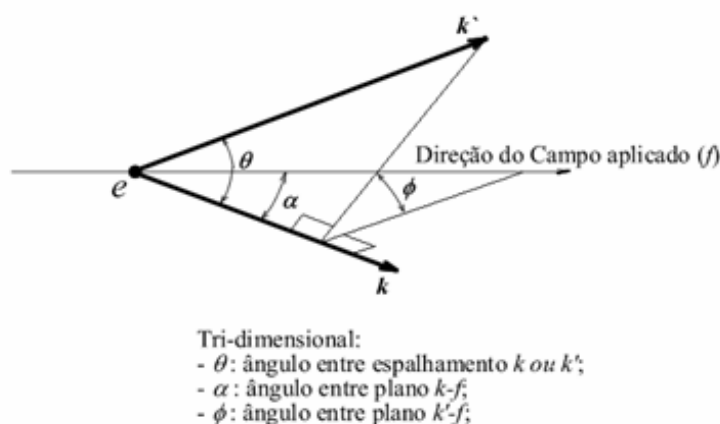


Figura 7 – Espalhamento tri-dimensional do elétron  $e$ , orientado pelo vetor  $k$ , na análise sob planos relacionados ao campo aplicado

Fonte: [Rossiter, 1991].

<sup>5</sup> Albert Einstein: físico alemão (1879-1955) – demonstra a dependência de  $T$  do calor específicos dos sólidos ao admitir que a vibração térmica dos átomos era quantizada. [Bassalo,1992].

<sup>6</sup> Enrico Fermi: físico italiano (1901-1954) – calculou o número médio de partículas com energia. Átomos ou moléculas em equilíbrio térmico absorvam o estado de energia estimulado. [Bassalo,1992].

A fig (7) confirma para [Rossiter, 1991], de quanto maior for o ângulo de espalhamento maior a influência na intensidade da Resistividade, ou seja, quanto maior o ângulo  $\theta$ , maior o percurso e atenuação dos elétrons livres.

O princípio da condução eletrônica ajusta-se aos pré-requisitos do deslocamento de partículas eletricamente carregadas com o movimento proposto pelas forças de atuação de um campo elétrico aplicado. A energia necessária para produzir esse deslocamento, nos sólidos de estrutura atômica cristalina ordenada influencia os estados eletrônicos desses átomos desde que os valores impostos as partículas estejam acima da banda de energia. Dessa forma somente elétrons que possuírem energia maior que a energia de Fermi, nessa banda, serão acelerados pela ação do campo aplicado. Os elétrons excitados, denominados elétrons livres, caracterizam o princípio de circulação da corrente elétrica.

### 2.5.1 Aspectos influentes no comportamento da Resistividade elétrica

Analogamente aos conceitos da terceira lei de Newton, em que para toda ação aparece uma reação, na aceleração dos elétrons livres através do campo aplicado, surge uma força contrária ao sentido do campo, a qual impõe restrições ao livre deslocamento. Essa força aparece na interação de alguns aspectos que impõem efeitos intrínsecos no comportamento da Resistividade elétrica sob o ponto de vista de agentes que incrementam o espalhamento dos elétrons livres.

Esses aspectos produzem variação na resistência impostas em função da intensidade que acontecem, haja vista a proporcionalidade com as particularidades de cada metal. Segundo [Meier et al,2004] e [Padilha, 2000] os agentes influentes no comportamento da Resistividade podem classificar-se em três efeitos, podendo haver simultaneidade ou não, apontando diretamente, para contribuição provenientes de impurezas (defeitos estruturais), temperatura de trabalho (vibrações térmicas) e deformação mecânica (trabalho mecânico). Os aspectos, como citado anteriormente, intensificam o espalhamento dos elétrons estabelecendo vínculo com a Regra de *Matthiessen*<sup>7</sup>, eq. (4):

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (04)$$

---

<sup>7</sup> Augustus Matthiessen: Físico britânico (1831-1870), estabeleceu critérios de análise para teoria da mobilidade dos elétrons.

onde:

$\rho_t$  é a parcela de contribuição das vibrações térmicas;

$\rho_i$  é devida às impurezas; e

$\rho_d$  é a contribuição devida à deformação.

Na proposição de [Cezar, 2006], sob o ponto de vista da periodicidade do potencial elétrico, as impurezas e defeitos cristalinos aumentam a resistividade elétrica dos metais, pois ambos interrompem localmente o mesmo na rede. Já a temperatura induz os vários modos vibracionais dos átomos dificultando o movimento dos elétrons na rede cristalina. Este modelo está representado na fig. (8).

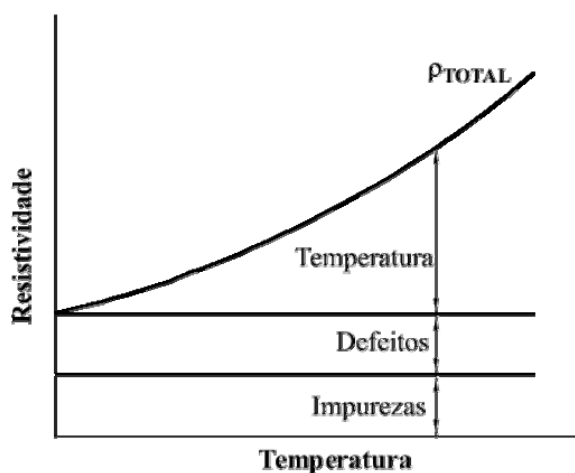


Figura 8 - Curva esquemática da dependência da resistividade elétrica em função da temperatura de um metal qualquer  
Fonte: [Cezar, 2006]

Assim, sendo a Resistividade uma relação em função da variação da temperatura,  $\rho(E_f, T)$ , torna-se muito importante os processos que possam monitorar e controlar a mesma.

### 2.5.2 Comportamento da Resistividade elétrica em função da variação da temperatura

A proporcionalidade do comportamento da Resistividade quando da variação de temperatura é identificada, neste trabalho, como o efeito do processo de circulação de corrente elétrica ao longo do perímetro do metal condutor. Ato contínuo, ao aumentar-se a quantidade de cargas elétricas transportadas, a energia de ativação aumenta e o material sofre influência térmica gradiente, ou seja, quanto maior a corrente elétrica, maior a



temperatura e maior o ângulo do espalhamento de elétrons na estrutura cristalina do material e, conseqüentemente, maior a dificuldade de deslocamento dos próximos elétrons nas posições óbvias a serem ocupadas. O produto desse comportamento é o incremento da resistividade elétrica do material, numa sensibilidade direta, imediatamente após o aumento da temperatura no mesmo.

Em [Bakshi et al, 2005] relata-se que à temperatura de  $-234,5^{\circ}\text{C}$  a Resistividade é muito próxima de zero, podendo ser considerada nula, para materiais de metal puro.

A intensidade do espalhamento dos elétrons livres, apesar de sofrer alternâncias na variação sob efeito da temperatura, pode ser considerada, a partir da temperatura de referência, com um crescimento linear, conforme indica a fig. (9), a seguir. Conforme [Cezar, 2006] e [Bakshi et al, 2005] a resistividade descreve uma parábola anteriormente e posterior a essa linearidade (“segmento de reta”).

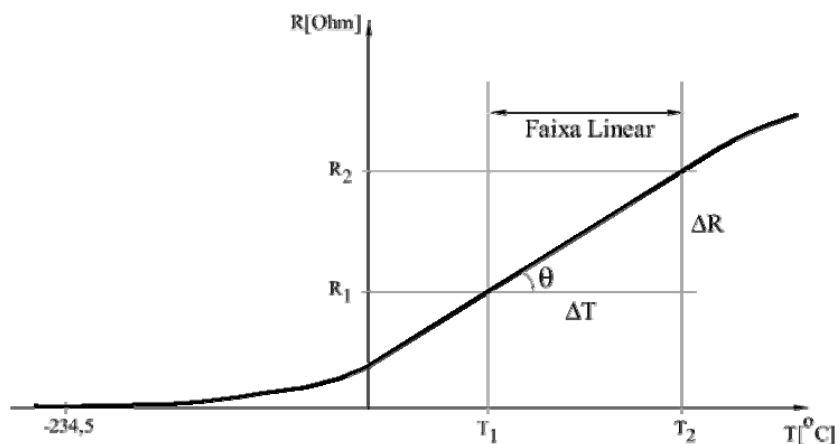


Figura 9 – Função representativa da variação da temperatura em relação a proporcionalidade da resistência.

Fonte: adaptado de [Cezar, 2006] e [Bakshi et al, 2005].

Analisando-se a relação  $\Delta R \times \Delta T$ , na fig. (9), pode-se inferir que a inclinação do coeficiente de variação da temperatura é o fator indicativo do comprometimento na livre vazão dos elétrons; o transporte das cargas elétricas fica atenuado quando do aumento do ângulo do coeficiente.

### 2.5.2.1 Coeficiente de variação da Resistência para temperatura

Atribui-se ao valor obtido à 20°C o padrão adotado como referência e comparações, segundo o IEC – International Electrotechnical Commission.

O coeficiente de variação Resistência em função da temperatura ( $\beta$ ) indica quão severo é a influência da temperatura sobre o material numa determinada relação RxT. Referenciando-se a fig. (9), observa-se que tal coeficiente é encontrado pela aplicação da equação:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad \text{e} \quad \beta_1 = \frac{\operatorname{tg}\theta}{R_1} =$$

onde:

$T_1$  é a temperatura de referência, usualmente 20°C [Bakshi et al, 2005] e [CDA,1998] e  $R_1$  a resistência . Para esse caso:

$$\rho_{T_2} = \rho_{T_1} \cdot [1 + \beta_{T_1-T_2} (T_2 - T_1)] \quad (0.5)$$

Considerando a correspondência na inter-relação da influência da temperatura inferindo efeitos diretos na Resistividade do Cobre em [CDA,1998] o autor considera a variação da Resistividade descrita pela eq. (5).

Onde:  $T_1$  e  $T_2 \rightarrow$  temperaturas inicial e final em °C;

$\rho_{T_1} \rightarrow$  Resistividade na temperatura  $T_1$ ;

$\rho_{T_2} \rightarrow$  Resistividade na temperatura  $T_2$ ;

$\beta_{T_1-T_2} \rightarrow$  coeficiente da Resistividade em relação a variação da temperatura entre  $T_1$  e  $T_2$ .

A tab. (4) mostra o coeficiente de alguns Materiais conhecidos :

Tabela 4 – Resistividade e coeficiente de variação da Resistência para temperatura de materiais à 20°C.

	Materiais					
	Prata	Cobre	Alumínio	Tungstênio	Ferro	Platina
Resistividade $\rho$ ( $\Omega.m$ )	$1,62 \times 10^{-8}$	$1,69 \times 10^{-8}$	$2,75 \times 10^{-8}$	$5,25 \times 10^{-8}$	$9,68 \times 10^{-8}$	$10,6 \times 10^{-8}$
Coeficiente $\beta$ ( $K^{-1}$ )	$4,1 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-3}$

Fonte: [Cezar, 2006]

### 2.5.2.2 Caracterização da Resistividade sob efeito da deformação

Sob o ponto de vista de materiais condutores, um dos aspectos muito relevante é o comportamento da Resistividade quando do estabelecimento da forma geométrica de produção, assim como a estabilidade da mesma em situações de variações da temperatura. Seguindo esse raciocínio, em [CDA,1998] observa-se que, mesmo que pequena, obtém-se uma redução em cerca de 3% (três por cento) nos valores da Condutividade do Cobre em conformação de trabalho a frio quando comparado aos valores nas condições de materiais recozidos, devido ao efeito de tensões retidas na estrutura cristalina. Abstrai-se dessa constatação que o processo de trefilação, com encruamento não severo, acentua a resistência a tração, entretanto, mesmo que mínima, diminui a condutividade de energia elétrica em condutores de Cobre, conforme demonstra a fig. (10).

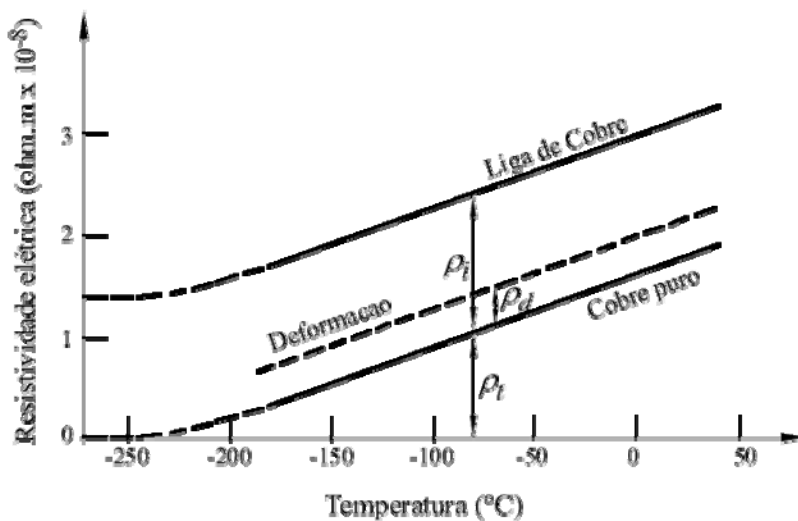


Figura 10 – Representação dos fatores influentes na composição da Resistividade total  
Fonte: adaptado de [Callister,2008].

A metodologia disposta na norma do órgão regulamentador [NBR6815,1981] e [NBR6524,1998], cujo teor expressam de forma tabulada os valores de resistência elétrica do condutor em corrente contínua padronizada, referida a  $20^{\circ}\text{C}$  e a um comprimento de 1 km, conforme tab. (5), a seguir.

