

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS/MG

ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ LUIZ DE JESUS MANTOVANI

Biblioteca Monsenhor Domingos Prado Fonseca

N. Class. **M.669.3**

Cutter **M.293 f**

Ano/Ed. **2010**

**SISTEMA DE BIBLIOTECAS
FEPESMIG**

BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

**FIO DE COBRE ESMALTADO:
PROCESSO OXYGEN FREE VERSUS PROCESSO ETP**

**Varginha/MG
2010**

ANDRÉ LUIZ DE JESUS MANTOVANI

**FIO DE COBRE ESMALTADO:
PROCESSO OXYGEN FREE VERSUS PROCESSO ETP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Fabiano Farias de Oliveira.

**Varginha - MG
2010**

ANDRÉ LUIZ DE JESUS MANTOVANI

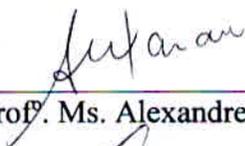
**FIO DE COBRE ESMALTADO:
PROCESSO OXYGEN FREE VERSUS PROCESSO ETP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico pela banca Examinadora composta pelos membros: Prof. Fabiano Farias de Oliveira, Prof^o. Ms. Alexandre Soriano e Prof. Esp. Márcio de Santana.

Aprovado em 25/11/2010



Prof^o. Fabiano Farias de Oliveira



Prof^o. Ms. Alexandre Soriano



Prof^o. Esp. Márcio de Santana

OBS.:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus. Depois, a minha esposa Camila e ao meu filho Vinícius, por compreenderem alguns momentos que estive ausente. Aos meus pais Luiz e Vera e aos meus irmãos Guilherme, Gabriel e Alexandre por sempre me apoiarem durante todo este tempo de estudos.

Agradeço à minha família, aos professores, aos amigos de sala de aula e aos colegas de trabalho por terem contribuído para a realização deste trabalho.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”.

Dalai Lama

RESUMO

O cobre *oxygenfree*(OF) é um produto de alta qualidade e que apresenta uma pureza média de 99,995% de cobre, contendo no máximo 10 partes por milhão (PPM) de oxigênio. Se comparado ao cobre *electrolytic tough pitch* (ETP) que apresenta uma pureza média de 99,95% de cobre e que contém em média 200 PPM de oxigênio, é realmente um produto que oferece melhor condutividade elétrica, principalmente nas aplicações das indústrias elétricas e eletroeletrônicas. O intuito deste trabalho é comparar os dois processos de fabricação, OF e ETP, na produção do fio de cobre esmaltado, demonstrando que através do processo OF o fio irá apresentar menor resistência ôhmica do que no processo ETP, sendo possível assim, reduzir a seção transversal do fio 0,580mm de diâmetro produzido pelo processo OF, mantendo ainda o valor de resistência ôhmica dentro das especificações técnicas exigidas pelos clientes consumidores deste fio.

Palavras-chave: Cobre OF, cobre ETP, resistência ôhmica.

ABSTRACT

The oxygen free copper (OF) is a high quality product and that presents an average purity of 99.995% copper, containing a maximum of 10 parts per million (PPM) of oxygen. Compared to copper electrolytic tough pitch (ETP), which presents an average purity of 99.95% copper and containing an average of 200 PPM of oxygen, is actually a product that offers better electrical conductivity, especially in applications of electrical and electronics industries. The purpose of this study is to compare the two processes, OF and ETP, the production of enameled copper wire, demonstrating that through the process OF the wire will have low ohmic resistance of the ETP in the process, and can thus reduce the section transverse wire 0,580 mm in diameter produced by the process of OF, while still maintaining the value of ohmic resistance within the technical specifications demanded by consumers in this thread.