Tabela 5 – Valores da resistência elétrica em condutores da classe 1A (condutor de cobre sólido)

Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro Nominal (mm)	Resistência elétrica máxima a 20°C - Ω/km	
		Meio duro	Duro
6	2,80	2,95	2,97
10	3,55	1,84	1,85
<b>16</b>	<b>4,50</b>	<b>1,14</b>	<b>1,15</b>
25	5,60	0,739	0,742
35	6,70	0,516	0,519
50	8,00	0,362	0,364

Fonte: adaptado de [NBR6524,1998].

A tab. (5) descreve valores de resistência para alguns condutores de série métrica comercial, indicando valores referenciais, à temperatura de 20°C com circulação de corrente contínua, subsidiando o dimensionamento em planejamento de projetos, possibilitando a previsão de perdas por dissipação de calor no condutor.

## 2.6 Comportamento da circulação da corrente elétrica acerca da ocupação na seção transversal do condutor elétrico

Inicialmente em condição de distribuição atômica na rede cristalográfica os elétrons livres direcionam-se de forma aleatória. Quando exposto a uma Força Eletro-Motriz – FEM<sup>8</sup>, produzida por fonte de potencial elétrico, os mesmos se ordenam e orientam-se no sentido de fluxo das cargas elétricas estabelecidas pela fonte de potencial elétrico. Deste processo resulta a formação de fluxo de corrente elétrica estabelecido pela Tensão elétrica (potencial entre dois extremos). Para [Cezar, 2006] “a carga em movimento constitui uma corrente e o processo por meio do qual a carga é transportada é chamado de condução”.

A seção transversal delimita a quantidade de carga transportada, e conseqüentemente, a intensidade de corrente elétrica permitida para o condutor em questão, e segundo [Cezar, 2006] “A corrente  $I$  é definida como a taxa do fluxo de carga elétrica

<sup>8</sup> FEM - Força Eletro-Motriz: é a força elétrica mínima requerida para deslocamento dos elétrons livres numa direção ordenada no interior de um condutor. [Bakshi et al, 2005].

através da área da seção transversal de um condutor”. Seja  $dQ$  a carga que passa pela área de uma seção, durante um intervalo de tempo  $dt$ , então tem-se:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (06)$$

A capacidade de transportar corrente elétrica de um condutor dá-se pela uniformidade no diâmetro durante o perímetro (superfície) do mesmo. Entretanto esta análise é verdadeira desde que haja, sobretudo, uniformidade na circulação da própria corrente em toda a abarangência da seção transversal. Contudo isso não acontece sempre dessa forma para todos os casos em relação a ocupação, transversalmente, do condutor.

A reflexão acerca da análise dos tipos de corrente elétrica num sistema qualquer aponta e identifica duas linhas de processamento: comportamento da grandeza elétrica em circuitos sem a variação da mesma ao longo do tempo, ou seja, funcionalidades em Corrente Contínua – CC, e o comportamento em Corrente Alternada – CA, onde os parâmetros das grandezas variam ao longo do tempo, em formato senoidal, em função da frequência e velocidade angular ( $\omega$ ).

### 2.6.1 Circulação da corrente elétrica em circuitos de Corrente Contínua - CC

Em circuitos à CC, como não ocorre variação oscilatória na amplitude da grandeza ao longo do tempo, a corrente elétrica se distribui de forma uniforme ao longo de toda a seção transversal do condutor elétrico, conforme fig.(11).

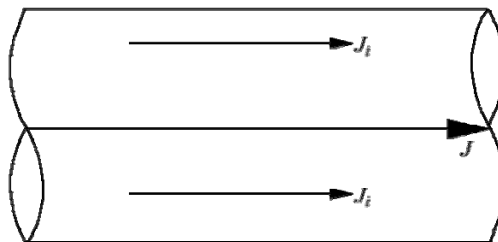


Figura 11 – Comportamento da corrente elétrica em CC no interior de um condutor elétrico

Fonte: adaptado de [Robert, 2000]

Esse comportamento produz um aquecimento, também uniforme, ao longo do perímetro do condutor, haja vista as cargas elétricas de deslocarem ordenada e uniformemente.

## 2.6.2 Circulação da corrente elétrica em circuitos de Corrente Alternada – CA

Quando uma corrente circula internamente em um condutor surge um fluxo magnético, manifestando-se interna e externamente ao mesmo, produzindo o efeito da indutância interna e externa, sendo as mesmas a composição da indutância total no condutor, conforme descrito em [Edminister,2006].

O comportamento da corrente elétrica em CA influencia-se à medida que aumenta a frequência da corrente que percorre o condutor, assim, o campo magnético ( $B$ ), produzido pelo fluxo magnético  $J$ , junto ao centro do condutor também aumenta conduzindo ao aumento da reatância indutiva local, assim demonstrado na fig. (12), a seguir:

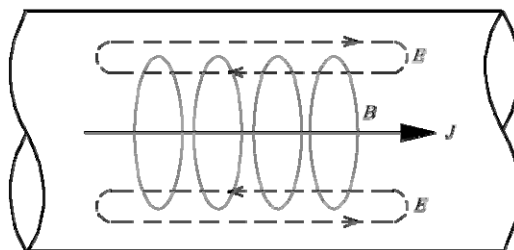


Figura 12 – Comportamento da corrente elétrica em CA no interior de um condutor elétrico  
Fonte: adaptado de [Robert, 2000]

Quando uma corrente alternada flui através de um condutor, o fluxo magnético alternado ( $B$  em  $J$ ) no interior do condutor dá origem a uma FEM induzida ( $E$ ). Essa FEM faz com que a densidade de corrente minimize-se no interior do fio e aumente em sua superfície externa. O resultado, conhecido como efeito pelicular (efeito Skin ou efeito Kelvin), torna-se mais expressivo à medida que a frequência é aumentada, haja vista que a reatância indutiva ( $X_L$ ) depende diretamente da velocidade angular ( $\omega$ ). Assim:

$$X_L = \omega * L , \quad \text{sendo } \omega = 2 \pi f$$

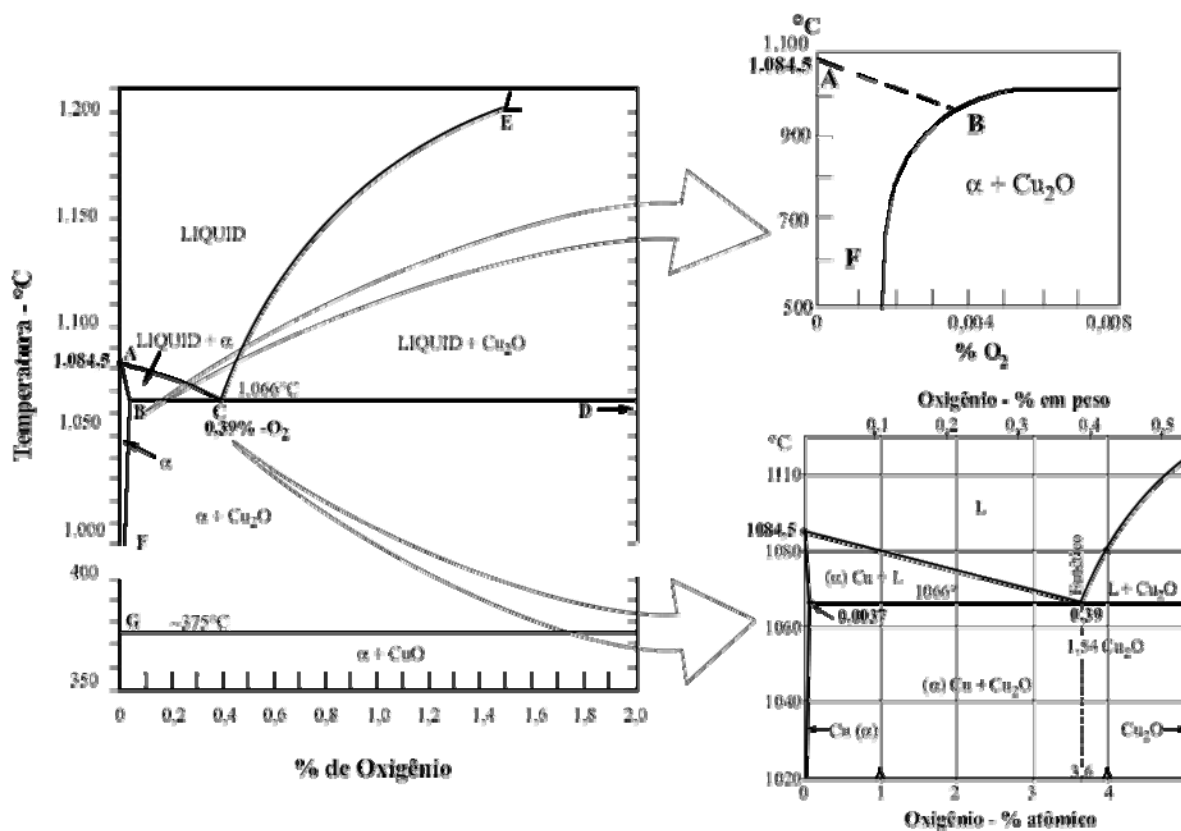
onde:  $L$  é a indutância gerada por  $B$ ; e

$f$  é a frequência operacional.

Para [Corrêa,2006] o efeito pelicular é, então, o fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função da variação exponencial da circulação da corrente elétrica, decrescendo a partir da superfície, produzindo diretamente variação gradiente da temperatura no interior do mesmo.

## 2.7 Oxidação e corrosão

Na publicação [CDA,1992] descrevem-se considerações a respeito da composição do Oxigênio na formação do produto final de Cobre, onde relata-se a característica do sistema Cobre-Oxigênio como um exemplo de sistemas eutéticos simples, conforme demonstra a fig. (13). Em razão da necessidade de alta condutividade o percentual de Oxigênio no Cobre deve ser diminuto, variando à valores, extremos, até 0,65% (650 ppm). Esse percentual deriva-se do processo de solidificação do cobre, como citado anteriormente, haja vista a injeção de ar no processo, objetivando oxidar as impurezas, na proporção que a temperatura é reduzida à velocidade constante, impondo ao produto características de minimização da porosidade e incremento da resistência (Tough Pitch).



Pontos	A	B	C	D	E	F	G
°C	1084,5	1066	1066	1066	1200	600	~375
O <sub>2</sub> (%)	0	~0,008	0,39	11,2	1,5	~0,0017	11,2

Figura 13 – Diagrama de equilíbrio da composição de Oxigênio no Cobre  
Fonte: adaptado de [CDA, 1992] e [Coutinho,1980].

Os fios de cobre resistem à corrosão por umidade, poluição industrial e outras influências atmosféricas que poderiam causar danos ao sistema. Segundo [Rao et al, 2004].

O nível de oxigênio na composição do cobre ETP pode, segundo [Prisedsky et al, 2004], em consequência da exposição atmosféricas e também à temperaturas mais críticas, atribuir características de coloração e impurezas referentes a influência de dois óxidos: o óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), o qual apresenta tonalidade avermelhada devido a exposição atmosférica e à temperaturas superiores a  $375^\circ\text{C}$ , considerado a fase beta da solução Cu-O, a qual apresenta peso percentual de  $\sim 11,2\%$  de Oxigênio ( $\sim 11.200$  ppm); quando exposto a temperaturas abaixo de  $375^\circ\text{C}$  o cobre apresenta tonalidade marrom escuro, fruto da formação de óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ); seqüencialmente a tonalidade absorve tons esverdeados, chamado de pátina [CDA,1998].

Atestando-se a aplicabilidade do cobre em algumas análises sob a condição de condutor de energia elétrica pode-se perceber, através da fig. (14), que a presença de oxigênio na composição do cobre impõe variância no comportamento de condutividade elétrica. Segundo [Fernández, 2004], no gráfico da mesma figura, a posição [1] indica as características do cobre puro (99,99%), [2] e [3] apontam para o cobre puro com percentual de oxigênio, [4] é a posição do cobre ETP, [5] o cobre livre de oxigênio e [6] o cobre extremamente puro com cerca de 99,999% de pureza.

Como produto do processo do refino eletrolítico o cobre ETP absorve um percentual próximo à 0,04% de Oxigênio no composto, como pode ser visto na mesma figura; no ponto [3] a concentração de Oxigênio atinge cerca de 200 ppm, determinando a passividade na oxidação em virtude do aquecimento por temperaturas extremas. No ponto [1] admite-se como valor máximo 26 ppm de concentração, em [Fernández,2004].

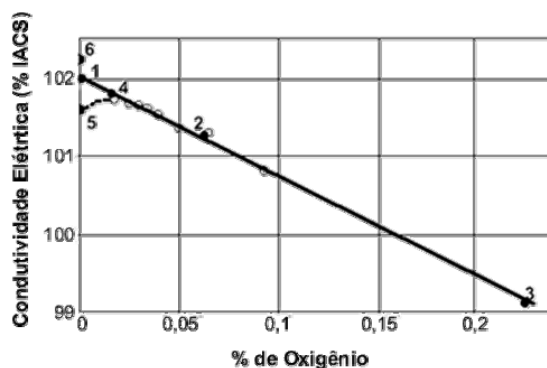


Figura 14 – Influência da presença de oxigênio na composição do cobre  
Fonte: adaptado de [Fernández, 2004]



Relacionado a variação da rede cristalográfica do cobre ETP quando do crescimento do tamanho do grão, da estrutura, em temperaturas de exposição que o caracterizem na recristalização ou recozimento, atribui-se ao oxigênio da composição a influência no tamanho do mesmo para altas temperaturas e, conforme descrito em [Fernández, 2004], as impurezas referentes a óxidos de cobre no equilíbrio metálico quando dissolvidos ou precipitados alteram o histórico térmico do material.

## **2.8 Capacidade de transporte de corrente elétrica dos condutores**

O condutoramento da composição da infra-estrutura de sistemas de distribuição de energia estão disponíveis em formatos de fios ou cabos; sendo os últimos, um agrupamento em camadas helicoidais de fios, num encordoamento concêntrico, na composição da capacidade de condução de corrente elétrica. Os compostos mais comuns desses condutores, obedecendo critérios de condutibilidade elétrica, segundo [Procobre, 2007] são o Alumínio ( $\approx 61\%$  do IACS), utilizado na diversificação de redes de altas tensões, e o Cobre ( $\approx 101\%$  do IACS), o qual é objeto deste trabalho, e como citado anteriormente, aplicado em regiões geográficas de ambientes com alto teor de reagentes agressivos dispostos no ar quer em redes de médias tensões quanto em baixas tensões.

Esses condutores são classificados, quanto a capacidade de condução de corrente elétrica, através de suas seções transversais, considerando-se a capacidade máxima de cada fio da composição. As seções transversais podem ser descritas como seções de série milimétrica ( $\text{mm}^2$  ou  $\text{MCM}^9$ ) ou pela AWG<sup>10</sup>, ambas são usuais nos circuitos do Sistema Elétrico de Potência – SEP.

### **2.8.1 Suportabilidade térmica dos condutores em função da corrente elétrica drenada**

[Kagan et al, 2005] identifica dois aspectos relevantes sob análise do comportamento térmico dos condutores em função da capacidade de transporte de corrente elétrica; o primeiro caracteriza-se pela corrente limitada à máxima capacidade de condução,

---

<sup>9</sup> MCM = Mil Circular Mil, derivação da seção transversal circular, sendo  $1 \text{ MCM} = 0,506707 \text{ mm}^2$ .

<sup>10</sup> AWG = American Wire Gage, padrão americano caracterizado pelos sucessivos passos no processo de trefilação [Kagan et al, 2005].

ou seja, o valor nominal, em regime contínuo, da drenagem de corrente elétrica; o segundo aspecto diz respeito a valores de correntes elétricas muito altas, caracterizadas por sobrecarga ou curto circuito no sistema, entretanto a duração do evento é muito pequena. Em ambos os aspectos não deverá ocorrer a modificação, significativa, da estrutura atômica do Cobre, principalmente quanto as conseqüências de recuperação, recristalização ou recozimento do mesmo.

### **2.8.1.1 Comportamento térmico em condutores para corrente limitada aos valores nominais em regime contínuo**

Segundo [Kagan et al, 2005] a questão de comportamento térmico em condutores de energia pela influência da circulação de corrente elétrica está atrelada aos conceitos de transferência de calor. Dois fatores são preponderantes na geração de calor pela ação da corrente elétrica, ou seja, pela conceituação do efeito Joule quando a corrente elétrica enfrenta forte resistência a sua passagem numa ordem quadrática ( $R.I^2$ ) ocorrem perdas de calor e potência elétrica dissipada, sendo uma conseqüência disso a transferência do calor ao ambiente externo assim como, também, uma fração do calor gerado fica acumulado em seu interior, conforme descreve o postulado a seguir.

$$\text{Calor Produzido (Efeito Joule)} = \text{Calor Transferido (Ambiente)} + \text{Variação de energia interna (fio)}$$

O resultado disso é o incremento da energia interna bem como o aumento da temperatura. E em [Kagan et al, 2005] está descrito que estas condições implicam no balanço térmico ao longo do perímetro do condutor. As condições para que o balanço térmico aconteça são:

- a. A temperatura no perímetro externo do condutor bem como na área interna deverá estar uniforme durante o processo do aquecimento;
- b. Através da condição da capacidade térmica do condutor ( $^{\circ}\text{C}$ ) a temperatura permanece constante a uma certa distância do mesmo;
- c. A resistividade é considerada constante para pequenas variações de temperatura.

Admitindo-se regime permanente de circulação de corrente elétrica, sendo  $\theta_{reg}$  a temperatura para regime contínuo e  $A$  a seção transversal do condutor, tem-se  $dI = 0$ , então o aquecimento do condutor é identificado por:

$$W dt = AK\theta_{reg} dt \quad (07)$$

“A cerca do coeficiente  $K$ , que diz respeito à transferência de calor do condutor ao meio, salienta-se que seu valor é extremamente variável dependendo das dimensões, da forma e da disposição da superfície dispersora de calor e da configuração do meio no qual está o fluido de resfriamento, sendo sua ordem de grandeza para casos particulares:

- Condutores nus de seção reta grande imersos no ar:  $K \cong 10W/^\circ C.m^2$ ;
- Condutores nus de diâmetro 0,5 mm imersos no ar:  $K \cong 50W/^\circ C.m^2$ ;
- Condutores nus de seção reta grande, com ventilação forçada (velocidade do ar 30 m/s):  $K \cong 120$  a  $150W/^\circ C.m^2$ ;
- Condutores nus imersos na água:  $K \cong 500 W/^\circ C.m^2$ .”. [Kagan et al, 2005].

Considerando que a resistividade sofre variações sob ponto de vista do comportamento da temperatura num condutor, e considerando ainda que os valores de resistividade obtidos devam estar referenciados a base de uma determinada temperatura ( $20^\circ C$ ) sob ponto de vista da análise das alterações produzidas na estrutura atômica, credita-se a máxima temperatura obtida à estabilização do valor nominal/operacional da corrente elétrica, sobretudo condicionando o limite de circulação adequado ao limite informado pelos fabricantes. Nestas condições para determinada corrente operacional tem-se uma temperatura imediatamente correspondente.

$$\theta_{reg(T_2)} = \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 \cdot [1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)] \cdot \theta_{reg(T_1)} \quad (08)$$

A eq. (08) explicita a condição de análise para situações de contingências passíveis de acontecimento em sistemas elétricos, assim, para instantes onde a corrente elétrica assume valores de sobrecorrente por ações de sobrecargas tem-se uma analogia sobre temperaturas de referência originárias pela corrente nominal de funcionamento.

### 2.8.1.2 Comportamento térmico em condutores para corrente com grandes variações de valores

Tais casos de análise estão relacionados diretamente a acontecimentos transitórios, seja para situações de correntes elétricas originadas por curtos-circuitos ( $I_{CC}$ ) num sistema elétrico qualquer. Prosseguindo-se com o disposto por [Kagan et al, 2005] em sua publicação, percebe-se duas situações influentes nestes eventos:

1. A resistividade sofre alterações, variando em função da temperatura;
2. Todo o calor produzido pelo efeito Joule é retido na massa do condutor. Como o tempo é muito curto não há transferência de calor do condutor para o ambiente.

Ainda conforme [Kagan et al, 2005] o tempo de exposição a altas correntes deve ser limitado e pode-se encontrá-lo através do aquecimento advindo das perdas por efeito Joule, que é representado pela equação  $\theta_{reg(CC)} = R.I^2 dt$ , sendo  $R = \frac{\rho.l}{S}$  e

$\rho_1 = \rho_0(1 + \beta.dT)$ , aplicando-se integração e conversões tem-se:

$$a) t = 0,1157 \cdot \log \frac{234 + T_{CC}}{234 + T_{reg}} \cdot \left(\frac{S}{I}\right)^2 \quad (09)$$

Esta equação representa o tempo máximo de exposição a grandes correntes (em segundos) para condutores de cobre;

onde:  $I$  = intensidade da corrente de curto circuito (kA);

$S$  = área da seção transversal do condutor ( $\text{mm}^2$ );

$T_{CC}$  = temperatura máxima admissível no condutor em CC ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{reg}$  = temperatura máxima em regime permanente ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$  = tempo de exposição ao CC (s).

$$b) t = 0,0487 \cdot \log \frac{228 + T_{CC}}{2228 + T_{reg}} \cdot \left(\frac{S}{I}\right)^2 \quad (10)$$

Esta equação representa o tempo máximo de exposição a grandes correntes (em segundos) para condutores de Alumínio.

### 2.8.2 Capacidade de corrente elétrica nominal em função da variação da temperatura

Buscando-se subsídios para análise comparativas acerca da influência da corrente elétrica de trabalho no comportamento da temperatura, em [Ficap,2008], encontrou-se dados tabulados, referente a capacidade de carga para fios e cabos de cobre nu, observando-se a flexibilização da corrente elétrica como agente causador de acréscimo linear da temperatura, como mostra a tab. (6).

Tabela 6 – Capacidade de corrente para condutores de cobre nu limitados a índice da variação da temperatura

Valores em Amper da corrente elétrica a partir da temperatura ambiente em $T_{AMB} = 30^{\circ}C$						
Temperatura acrescida a $T_{AMB}$	Seção transversal do condutor					
	10 mm <sup>2</sup>	16 mm <sup>2</sup>	25 mm <sup>2</sup>	35 mm <sup>2</sup>	50 mm <sup>2</sup>	70 mm <sup>2</sup>
	8 AWG	6 AWG	4 AWG	2 AWG	1/0AWG	2/0AWG
Capacidade operacional	112	143	189	236	287	353
10°C	71	90	113	133	155	186
20°C	99	125	157	185	215	258
30°C	119	150	189	222	259	311
40°C	135	170	214	253	294	353
50°C	149	188	236	278	323	389
Capac. Máx. Nominal	150	190	251	313	381	470

Fonte: adaptado de [Ficap, 2008], [NBR5410,2004] e [Celesc,2002].

Ainda conforme [Ficap,2008], admitindo-se 80°C como limite da temperatura de trabalho para condutores de cobre em regime contínuo, pode-se analisar os valores da tab. (6) como valores de corrente elétrica cuja variação produz a transição do gradiente de temperatura a cada intervalo de 10°C. Dessa forma observa-se que, para a referência no condutor de seção igual a 16mm<sup>2</sup>, por exemplo, a partir de 90 Amper (A) inicia o processo de incremento no comportamento da temperatura; observa-se que o acréscimo linear na temperatura é produzido pelo aumento logarítmico na intensidade da corrente. O gráfico da fig. (15) representa a tendência de evolução da corrente na influência da temperatura, onde a partir da exposição do condutor a temperatura ambiente de 30°C com circulação de corrente continuamente, será necessário o valor da corrente da segunda linha da tab. (6), cujo valor representa um coeficiente médio de 45% da capacidade nominal do condutor,

para iniciar-se o gradiente de temperatura, sendo a evolução para os próximos valores uma relação logarítmica,  $y = a.x^b$ , conforme projeção da equação da linha de regressão matemática para cada seção transversal.

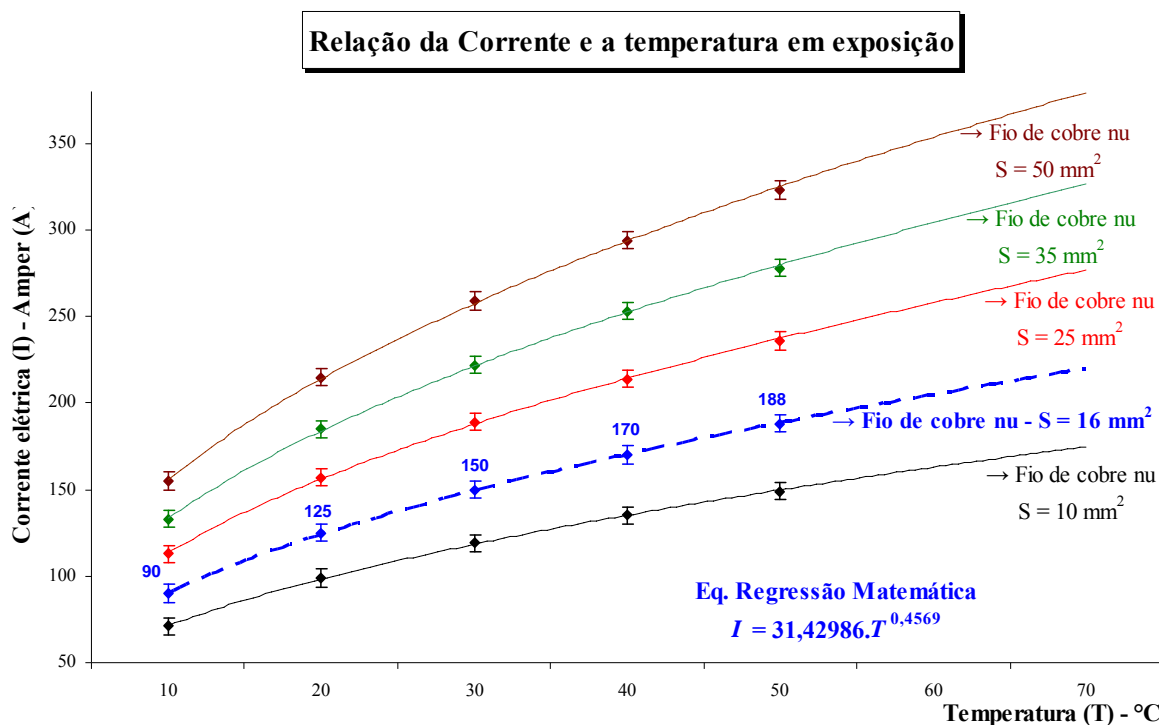


Figura 15 – Capacidade de corrente para condutores de cobre nu limitados a índice da variação da temperatura  
Fonte: adaptado de [Ficap, 2008]

## 2.9 Condições funcionais das redes de distribuição de energia elétrica

Analisando-se a teoria das propriedades elétricas de um material, entende-se que a interação de um campo elétrico produz a variação da quantidade de cargas livres, bem como a velocidade com que as mesmas atravessam longitudinalmente um condutor, sendo a combinação entre esses dois fatores e seus comportamentos o agente influente na variação da intensidade da corrente elétrica. Então, em função da necessidade de suprimento de determinados dispositivos e/ou equipamentos conectados a rede elétrica, nesse mesmo condutor, identifica-se uma intensidade de corrente elétrica variável, ao longo do tempo, diretamente proporcional ao somatório das potências elétricas desses. Isso faz com que o sistema elétrico sob esses efeitos, imponha relações no abastecimento de energia elétrica

com oscilações ao longo de um período, sobretudo em horários do dia de grande concentração de potência elétrica.