Keywords: copper OF, copper ETP, ohmicresistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Foto 01: Machado de cobre usado na Europa, durante a Idade do Cobre.....	16
Foto 02: Francisco “Baby” Pignatari e a esposa em sua fábrica (abril de 1957).....	17
Foto 03: Minérios de cobre sulfetado. Destacam-se a bornita, azulada e a calcopirita, dourada.....	21
Foto 04: Concentrado de cobre com cerca de 30% a 33% de pureza.....	22
Foto 05: Fundição de <i>anodos</i> na roda de moldagem.....	23
Foto 06: Retirada de <i>anodos</i> do molde, após a fundição na roda de moldagem.....	23
Foto 07: Trabalho de inspeção de curtos nas células eletrolíticas.....	24
Figura 08: Fluxograma do processo de extração do minério de cobre até a obtenção do fio de cobre.....	25
Foto 09: Jumbo de cobre produzido pelo processo ETP.....	28
Figura 10: Máquina vertical de fundição contínua para ligas não ferrosas.....	29
Foto 11: Mesa de alimentação das placas de catodo.....	30
Foto 12: Matrizes de solidificação.....	31
Foto 13: Máquina de fundição contínua onde é retirado o cobre OF.....	32
Foto 14: Fieiras de trefilação.....	34
Figura 15: Representação esquemática da conformação mecânica pelo processo de trefilação.....	35
Foto 16: Máquina de trefilação primária.....	35
Foto 17: Máquina de esmaltação vertical.....	36
Foto 18: Micrômetro digital milesimal.....	39
Foto 19: Equipamento de medição de resistência ôhmica.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resistividade de alguns materiais à temperatura ambiente (20°C).....	20
Tabela 02 –Composição química do catodo - processo ETP.....	25
Tabela 03 –Composição química do catodo - processo OF.....	26
Tabela 04 –Tabela de propriedades do vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro obtido a partir do processo de fundição contínua ETP.....	29
Tabela 05 –Composição química do vergalhão de cobre - processo OF.....	29
Tabela 06 –Tabela de propriedades do vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro obtido a partir do processo de fundição contínua OF.....	32
Tabela 07 –Composição química do vergalhão de cobre - processo OF.....	32
Tabela 08 – Comparativo entre o fio 0,580mm produzido pelo processo ETP e pelo processo OF.....	40
Tabela 09 – Comparativo Geral entre o cobre OF e o cobre ETP.....	40
Tabela 10 – Especificação do diâmetro do condutor e para a resistência ôhmica do fio de cobre esmaltado ETP de 0,580mm de diâmetro.....	42
Tabela 11 – Valor proposto para a especificação do diâmetro do condutor e para a resistência ôhmica do fio de cobre esmaltado OF de 0,580mm de diâmetro.....	42
Tabela 12 – Redução média obtida em mm, g/m e %a partir da nova especificação do cobre OF de 0,580mm de diâmetro. Quantidade faturada no mês de junho de 2008 para o fio 0,580mm. Redução média obtida em kg se fosse utilizado o cobre OF. Redução em R\$, considerando que o quilo do cobre custe 20 reais.....	43
Tabela 13 – Ganhos obtidos pelo cliente após um ano do projeto implantado.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OF:*OxygenFree*(Livre de Oxigênio)

PPM:Partes Por Milhão

ETP:*ElectrolyticToughPitch*(Eletrolítico de Arremesso)

IACS:*InternationalAnnealedCopper Standard*(Padrão Internacional do Cobre Recozido)

a.C:antes de Cristo

DNPM:Departamento Nacional da Produção Mineral

SI:Sistema Internacional de Unidades

GLP:Gás Liquefeito de Petróleo ou Gás de Cozinha

Cu:Símbolo Químico do Cobre

Ag:Símbolo Químico da Prata

As:Símbolo Químico do Arsênio

Bi:Símbolo Químico do Bismuto

Cd:Símbolo Químico do Cádmio

Co:Símbolo Químico do Cobalto

Cr:Símbolo Químico do Cromo

Fe:Símbolo Químico do Ferro

Mn:Símbolo Químico do Manganês

P:Símbolo Químico do Fósforo

Pb:Símbolo Químico do Chumbo

S:Símbolo Químico do Enxofre

Sb:Símbolo Químico do Antimônio

Se:Símbolo Químico do Selênio

Si:Símbolo Químico do Silício

Sn:Símbolo Químico do Estanho

Te:Símbolo Químico do Telúrio

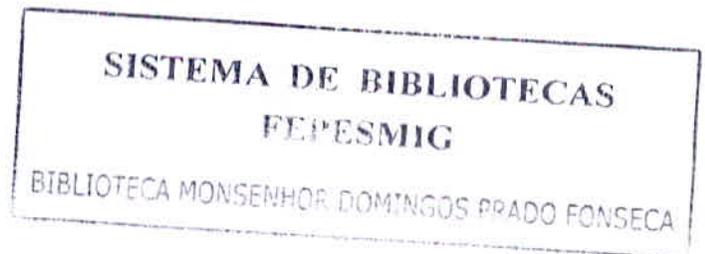
Zn:Símbolo Químico do Zinco

Al:Símbolo Químico do Alumínio

Mg:Símbolo Químico do Magnésio

H:Símbolo Químico do Hidrogênio

O₂:Oxigênio



LISTA DE UNIDADES

mm:Milímetro

Ω :Ohms

Ωm :Ohms metro

m:Metro

m^2 :Metro quadrado

S/m:Siemens por metro

%IACS:Percentual de IACS

%:Percentual

$^{\circ}\text{C}$:Graus Celsius

$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$:Ohms milímetro quadrado por metro