Assim sendo, é imprescindível um estudo preciso no dimensionamento do diâmetro de cada condutor utilizado no sistema elétrico, sendo fator determinante a capacidade de escoamento da corrente elétrica sobre o mesmo sem que ocorra a descaracterização de sua estrutura.

Alguns eventos são comuns, rotineiros no comportamento de uma rede elétrica de distribuição de energia, onde sob determinado comportamento da carga de demanda (potência elétrica) acontece a variação da corrente elétrica, denotando situações de normalidade e sobrecorrente no sistema.

As distribuidoras de energia elétrica, no Brasil, indicam como valor satisfatório para funcionamento contínuo o índice de 75% (setenta e cinco por cento) do limite térmico dimensionado pelos fabricantes, relacionando este índice como corrente operacional de trabalho (tab. (6)). Contudo por um período de duração limitadíssimo, sendo a duração máxima não superior a uma hora, admite-se que a corrente elétrica circulante nos condutores atinja o limite nominal, ou seja 100% da capacidade, desde que não produza dissipação de temperaturas superiores à índices de 80°C, cujo valor é estabelecido pelos fabricantes, como limite térmico sob funcionamento contínuo. Estes valores sofrem monitoramento satisfatório em circuitos de média e alta tensão, atestando a capacidade de comprometimento dos cabos condutores, como sendo o nível de carregamento dos mesmos.

Eventualmente alguns eventos, como os excedentes de potência, são passíveis de ocorrência nas redes elétricas. As sobrecargas, principalmente em circuitos de baixa tensão (440, 380, 220, 127 e 110 Volts no Brasil), são possíveis, haja vista o desenvolvimento na densidade de ocupação demográfica e a deficiência no monitoramento dos mesmos. Dessa forma alguns condutores instalados com um crescimento previsto, podem ter seus limites ultrapassados na sua capacidade de transporte, desde que a evolução do comportamento da carga de demanda supere as expectativas projetadas. Isto posto, em decorrência, alguns pontos dos circuitos elétricos podem ter sua estrutura descaracterizada, ou seja, a temperatura sob exposição pode ter apresentado valores superiores aos considerados nominais.

Outro evento, preocupante para o comportamento da longevidade útil dos condutores, são os curtos circuitos. Durante sua duração, a corrente elétrica pode variar de algumas centenas à milhares de Amper, dependendo dos atenuantes da descarga para o sistema de conexão a terra, ou seja, quanto maior a resistência de contato entre a parte energizada (ativa) e a aterrada (passiva), menor será a intensidade da própria corrente de curto circuito. A preocupação nesses casos recai sobre o tempo de exposição dos condutores ao curto circuito, visto que a temperatura para essas correntes pode atingir valores muito superiores ao máximo admitido.

Um sistema de proteção contra sobrecorrente eficiente elimina o risco de comprometimento dos condutores limitando o tempo de exposição a altas correntes elétricas, ou seja, o dispositivo de proteção desliga o circuito sob monitoramento, atuando numa relação inversamente proporcional entre corrente elétrica e tempo de resposta, desta forma quanto maior a corrente circulante, menor será o tempo de duração do evento sob o condutor. Esse tempo pode variar de alguns milésimos de segundo até alguns centésimos de segundo, e eventualmente alguns décimos ou poucos segundos. Na teoria, esse tempo, contudo, não deveria possibilitar a dissipação de calor no condutor, entretanto na prática esse fato, em casos raros, acontece quando do mau funcionamento dessa proteção.

Torna-se, então, imprescindível a interpretação dos reflexos de tais eventos num sistema de distribuição de energia elétrica, sob pena da passividade ou omissão no monitoramento e controle, incrementar substancialmente a quantidade de ocorrências, as quais fatalmente irão produzir interrupções no fornecimento de energia, sobretudo em horários de concentração de demandas de potência, onde a intensidade de corrente elétrica se acentua. Objetivando obter-se valores próximos aos índices de cada evento, produziu-se valores amostrais de intensidade de corrente elétrica que caracterizasse os mesmos sob circulação em amostras oportunamente classificadas.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização das amostras para análises

Através da caracterização de procedimentos metodológicos, é proposição deste trabalho apontar os resultados das análises realizadas acerca dos efeitos da temperatura imposta pela corrente elétrica circulante, cuja padronização obedece aos preceitos da regulamentação da ABNT, dispostos na NBR5471/1986 de fios de cobre eletrolíticos – ETP C110 têmpera meio-duro, seção circular, 101%IACS, utilizados em linhas de distribuição aéreas de energia elétrica, além de buscar obter-se parâmetros para análise do comportamento do material sob alguns níveis de influência da temperatura, ou seja, qual intensidade máxima de corrente elétrica sob exposição do mesmo, ou percentual da capacidade nominal em regime contínuo.

As amostras, originadas de produto, “material base”, disponibilizada pela empresa Celesc Distribuição SA, foram caracterizadas, em fio de cobre nu rígido de diâmetro de 4,515mm ( $\approx 16,00\text{mm}^2$ ), compreendido pela disponibilização da classe de encordoamento como classe 1A, ou seja, condutores sólidos, segundo a NBR6524,1998, inicialmente dispostos em rolos de peso e comprimentos variáveis, sendo o valor máximo indicado de 40 kg, conforme demonstra a fig. (16), cujos aspectos são condizentes com os condutores sob padrão da própria concessionária, utilizados em redes de Alta e Baixa tensão.

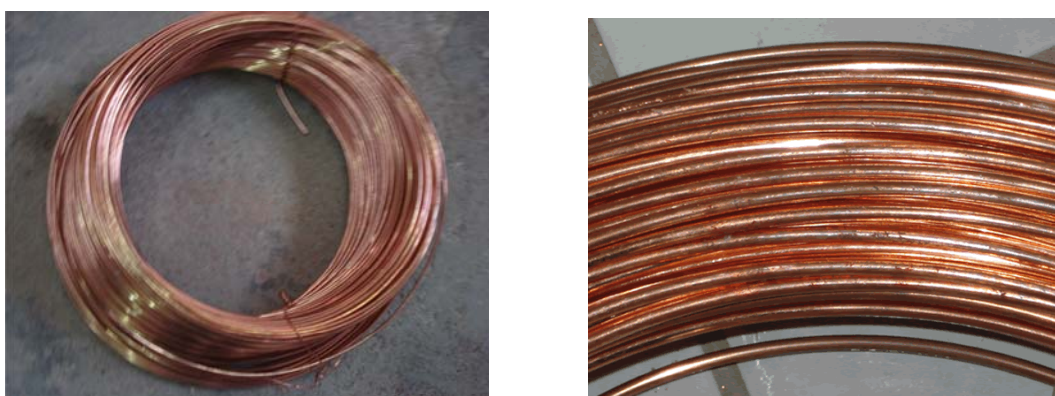


Figura 16 – Fio de cobre nu disponível para aplicação (disposto em rolos)

Em conformidade com o padrão de referência na disposição das redes aéreas de média e baixa tensão, em âmbito internacional, como mostra as fig. (17a e 17b), percebe-se

a distribuição simetricamente uniforme no arranjo dos condutores verticalmente para redes de baixa tensão e o arranjo horizontal (nível superior) da média tensão.



(a)



(b)

Figura 17 – Arranjo e disposição dos cabos nas redes de distribuição de energia.

Inicialmente procedeu-se com a investigação da composição química do material por espectrometria de absorção atômica apresentando como resultado a composição percentual do elementos descritos na tab. (7) a seguir.

Tabela 7 – Análise de espectroscopia de absorção atômica do fio de cobre ETP

Parâmetro	Elementos metálicos da composição					
	Cobre	Prata	Ferro	Manganês	Níquel	Cromo
<b>Composição (%)</b>	restante	0,0061	0,0006	0,0001	0,0031	0,00027

Fonte: empresa Natrium Química (Joinville – SC).

Seqüencialmente, as amostras foram cortadas em comprimentos de 800mm, moldando-as para a conexão no equipamento gerador de corrente<sup>11</sup> ao qual se impôs a variação da corrente elétrica, produzindo-se intensidade, fazendo-se a mesma circular entre os extremos de cada espécime a partir da disponibilidade “material base”. Dessa forma cinco amostras foram caracterizadas, sendo as mesmas expostas respectivamente, à 143 Amper (A), 214.5A, 286A, 400A e 700A, conforme tab. (8), sendo o primeiro valor a capacidade operacional do fio em uso contínuo, indicada pela tab. (6).

Tabela 8 – Amostras submetidas a correntes possíveis numa linha de energia elétrica externa aérea

N ° da Amostra	Eventos intrínsecos à sistemas de distribuição		
	Evento	Corrente produzida (A)	Duração da exposição (s)
01	Amostra sem circulação de corrente	0	0
02	Corrente ( <i>i</i> ) Operacional	143	contínua
03	<i>i</i> de curto-circuito médio na BT	700	0,1 (a cada 1 min)
04	1,5 vezes <i>i</i> Operacional	214,5	contínua
05	2 vezes <i>i</i> Operacional	286	contínua
06	<i>i</i> curto-circuito mínimo na BT	400	120
-	Corrente ( <i>i</i> ) Nominal	190	-

<sup>11</sup> Gerador de corrente – Electric Test Serta (modelo SCA-175) série 113 – escala 0 à 2.000Amper

A partir da caracterização das amostras foram efetuados procedimentos de testes e ensaios objetivando resultados fieis às condições assemelhadas as situações reais de comportamento em relação aos eventos apontados na tab. (8). Como fatores importantes ao subsídio de valores comparativos produziram-se ensaios de tração unidirecional em câmara com controle da temperatura; Resistividade elétrica (método indireto pela ponte de Kelvin); microscopia óptica.

### **3.2 Monitoramento da temperatura**

Para cada experimento o monitoramento da temperatura foi acompanhado com termopar<sup>12</sup>, objetivando estabelecer a relação do escalonamento nos valores da corrente para cada amostra, a fim de obter-se a partir destas, os corpos de provas. Como procedimento de inferência para cada evento a temperatura sofreu variações desde a nominal do ambiente até limites extremos, cujo valor encontrado apontou 378°C, obtendo-se como resultado estruturas de material em recuperação e recristalização, bem como produtos com recozimento pleno.

Para a amostra 1 não foi aplicado circulação de corrente. Nas amostras 2, 4 e 5, cujos formatação enunciam pontos extremos no comportamento de exposição contínua, através dos valores de correntes elétricas produzidas conforme valores da tab. (8), foi captado a temperatura e relacionada por períodos críticos de exposição, ou seja, por duração de tempos em segundos foi exposto a amostra a corrente e monitorado , simultaneamente, a temperatura.

A metodologia na preparação da amostra 3 indica interações operacionais do fio de cobre com o sistema elétrico, sendo imposto circulação de correntes para curtos circuitos comuns a redes num tempo médio de exposição. Desta forma obteve-se ao longo da caracterização um temperatura máxima que ficou limitada a 79°C. Para a mostra 6 a metodologia foi semelhante, entretanto a duração da exposição foi extremamente longa o que representa um sistema de proteção contra sobrecorrente falho, expondo o fio de cobre a temperaturas, também. Extremas ao limite térmico do mesmo.

---

<sup>12</sup> – Monitoramento da temperatura com Termopar/termômetro digital PT100 – RDH147N (-65 à 660 °C)

### 3.3 Medições da resistência elétrica

A partir das amostras conforme configuração da tab. (8), sendo todas com seção circular de  $16\text{mm}^2$  ( $0,16\text{cm}^2$ ) e comprimento de ajustado para 62cm (subtraído 9cm de cada extremidade) obteve-se os valores de resistência elétrica.

Os valores de Resistividade foram obtidos indiretamente a partir da medição dos valores de Resistência Elétrica utilizando-se o microohmímetro<sup>13</sup> (fig. (18)). Este instrumento tem suas funcionalidades baseado na filosofia de medições com ponte de baixas resistências (Ponte de Kelvin, também conhecido por Ducter), em conformidade com a metodologia da normatização da ABNT.



(a)



(b)

Figura 18 – Equipamento de ensaio de resistência elétrica: (a) detalhe instalação/medição, (b) detalhe medição efetuada

<sup>13</sup> Microohmímetro “Ducter” Nansen (Microhm-100:  $200\mu\Omega$  à  $20\Omega$ ).

### 3.4 Ensaios de Tração Unidirecional

Os ensaios de Tração unidirecional, em conformidade com [NBR6810,1981] e [NBR5111,1997], foram efetuados com corpos de prova de 250 mm de comprimento utilizando-se máquina universal de ensaios<sup>14</sup>, fig (19), submetendo-se os mesmos a variação de temperatura através de estufa<sup>15</sup> à temperatura média de 80°C, índice este que caracteriza funcionamento operacional do condutor, apresentando os valores da tab. (10).



(a)

---

<sup>14</sup> Máquina de ensaio de tração unidirecional EMIC 100kN – DL10000

<sup>15</sup> Estufa BIOPAR para controle de temperatura



(b)

Figura 19 – (a) Equipamento de ensaio de Tração Unidirecional com estufa acoplada, (b) detalhe estufa Biopar

### 3.5 Análise por microscopia óptica

As amostras foram cortadas nas direções longitudinais e transversais, utilizando-se uma cut-off para este fim e embutidas em resina. Posteriormente foram inspecionadas conforme ordem de classificação de 1 a 6, e lixadas com a seguinte seqüência de lixas: #100, #220, #320, #400, #500, #600, #800 e #1200. Na seqüência, as amostras foram polidas com pasta de diamante com granulometria igual a  $1\mu\text{m}$ . As amostras foram então atacadas com o reagente de 10% ácido nítrico + 90ml de água destilada, por imersão em tempos variados. Estas amostras foram então avaliadas em microscópio óptico (LEICA, MOD. LM), onde foram feitas as micrografias (máquina fotografia digital, marca CANON, mod. S50). O processo foi executado no Instituto de Pesquisa Tecnológico da Universidade do extremo sul catarinense – UNESC/IPAT.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores foram obtidos através de experimentos, cujos resultados denotaram características e particularidades do cobre ETP quando em exposição à temperaturas diversas. As relações retratadas pela diversidade de resultados das amostras em estudo apontam o comportamento do produto para diferentes eventos.

Ensaio de tração unidirecional projetam os esforços máximos permitidos em ancoragem dos condutores nas estruturas de postes e portais das subestações, subsidiados pelos valores de dureza, as quais propiciam registros de intensidade das forças de interligação interatômica. A análise metalográfica indica o arranjo atômico na estrutura cristalina, identificando aspectos como o tamanho de grãos e impurezas nos contornos de grão que terão interferência direta na resistência a tração, bem como na resistividade elétrica, minimizando efeitos de perdas elétricas por energia dissipada.

### 4.1 Monitoramento da temperatura

As investigações para as amostras 2, 4 e 5 representaram comportamentos de características acumulativas na variação de corrente e temperatura e obteve-se o gradiente de temperatura mostrado na fig. (20).

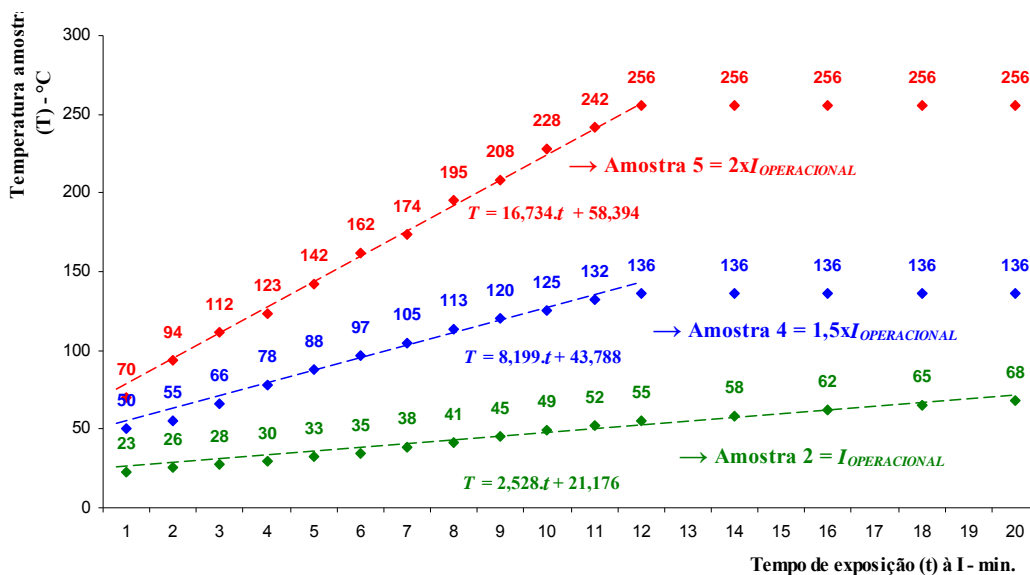


Figura 20 – Tendências do gradiente da temperatura do material em exposição a corrente elétrica, fixa, durante intervalo de tempo



Observando-se a fig. (20), percebe-se que para a amostra 2 o gradiente de temperatura estende-se mais gradualmente estabilizando-se num tempo maior que os das outras duas amostras, em aproximadamente 20 minutos. Compreende-se que com a velocidade de difusão térmica e frequência vibracional menores a transferência de calor no condutor ocorre mais lentamente.

Já para as amostras 4 e 5 a temperatura estabilizou-se num tempo menor (12 minutos), já que a corrente, até duas vezes maior que para a amostra 2, incrementou os índices no comportamento térmico.

Ao atingirem valores de temperatura próximos a  $69^{\circ}\text{C}$ , as amostras adquiriram tom dourado nas suas superfícies, denotando a descoloração das mesmas em relação ao produto “material base”; isso ficou evidente nas amostras 2 e 3 que obtiveram a temperatura limitada, respectivamente, à  $68$  e  $79^{\circ}\text{C}$ , valores aos quais ficaram estabilizados após o período especificado. Já as amostras 4, 5 e 6 apresentaram coloração com tons de marrom escuro, evidenciando a influência do oxigênio na composição com oxidação ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) de alguns contornos de grãos, caracterizados também na fig. (14).

Na preparação da amostra 3 produziu-se 700 Amper, a qual corresponde a corrente média de curto-circuito em redes de baixa tensão (380 Volts). Ajustou-se a duração média da circulação de corrente em 100 milissegundos, efetuando-se 30 ciclos seqüenciais, com intervalo médio de 1 minuto entre eles; como o tempo de exposição à corrente de curto circuito é pequeno, a temperatura, em função do gradiente e dissipação do calor, não atingiu maiores valores, apresentando média de  $79^{\circ}\text{C}$ . Os resultados comprovam os paradigmas referenciais das outras amostras, confirmando a flexibilidade dos parâmetros de condutividade térmica do cobre, contudo para intervalos de duração muito pequenos, algo na ordem de milissegundos, a difusidade exteriorizada ao perímetro superficial do produto não implica em resposta imediata na dissipação do calor, conservando propriedades mínimas de operação do condutor.

Na produção da 6ª amostra fez-se circular uma intensidade de corrente, cujo valor evidencia um curto circuito moderado, na ordem de 400 Amper durante 2 minutos. Durante o ensaio o material atingiu a incandescência, fato este que notoriamente resultou no recozimento severo, à temperatura de  $378^{\circ}\text{C}$ , além de produzir a oxidação do produto.

## 4.2 Obtenção da Resistividade Elétrica

Aplicando-se a 2ª Lei de Ohm<sup>16</sup> aos valores de resistência elétrica medidos, obtêm-se a resistividade elétrica, cujos valores estão expressos na tab. (9) a seguir.

Tabela 9 – Valores de resistência e resistividade das amostras obtidos à 20°C

N ° da Amostra	1	2	3	4	5	6
<b>Resistência Elétrica - <math>R_{AMOSTRA}</math> (<math>\Omega</math>)</b>	68,0x10 <sup>-5</sup>	67,5x10 <sup>-5</sup>	67,5x10 <sup>-5</sup>	66,5x10 <sup>-5</sup>	67,5x10 <sup>-5</sup>	68,0x10 <sup>-5</sup>
<b>Resistividade Elétrica - <math>\rho</math> (<math>\Omega \cdot mm^2/m</math>)</b>	0,017548	0,017419	0,017419	0,017161	0,017419	0,017548
<b>Resistência Elétrica específica - <math>R</math> (<math>\Omega/km</math>)</b>	1,09677	1,08871	1,08871	1,07258	1,08871	1,09677

Como todas as amostras tinham dimensão de 62 cm de comprimento, a primeira linha da tab. (9) representa a resistência referente ao valor percentual do material sob análise.

A tab. (5), de acordo com a NBR6524/1998, descreve valores referenciais de resistência para condutores de cobre nu, meio duro, série métrica. Para os valores relacionados para o fio de 16 mm<sup>2</sup> encontra-se o valor de 1,14 m $\Omega$  para cada metro linear como parâmetro indicado.

A partir de produto “material base” procedeu-se com medidas de resistência para temperaturas de 35, 47, 64, 76, 90, 103 e 120°C obtendo-se o incremento da resistividade, como mostra a fig. (21) baseando nos preceitos na NBR6814/1986 e NBR6815/1981.

<sup>16</sup> 2ª Lei de Ohm é expressa por  $\rho = \frac{R.A}{l}$ , sendo “ $\rho$ ” a resistividade, “ $R$ ” a resistência, “ $A$ ” a seção transversal e “ $l$ ” o comprimento.

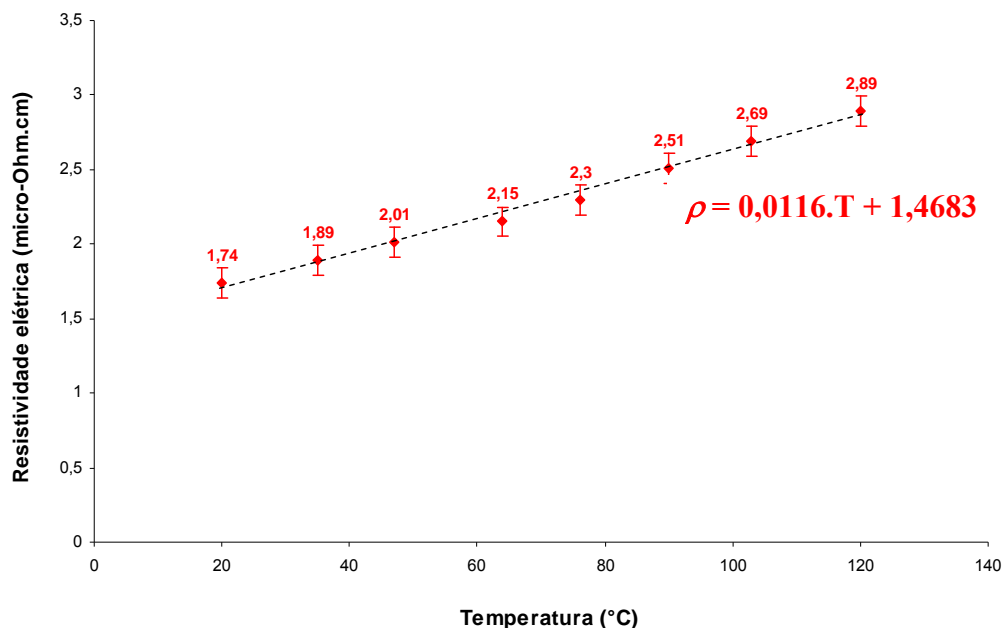


Figura 21 – Variação da resistividade do cobre com o aumento da temperatura.

Estabelecendo-se a correlação entre as figuras (21) e (9) percebe-se que os valores registrados de resistividade em função da temperatura apresentam topologia com característica de componentes lineares do gráfico em fig. (9), atentando para temperaturas T1 de 20 e T2 de 120°C, e a resistência R1 relacionada a resistividade de 1,74 e R2 com 2,89  $\mu\Omega.\text{cm}^{-1}$ . Esses valores seguem uma variação de proporcionalidade em razão da sensibilização e do incremento da energia de atuação vibracional relacionada ao aumento da temperatura, e conseqüente interferência no percentual do espalhamento dos elétrons livres. Decorrente disso, durante o período da linearidade do coeficiente angular no gráfico da fig. (21), a resistividade elétrica apresenta um acréscimo médio de 0,65% a cada 1°C imposto.

Também em conformidade com a tab. (9) percebe-se que após o resfriamento do produto, em condições de ausência da corrente, o mesmo adquire formatação similar para todas as condições para as características elétricas.

Torna-se perceptível para cada amostra características próprias adquiridas na variação de temperatura com o acréscimo da corrente; sendo que através dos ensaios efetuados é possível apontar-se quais amostras concentram condições de uso adequado no

âmbito de aplicação, evidenciando para algumas delas, depreciação no comportamento de rotina e conseqüentemente, perda na capacidade operativa.

### 4.3 Ensaio de Tração Unidirecional

Valores apontados como referência pela normatização NBR5111,1997, tab. (3), indicam que para fio de cobre nu meio duro com diâmetro entre o intervalo de 4,25 e 4,75mm, deverão impor resistência à tração, à temperatura ambiente, numa variação entre 336MPa e 397MPa como máximo possível, e alongamento mínimo para amostras de 250mm próximo a 2,00%.

Estes ensaios foram realizados com inferência do valor de temperatura média, relativo a influência da corrente nominal de trabalho ou máxima corrente operacional (80°C), ou seja máxima temperatura indicada pelos fabricantes para operação. O valor adotado para ensaio estabelece um valor superior aos resultados da amostra referência, conforme fig. (20) (amostra 2), cujo valor estabilizou em 68°C à 20 minutos de aplicação ininterrupta de corrente (143 Amper), obtendo-se os resultados da tab. (10) a seguir.

Tabela 10 – Valores obtidos no ensaio de tração unidirecional a 80°C

	N ° da Amostra					
	1	2	3	4	5	6
<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	304,71	292,33	288,88	184,95	168,00	159,62
<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	269,78	270,31	279,50	105,46	57,55	50,98
<b>Alongamento até ruptura (%)</b>	7,53	7,85	7,97	35,23	46,15	54,06
<b>Tenacidade (N.m.mm<sup>-3</sup>)</b>	1,434	1,434	1,439	4,072	4,846	5,393

A opção por realizar-se os ensaios à temperatura ajustada na estufa de 80°C justifica-se pela caracterização das condições médias de funcionalidade das amostras com maior proximidade da realidade aos produtos instalados nas redes de fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, mesmo apresentando índices menores aos estabelecidos pela regulamentação existente, retrata maior precisão na análise dos valores.

Os resultados obtidos nos ensaios das amostras 1, 2 e 3 são similares entre si, gráficos da fig. (22) e tab. (10), nos aspectos relacionais a resistência à tração nas condições específicas operacionalmente, ou seja, os condutores submetidos a corrente limite operacional, assim como os que sofreram interação das correntes de curto circuitos, são compatíveis aos resultados da amostra do cobre “material base”.

Ambas as amostras tiveram limites de resistência a tração muito próximas. Para a média de 295,3MPa de tensão suportável aplicada obteve-se o desvio padrão máximo de 3,18%. O percentual de variação entre os valores amostrais mais distantes apresentaram uma variação de 5,47%. Um comportamento similar foi observado para tensões de escoamento e deformação, sendo em média 273,20MPa e 7,78%, respectivamente.

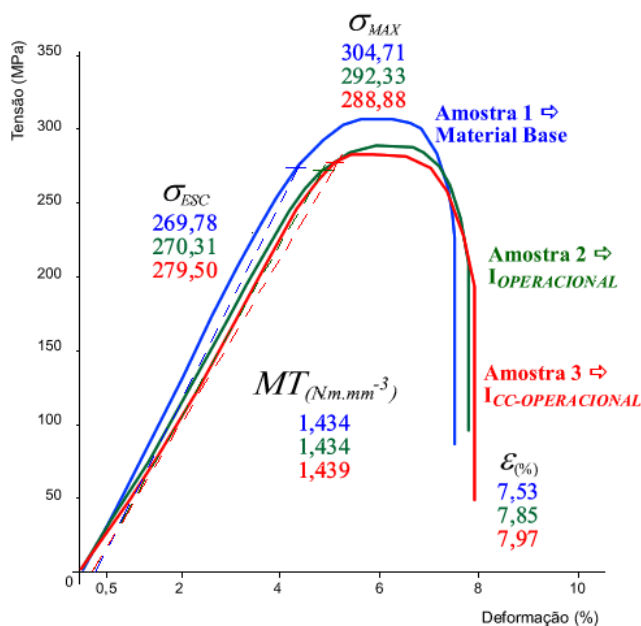


Figura 22 – Resultados de ensaio de resistência à tração das amostras 1, 2 e 3 à 80°C

Disso conclui-se que num comparativo dos resultados encontrados a 80°C e o parâmetro estabelecido pela legislação, a 20°C, obteve-se uma variação da Tensão máxima suportada para o cobre em torno de 19,42%, assim tem-se um decréscimo médio de 0,89MPa para cada 1°C acrescido. Já para a capacidade de alongamento aconteceu o incremento médio de 0,04% a cada 1°C imposto, importando em 173,5% de variação entre a NBR5111/1997 e os ensaios. Contudo as amostras representam produtos que apresentam condições de operacionalidade rotineiras nas redes de energia elétrica, sendo observadas empiricamente, comportamento normal de funcionamento.

Para efeitos comparativos em comentários futuros considera-se os valores da amostra 2, efeitos impostos pela corrente operacional, como parâmetros de referência.

As representações gráficas da fig. (23) indicam o comportamento da resistência à tração de fios instalados numa rede de energia elétrica hipotética que foram expostos em situações de criticidade. Para a amostra 4 a exposição caracterizou o corpo de prova a sobrecarga de 150% referente a corrente operacional. Analisando-se os valores do gráfico e da tab. (10) nota-se a depreciação sob o comportamento de corrente elétrica acima do nível adequado; a sobrecorrente produzida, de forma contínua, aponta resultados indicativos de comprometimento da capacidade operativa naquele determinado instante, principalmente sob o ponto de vista das características mecânicas do material (tenacidade, tensões de ruptura e dilatação). O comprometimento sob efeito da sobrecarga de 1,5 vezes na potência elétrica impõe uma redução em torno de 36,73% na resistência a tração, reduzindo-se a elasticidade em 60,98% e aumentando o alongamento em 4,49 vezes.

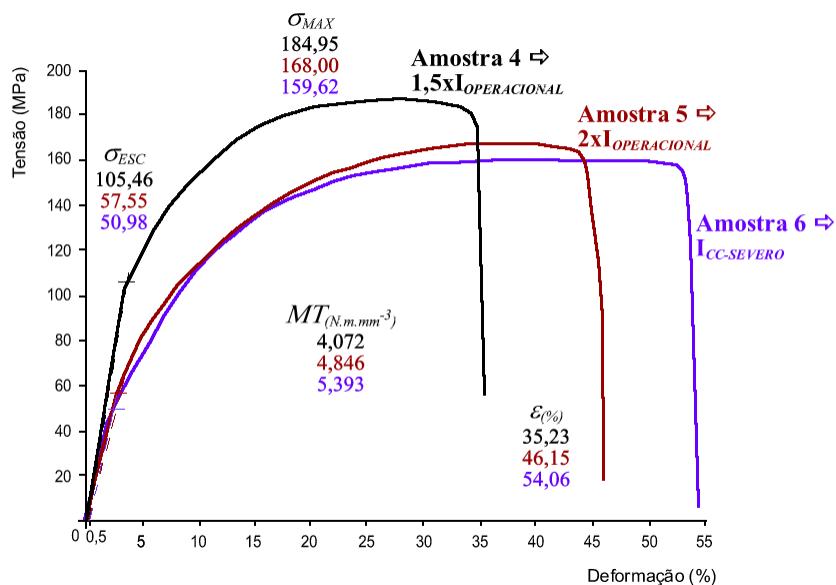


Figura 23 – Resultados de ensaio de resistência à tração da amostra 4, 5 e 6 à 80°C

Os dados obtidos para a amostra 5 e 6 retratados, também na fig. (23), apesar de similaridade com os valores relacionados a amostra 4, conforme tab. (10), indicam intensificação do comprometimento aos níveis de corrente elétrica superiores ao limite de operacionalidade do fios de cobre nus. Assim, no caso da amostra 5, para sobrecorrentes elétricas de 200% acima da capacidade operacional, em aplicação contínua as propriedades

mecânicas, tab. (10), demonstram altos índices de perda na capacidade de operação destes condutores, evidenciando indícios de possibilidade de dilatação dos mesmos, ou ainda a disformidade da distância entre os condutores fase ou neutro, na baixa tensão. Impondo um comprometimento numa redução em torno de 42,53% na resistência a tração, assim como em 78,71% na elasticidade e aumentando o alongamento em 5,88 vezes.

A grande preocupação neste caso são as conseqüências adquiridas por este produto sob constantes tensões de ancoragem em estruturas das redes. O próprio peso do condutor, imposto por “flechas” em vãos entre postes de distâncias consideradas, pode resultar em conseqüências indesejadas, tanto para segurança de terceiros quanto para continuidade no fornecimento de energia.

A amostra 6, cujo resultados estão expressos, novamente, na fig. (23), identifica o recozimento severo do cobre ETP. Teoricamente apresenta os valores de estabilização para os critérios estudados no pior caso deste trabalho, ou seja, pode-se considerar que a partir dos valores de temperaturas ao qual a amostra foi exposta o nível de comprometimento é acentuado, comprovadamente atribuído aos valores obtidos relacionados a região elástica, atingindo 18,86% da amostra de referência (amostra 2), e a máxima tensão aplicada em torno de 54,60%, bem como a dilatação atingiu 6,88 vezes os parâmetros da mesma.

Considerando a tab. (10) e as fig. (22) e (23) percebe-se que a denominação do tipo de material sob estudo, cobre ETP (tenaz), sofre variação entre os dois grupos analisados dentro de padrões de similaridade a respeito da característica de tenacidade imposta pela temperatura. O primeiro grupo composto pelas amostras 1, 2 e 3 apresentam tenacidade praticamente idênticas; a amostra 4 apresentou uma variação de 2,839 vezes o valor da amostra 2 (183,9%); a amostra 5 variou em 237,9%, e a amostra 6 apresentou-se 276% mais tenaz em relação a referência.

Uma vez submetido a eventos em que a corrente circulante de trabalho tenha ultrapassado o valor limite nominal, imediatamente acontece a intensificação da possibilidade de ocorrências de dilatação e retração instantânea, ou seja, deformação elástica/plástica seguidas da recristalização instantaneamente na seqüência nos fios. Fato este que reduz a eficácia da elasticidade na ordem média de 0,85% a cada Amper incrementado, limitado a corrente de 215A; com a corrente elétrica variando de 215 à 286A o percentual diminui para 0,63%/A, e a partir de 287A estabiliza-se em 0,1%/A (fig. (24)).

Os fios permanecem em constante tração devido à ancoragem aos postes das redes de energia elétrica, e segundo o mesmo critério de análise, há um decréscimo na capacidade de tensão na ancoragem dos postes, intensificando o efeito da dilatação e até mesmo o rompimento dos mesmos numa proporção média de 0,51%/A até a corrente de 215A; de 215 à 286A o percentual diminui para 0,13%/A, e a partir de 287A estabiliza em 0,07%/A (fig. (24)).

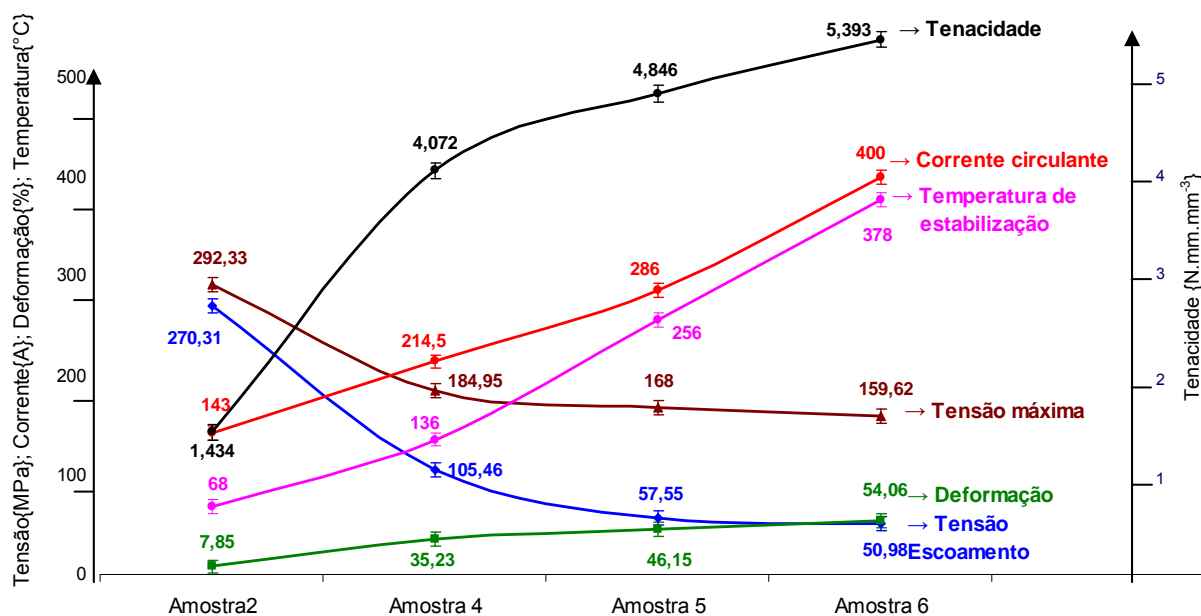


Figura 24 – alteração das características do fio em relação a influência da corrente circulante de trabalho

Também na fig. (24) fica evidente que as justificativas anteriores são reforçadas pela representação do aumento significativo na deformação total em 6,88 vezes (deformação de 588%), fato este que acentua consideravelmente a flecha de dilatação em condutores dispostos verticalmente quando expostos a correntes elétricas intensas, além de que quando do tracionamento (retensionamento) para estabelecer as distâncias entre fases e fase e neutro os condutores diminuem sua capacidade de transportar energia através da diminuição do diâmetro. As conseqüências disso são os comportamentos inesperados nas condições operacionais dos condutores, em se considerando a elevação da temperatura e a conseqüente variação da resistividade, ou seja, nessa relação, quanto maior a corrente elétrica, maior será a temperatura, a condutividade térmica aumenta e a condutividade elétrica diminuirá; desta forma o material sob estudo, como reduziu drasticamente o limite



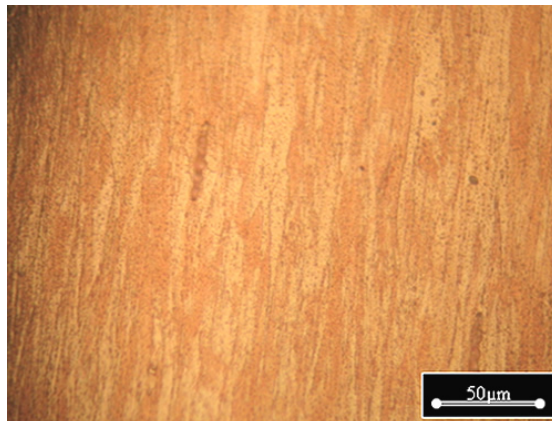
da tensão de escoamento, deforma-se plasticamente pela ação de forças do próprio peso do fio no meio do vão (flecha) e da tração de ancoragem, provocando conseqüências influentes para a interrupção do fornecimento de energia.

#### 4.4 Análise por microscopia óptica

Os resultados caracterizam os modelos dos eventos ao qual foram expostos, de acordo com as figuras a seguir, sendo dispostas em dois grupos, um contendo material em condições operacionais razoáveis e outro com a corrente de trabalho impondo conseqüências através da temperatura de exposição com perda sensível da operacionalidade do produto.



Amostra 1 – material base



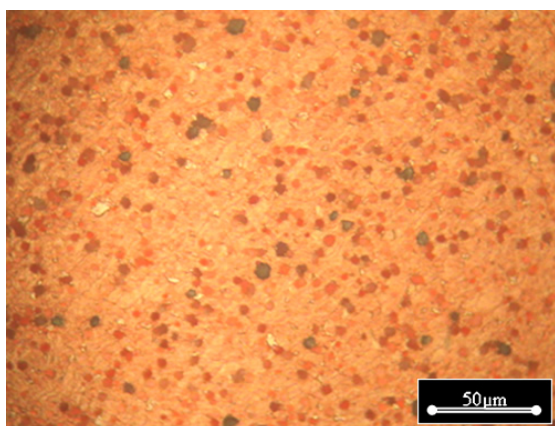
Amostra 2 – I<sub>OPERACIONAL</sub>



Amostra 3 – I<sub>CC</sub>\_OPERACIONAL

Figura 25 – Micrografia Longitudinais das amostras 1, 2 e 3

Analisando as micrografias das amostras, na fig. (25), cujo conteúdo identifica padrões de paradigmas do material em uso característico na configuração das redes de energia, ou seja, as amostras 1, 2 e 3 representam o material instalado nas redes em condições de operação, observa-se similaridade no arranjo das estrutura conservando propriedades metalográficas da imposição do processo de trefilação. Observa-se que o padrão obtido da trefilação, na amostra 1, e conseqüente parâmetro de referência para este grupo, é mantido percentualmente nas amostras 2 e 3, o que referencia os produtos como material apto ao processo de condução de energia elétrica em redes de distribuição aéreas, haja vista a necessidade premente da manutenção das características mecânicas, como por exemplo resistência a tração e percentual de alongamento, devido aos esforços impostos pela ancoragem em postes e portais, e conseqüente exposição a ação de ventos e interações ambientais.



Amostra 1 – material base

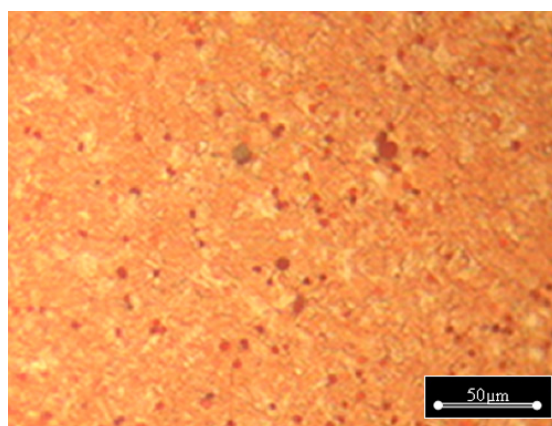
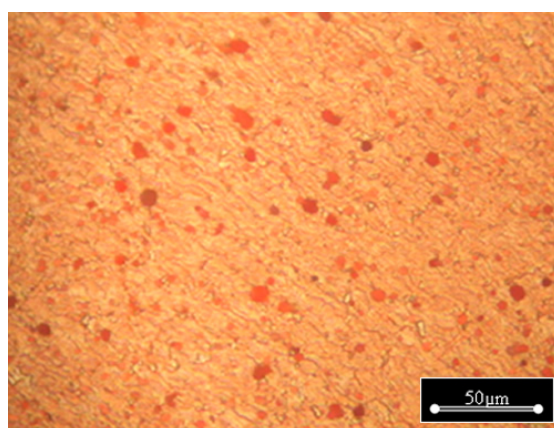
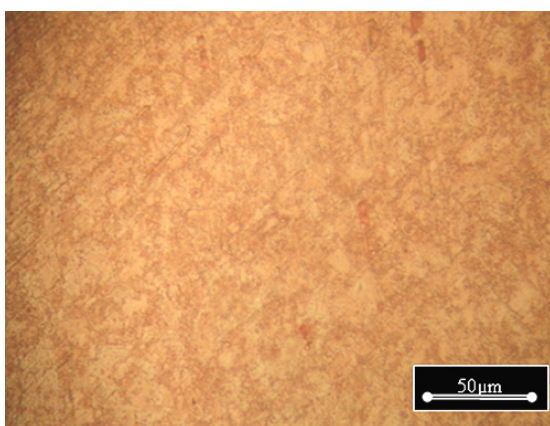
Amostra 2 – I<sub>OPERACIONAL</sub>Amostra 3 – I<sub>CC\_OPERACIONAL</sub>

Figura 26 – Micrografia Transversais das amostras 1, 2 e 3

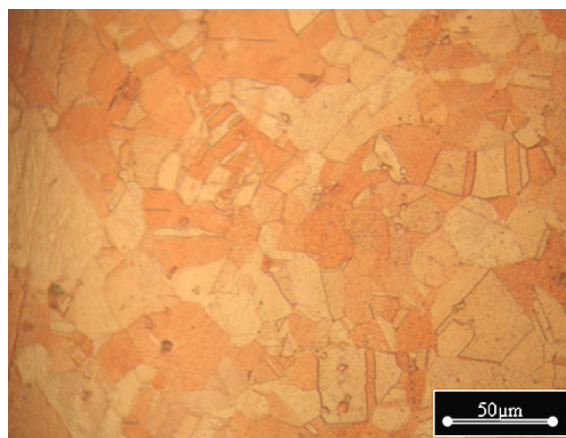
O grupo de amostras da figura anterior, fig. (26), ainda composição do primeiro grupo, denota as condições operacionais pela grande similaridade entre as micrografias. Estas amostras caracterizam bem as propriedades mecânicas necessárias para materiais em uso no SEP para redes aéreas, podendo-se perceber a proporcionalidade média do comportamento dos grãos. A quantidade de grãos possibilita as qualidades esperadas em condutores de energia elétrica, ou seja, a intensificação das propriedades de resistência a tração/compressão, maximizando os limites de escoamento, minimizando assim a possibilidade de alongamento do fio.



Amostra 4 –  $1,5 \times I_{OPERACIONAL}$



Amostra 5 –  $2 \times I_{OPERACIONAL}$

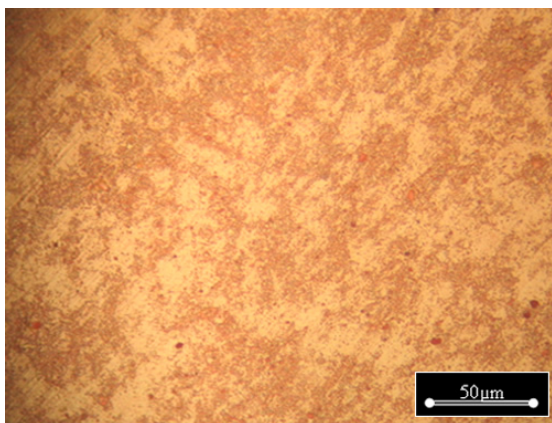


Amostra 6 –  $I_{CC\_SEVERO}$

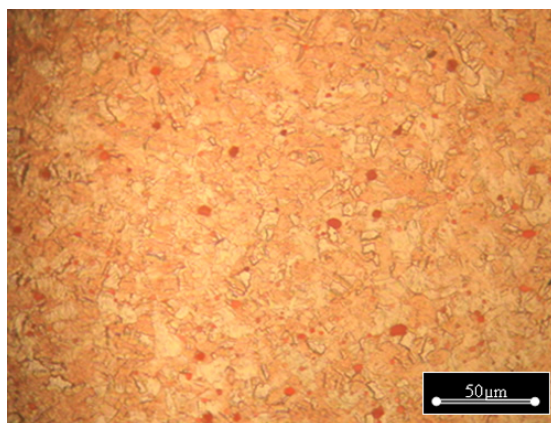
Figura 27 – Micrografia Longitudinais das amostras 4, 5 e 6



O segundo grupo de amostras, fig. (27) e (28), identificam materiais expostos a ações de eventos influentes na descaracterização do produto. As sobrecorrentes as quais foram submetidas as amostras influenciam diretamente no comportamento desses materiais em funcionalidade operacional do sistema elétrico, sobretudo na perda considerável da capacidade de, quando expostos a correntes operacionais, manter a simetria entre os condutores dispostos verticalmente.



Amostra 4 –  $1,5 \times I_{OPERACIONAL}$



Amostra 5 –  $2 \times I_{OPERACIONAL}$



Amostra 6 –  $I_{CC\_SEVERO}$

Figura 28 – Micrografia Transversais das amostras 4, 5 e 6

Para o cobre exposto aos efeitos prolongados de correntes elétricas de sobrecargas, continuamente, caso específico das fig. (27) e (28) amostras 4 e 5, o mesmo mostra-se descaracterizado sob o ponto de vista das tensões de discordâncias e de cisalhamento formadas no encruamento, imposto pelo processo de recuperação e recristalização, haja

vista a formação de núcleos de recristalização perceptíveis. Os pontos de nucleação na recristalização e crescimento de grãos por coalescimento são evidenciados ao longo de todas as imagens, fator este que interfere no alívio das tensões e na conseqüente redução das propriedades mecânicas de resistência a tração e dureza.

As imagens da amostra 6, nas figs. (27) e (28), apresentam micrografias de uma estrutura totalmente equiaxial, sendo produto da recristalização apresentada nas figuras, com grãos bastante grandes em relação ao produto base, impondo um amolecimento bastante significativo na amostra, fato este que inutiliza o fio para aplicações de transmissão de energia elétrica, em razão da perda significativa das características mecânicas.

#### **4.5 Considerações finais**

Considerando-se a capacidade de dissipação de calor através da característica de ótima condutividade térmica das amostras, observou-se o retorno às condições de resistividade elétrica nominal do cobre, ou seja,  $1,74 \times 10^{-6} \Omega.cm$  à  $20^{\circ}C$ , associando-se em média meio grau Celsius ( $0,5^{\circ}C$ ) a cada segundo transcorrido, sendo caracterizado como a velocidade de resfriamento das amostras quando suprimido a fonte de geração de corrente elétrica e conseqüentemente de calor. Para as amostras de cobre ETP coletou-se valores próximos a  $0,5^{\circ}C.s^{-1}$ , com a temperatura ambiente variando entre  $21^{\circ}C$  e  $20^{\circ}C$ . Esta constatação atesta o comportamento dos condutores de cobre instalados em redes de fornecimento de energia, principalmente em baixa tensão (dispostos verticalmente entre eles), onde os mesmos produzem dilatação excessiva quando da transgressão do limite térmico, produzindo desligamento do circuito pela proteção, e quando da chegada de equipe para investigação da causa a rede apresenta, visualmente, configuração padrão do sistema.

Os valores apresentados na tab. (10) e fig. (24) indicam que o fio de cobre permanece com condições operacionais mínimas, sem apresentar dilatação excessiva na exposição a tracionamentos exigidos pela configuração das redes, principalmente, quando exposto a correntes operacionais, nominais ou de curto circuitos de curta duração, com tempo próximo a 100ms, cujo valor destaca o tempo médio de atuação da proteção quando as redes de distribuição estão expostas a sobrecorrente severas. Disso decorre a justificativa

de que os condutores de energia, quando expostos a essas condições, apresentam funcionalidade efetiva no sistema elétrico e vida útil adequada.

A busca pela excelência no atendimento a clientes, objetivando melhoria contínua no nível percentual de satisfação dos usuários dos sistemas elétricos, está focalizada no “tripé” da gestão de processos alcançando-se índices satisfatórios de qualidade, confiabilidade e continuidade no fornecimento. O efeito da variação da temperatura à níveis críticos na análise relacionada ao cobre ETP, influencia diretamente no desempenho da gestão de tais índices, haja vista a consideração obrigatória das perdas de energia por efeito joule relativa ao aquecimento intrínseco do condutor, produzindo conseqüentes causas inerente a curto circuitos entre fases e fase-neutro através do contato provocado pela dilatação dos mesmos, influenciando diretamente na qualidade da energia fornecida. Para manutenção da confiabilidade do sistema e continuidade no fornecimento, ações de controle na gestão desses processos, em caráter preventivo, minimizam a quantidade e a duração de ocorrências de interrupção no fornecimento, principalmente em eventos de rompimento dos fios que compõe o sistema elétrico.

Consultando-se as informações publicadas na tab. (7) obtem-se valores de escalonamento na interação da interferência da intensidade da corrente elétrica de trabalho expostos a temperatura ambiente de 30°C. Isso alerta para cuidados em planejamentos para dimensionamento de condutores projetados para instalação em regiões geográficas onde os mesmos estariam expostos a temperatura ambiente com valores mais acentuados (>40°C), já que nessas condições de clima a demanda de consumo de energia sofre aumento considerável, principalmente na minimização do impacto do calor.

No processo de caracterização das amostras, a cada intervalo de tempo aleatório, tornava-se necessário realinhar o ajuste do valor da corrente no dispositivo gerador, principalmente para os casos de maior corrente, onde a temperatura atingia níveis mais significativos. Isso comprova, na prática, o reconhecimento da influência da temperatura na alteração da resistividade do cobre, conforme fig. (21), dispersando energia elétrica por liberação térmica e conseqüente perda nos valores de corrente elétrica imposto pelo acréscimo da resistência elétrica. Analisando-se os valores da figura têm-se uma projeção linear crescente no comportamento da resistividade em aproximadamente 0,65% para cada 1°C.

O resultado do retensionamento dos condutores recristalizados em redes de distribuição de energia, além da diminuição da seção transversal do condutor, é a assimetria nos espaçamentos entre os mesmos em função da circulação contínua de corrente, provocando o contato entre os mesmos, e conseqüente atuação da proteção produzindo o desligamento do trecho afetado.

## 5. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos dos ensaios aos quais, amostras de fio de cobre nu eletrolíticas – ETP, foram submetidas os diversos tipos de efeitos de eventos possíveis em uma rede de distribuição de energia elétrica, observou-se o comportamento para parâmetros encontrados nas propriedades físicas mecânicas e elétricas, cujo desenvolvimento pode ser descrito como:

- A capacidade de condutividade elétrica mostra-se inalterada quando comparada ao valor de referência padrão, ou seja, à 20°C o resultado dos ensaios de resistividade elétrica para todas as amostras não apontaram variação influente, concluindo-se que considerando-se o desvio padrão (0,82%) pode-se descrever como mesmo comportamento para todas as investigações. Como característica intrínseca dos metais observou-se, também, que a temperatura influencia no valor da resistividade elétrica em média 0,65% a cada 1°C variado.

- A capacidade de condutividade térmica, também, mostra-se similar para todas as amostras, produzindo efeito proporcional quando da variação da corrente elétrica e conseqüente incremento da temperatura externa no fio. Contudo a velocidade de resfriamento foi identificada em  $0,5^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ .

- As características mecânicas do material foram altamente influenciadas pela temperatura imposta pela circulação de corrente elétrica, sendo que para correntes operacionais nominais o comportamento das propriedades mecânicas foram mantidas à parâmetros próximos aos valores estabelecidos como referência e conseqüente funcionalidade esperada para continuidade no fornecimento de energia elétrica. Já para sobrecorrentes produzidas por sobrecarga ou curto circuito as conseqüências indicam que o condutor deverá ser substituído por equipes de manutenção corretiva ou em processos de investigação preventiva ou preditiva para posterior substituição, sob pena de perdas consideráveis no rompimento dos mesmos.

- Sob o ponto de vista das características metalográficas pode-se inferir desgaste funcional nas amostras obtidas, principalmente na microscopia longitudinal das mesmas onde percebe-se o início do processo de recristalização e crescimento de grãos. Os grãos vão se expandindo nos contornos de baixo ângulo, coalescendo-se, incrementando a



propriedade de tenacidade e alongamento da amostra, bem como diminuindo a capacidade de suportar esforços, alongando-se a proporções onde o escoamento proporciona variações de distâncias entre os fios, perdendo a simetria e em consequência ocorrendo o contato entre eles.

- Apesar do controle das condições operacionais quando comparado a vida útil do produto, apresentar regras bem definidas, como por exemplo, a limitação da corrente operacional à 75% do valor da nominal fornecida pelo fabricante, deve-se estabelecer critérios de controle para minimizar os efeitos das interferências dos valores de temperatura na configuração padronizada das redes:

- a). Calibração e ajuste do sistema de proteção contra sobrecorrente objetivando minimizar o tempo de exposição às correntes de sobrecarga e curto circuito;
- b). Manutenção preditiva, através de investigação da temperatura nos condutores por procedimento termográficos por dispositivos de testes por IR (infra-red);
- c). Investigação preventiva no perímetro dos condutores, objetivando encontrar-se pontos de produção de sucos nos fios produzidos por contatos entre eles;
- d). Providenciar a substituição dos fios quando o diagnóstico apontar perda na capacidade operativa dos mesmos; e
- e). Intensificar o uso de condutores isolados.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As informações apresentadas aponta para um indicativo, bastante forte, da necessidade de abranger-se na pesquisa de algumas questões:

- qual índice adequado da máxima capacidade de condução de corrente elétrica um condutor de cobre deve apresentar, sem produzir descaracterização eletromecânica?
- estabelecer critérios de pesquisa, análogo ao cobre, também para condutores de alumínio;
- planejamento e programação para plano de substituição de produtos similares usando táticas de monitoramento e manutenção pró-ativa;
- estudar o comportamento dos materiais de composição das conexões das redes de energia elétrica, haja vista a acentuada perda por efeito Joule devido a qualidade das conexões;

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Askeland**, Donald R.. **The Science and Engineering of Materials**. London: S1 Edition, 1988.
- Bakshi**, U.A.; **Bakshi**, V.U. **Elements of Electrical Engineering**. Shaniwar Peth – Pune, Índia: Techincal Publications Pune, 2005. 314 p.
- Bassalo**, José Maria Filardo. **A Crônica da Física do estado sólido: II. Teoria dos Metais**. Publicado na Revista Brasileira de ensino de Física vol. 15, 1993. Disponível em <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol15a16.pdf>, acessado em Fevereiro de 2009.
- Bassalo**, José Maria Filardo. **A Crônica da Física do estado sólido: III. Teoria das Bandas**. Publicado na Revista Brasileira de ensino de Física vol. 15, 1994. Disponível em <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol16a08.pdf>, acessado em Fevereiro de 2009.
- Byrappa**, Kullaiiah; **Ohachi**, Tadashi. **Crystal Grwth Technology**. New York: Springer, 2003.
- Callister**, William D... **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Traduzido por Sérgio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC-7<sup>a</sup>e, 2008. 705 pg.
- Cardoso**, Rodrigo Perito. **Estudo numérico e experimental do processo de deposição e difusão de níquel via plasma em amostras de ferro na configuração ânodo-cátodo confinado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2003. Disponível em <http://www.tede.ufsc.br/teses/PEMC0717.pdf>, acessado em Julho de 2008.
- Cezar**, Alex Boiarski. **Monitoramento da transição da fase estrutural CCC-CFC da liga  $\text{Co}_x\text{Fe}_{100-x}$  eletrodepositada**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2006. Disponível em <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/6786/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Alex%20Boiarski%20Cezar.pdf>, acessado em Abril de 2009.
- Corrêa**, Jeferson Marian. **Desenvolvimento e implementação de uma micro-rede avançada de alta frequência para integração de fontes alternativas de energia**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria-RS, 2006. Disponível em [http://biblioteca.universia.net/html\\_bura/ficha/params/id/27788440.html](http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/id/27788440.html), acessado em Maio de 2009.

- Coutinho**, Telmo de Azevedo. **Metalografia de não-ferrosos: análise e prática**. São Paulo: Edgard Bläucher, 1980.
- Edminister**, Joseph A.. **Eletromagnetismo-coleção Schaum**. Porto Alegre: Artmed, 2006. 352p.
- Fernández**, Victor Gerardo García. **Constitutive Relations to Model the Hot Flow of Commercial Purity Copper**. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya - EPC. Barcelona, 2004. Disponível em [http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0104105-092144/index\\_an.html](http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0104105-092144/index_an.html), acessado em Agosto de 2007.
- Ferreira**, Itamar; **Martins**, Álvaro; **Matos**, José A. da Silva; **Maiche**, Luiz Gonçalves. **Análises físicas da isolação e do conductor de bobinas estatóricas do gerador n. 4 da usina Henry Borden**. Publicado no XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica em Outubro/1999. Disponível em <http://www.unicamp.br/anuario/99/fem-dema-p-04103.html>, acessado em Janeiro/2009.
- Gallardo**, Jesús Armando Morán. **Impacto de geradores síncronos no desempenho de regime permanente de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas-SP, 2005. Disponível em <http://libdigi.unicamp.br/document/?view=vtls000355249>, acessado em Setembro de 2007.
- Kagan**, Nelson ; **Oliveira**, Carlos César Baroni de ; **Robba**, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de Distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher-1ªe, 2005. 328 pg.
- Mercier**, Jean P.; **Zambelli**, Gerald; **Kurz**, Wilfried. **Introduction to Materials Science**. Paris-France: Elsevier, 2002.
- Mehrer**, Helmut. **Diffusion in solids: Fundamental, methods, Materials, Diffusion-controlled processes**. Springer series in solid state science 155, volume 91-137. Berlin, Germany, 2007. 651 pg.
- Meier**, Mike L.; **Kirchhofer**, Rita. **Resistivity of metal wire as a function of temperature**. Department of Chemical Engineering and Materials Science – University of California, Davis, 2004. Disponível em <http://www.kstreetstudio.com/matsci/files/Meier-NEW-2004-2.pdf>, acessado em Março/2009.

- Padilha**, Angelo Fernando, Siciliano Junior, Fulvio. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de grão e Textura** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.
- Padilha**, Angelo Fernando. **Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 2000.
- Peralta**, Manuel A.. **High Conductivity copper**. Publicado no IEEEExplore Release 2.5. Disponível em [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=464650](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=464650), acessado em Janeiro/2008.
- Prisedsky**, V.V; Vinogradov, V.M.. **Fragmentation of diffusion zone in high-temperature oxidation of copper**. Publicado em Journal of Solid State Chemistry, 2004. Disponível em <http://www.sciencedirect.com>. Acessado em Abril/2008.
- Rao**, K.P.; Prasad, Y.V.R.K. **Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate**. Publicado no Materials Science and Engineering em Março/2004. Disponível em [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6TXD4CDJHJT-3&\\_user=10&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&view=c&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=16291f26569bc9e056a6f00ca3e4c09e](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXD4CDJHJT-3&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=16291f26569bc9e056a6f00ca3e4c09e), acessado em Janeiro/2008.
- Robert**, Renê. **Efeito Pelicular**. Publicado na Revista de Ensino de Física, vol. 22, no. 2, Junho/2000. Disponível em [http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v27\\_583.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v27_583.pdf), acessado em Abril/2009.
- Rossiter**, Paul L.. **The electrical resistivity of metals e alloys**. Melbourne - Austrália: Cambridge University Press, 1991. 434 pg.
- Shackelford** James F..**Introduction to Materials Science for Engineers**. Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009.
- Van Vlack**, Lawrence Hall. **Princípios de Ciência dos Materiais**. Traduzido por Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 427 pg.

### **Bookmarks/Handbooks**

- CDA**, Copper Development Association. **Equilibrium Diagrams – selected copper alloy diagrams illustrating the major types of phase transformation**. CDA publication 94.

United Kingdom – UK, 1992. 36 pg. <http://www.cda.org.uk/frontend/numpubs.htm>, acessado em Janeiro/2009.

**CDA**, Copper Development Association. **For Electrical Engineering**. CDA publication 122. United Kingdom – UK, 1998. 80 pg. Disponível em <http://www.cda.org.uk/frontend/numpubs.htm>, acessado em Julho/2008.

**Czichos**, Horst; Saito, Tetsuya; Smith, Leslie. **Springer Science handbook: Materials Measurement Methods**. Leipzig – Germany: LE-TeX GbR, 2006.

**Davis**, Joseph R.. **Copper and Copper Alloys: ASM Specialty handbook**. Ohio - USA: ASM International, 2001. 646 pg.

**De Podesta**, Michael. **Understanding the Properties of Matter**. Lincoln - USA: CRC Press, 2002. 434 pg.

### **Entidades representativas e manuais de fabricantes**

**Caraíba Metais. Relatório de sustentabilidade, 2007**. Disponível em <http://www.paranapanema.com.br/ogruponoticias/pdfs/RelatorioSustentabilidade.pdf>, acessado em Janeiro de 2008.

**FICAP-SIEMENS Brasil. Cabos Energia – Fios e Cabos Termoplásticos de Baixa Tensão**, Disponível em <http://www.eurocabos.com.br/catalogos/ficap/termoplas.pdf>, acessado em Setembro/2008.

**Procobre. Aplicações do Cobre: instalações elétricas**. Disponível em [http://www.procobre.org/pr/aplicacoes\\_do\\_cobre/instalacoes\\_eletricas.html](http://www.procobre.org/pr/aplicacoes_do_cobre/instalacoes_eletricas.html), acessado em Janeiro/2009.

**SCDA – Scandinavian Copper Development Association. Copper Metal : Properties**. Disponível em <http://www.sdda.com/copper/copper.html>, acessado em Janeiro/2009.

**UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Relatório de análise nº 015/08**. Departamento de Engenharia de Materiais. Criciúma – SC, 2008.

### **Normas Técnicas**

- Celesc** Distribuição SA. Instrução de especificação E-313.0032. **Especificação de condutores de cobre nu.** Florianópolis – SC, 2002. 15 pg.
- NBR5111** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Fios de cobre nus, de seção circular, para fins elétricos - Especificações.** Rio de Janeiro: 1997, 7 pg.
- NBR5410** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Instalações elétricas de baixa tensão.** Rio de Janeiro: 2004, 209 pg.
- NBR5471** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Condutores elétricos.** Rio de Janeiro: 1986, 10 pg.
- NBR6524** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Fios e cabos de cobre duro e meio duro com ou sem cobertura protetora para instalações aéreas – Especificação.** Rio de Janeiro: 1998, 9 pg.
- NBR6810** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Fios e cabos elétricos: Tração à ruptura em componentes metálicos.** Rio de Janeiro: 1981, 4 pg.
- NBR6814** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Fios e cabos elétricos: ensaio de resistência elétrica.** Rio de Janeiro: 1986, 3 pg.
- NBR6815** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **Fios e cabos elétricos: ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos.** Rio de Janeiro: 1981,3 pg.