g/cm^3 :Gramas por centímetro cúbico

Ωcm :Ohms centímetro

kg:Quilograma

MPa:Mega Pascal

HRF:Rockwell F

m/min: Metros por minuto

t:Tonelada

Ω/m :Ohms por metro

$^{\circ}$:Graus

g/m :Gramas por metro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Introdução	15
2.2 História do Cobre no Mundo	15
2.3 História do Cobre no Brasil	16
2.4 Conceitos	18
2.4.1 Resistência Ôhmica ou Resistência Elétrica.....	18
2.4.2 Condutividade Elétrica	18
2.4.3 Resistividade Elétrica	19
2.4.4 Resistividade Elétrica Padrão	20
2.5 Características do Cobre	20
2.6 O Processo de Extração do Cobre	20
2.7 A Fundição Contínua, Processo ETP	27
2.8 A Fundição Contínua, Processo OF	30
2.9 Trefilação	33
2.10 Esmaltação	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Produção dos Fios	38
3.2 Ensaio Realizados	38
3.2.1 Ensaio Dimensional	38
3.2.1.1 Descrição resumida do ensaio	38
3.2.2 Ensaio de Resistência Ôhmica.....	39
3.2.2.1 Descrição resumida do ensaio	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Identificação da Oportunidade de Melhoria	41
4.2 Desenvolvimento da Amostra	42
4.3 Ganhos do Cliente	42
4.4 Ganhos da São Marco	44
5 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, o cobre ETP sempre foi o material mais utilizado para o processo de fabricação de fios de cobre esmaltados destinados às indústrias elétricas e eletrônicas. Com a evolução do processo de obtenção do cobre OF, esta condição vem cada vez mais sendo deixada para trás. Desde 2006, que a São Marco Indústria e Comércio Ltda., empresa fabricante de fios de cobre esmaltados, vem aprimorando seu processo de fabricação, seja na etapa de retirada do vergalhão de 8,000mm de diâmetro através da fundição contínua pelo processo OF, seja na etapa de trefilação e no processo final de esmaltação e, assim, fornecendo ao mercado nacional e internacional aproximadamente 1.500 toneladas por meses deste produto garantindo uma ótima qualidade aos seus clientes.

A produção do vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro através da fundição contínua pelo processo OF, garante ao produto gerado uma condutividade elétrica média de 102% *International Annealed Copper Standard* (IACS), contra uma condutividade elétrica média de 101% IACS do cobre produzido pelo processo ETP. Esta maior condutividade elétrica implica em uma resistividade elétrica menor e em consequência disto temos um material com menor resistência ôhmica ou resistência elétrica também. Assim, observou-se a oportunidade de oferecer ao mercado consumidor de fio de cobre esmaltado um produto capaz de ser bobinado em menor escala proporcionando uma redução na quantidade de fios seja no motor elétrico ou no compressor hermético.

Para que o mercado se abra a este produto, se fez necessário um trabalho específico para convencer os consumidores de que seria possível trabalhar com uma seção transversal do fio de cobre esmaltado menor, mantendo ainda a resistência ôhmica do mesmo dentro das especificações técnicas requeridas.

O objetivo deste estudo é demonstrar como este trabalho foi executado, comparando o fio de cobre esmaltado produzido pelo processo ETP e pelo processo OF. Com esta comparação, o fio no processo OF irá apresentar menor resistência ôhmica do que no processo ETP, nas mesmas condições de máquinas e ferramentas, sendo possível assim, reduzir a seção transversal do mesmo mantendo ainda o valor de resistência ôhmica dentro das especificações técnicas exigidas pelos clientes consumidores deste produto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Introdução

Para a obtenção do fio de cobre esmaltado são necessárias várias etapas de produção. Este capítulo tem por objetivo, analisar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a elaboração deste trabalho, apresentando todas estas etapas de produção e comparando os dois processos de fabricação: o OF e o ETP.

2.2 História do Cobre no Mundo

A exata data da descoberta do cobre se perde pelos tempos. Há quem afirme que este metal foi descoberto há mais de 10 mil anos. Outros pesquisadores encolhem esse período para 6 mil anos e ainda garantem que sua grande época aconteceu em torno de 2.000 a.C.

Para Moura (2007, p.10) “A primeira fundição do cobre também aguça a imaginação dos estudiosos. Como todo avanço, ela deve ter sido fruto do acaso, da necessidade e, claro, de um olhar criador sobre a vida e a natureza. Eis como a cena é hoje reconstituída: homens primitivos fazem uma fogueira em cima de uma pedra casualmente rica em minério de cobre; o fogo revela-se suficiente para soltar estrias de cobre nativo; o primeiro cobre escorre, generoso, sobre a rocha”.

Moura (2007, p.11) diz que “[...] a partir do ano 3.500 a.C., na Idade de Cobre-Pedra ou Calcolítica, desenvolveu-se a arte de fundir o cobre. Aqueles primeiros metalúrgicos já se valiam de técnicas de “refinação a fogo” do cobre, colocando toras de madeira verde no metal em fusão, a fim de reduzir o conteúdo de oxigênio, prática até hoje empregada. Também datam desse período as tubulações de cobre no Egito”.

Nos primórdios do homem sobre a Terra, suas primeiras ferramentas eram feitas com rochas e ossos. Então surgiu o cobre. Macio, dúctil, maleável. Uma mão na roda, na hora de criar ferramentas e apressar nossos primeiros e decisivos avanços tecnológicos. Encantados, os primeiros operários do cobre viram com que facilidade aquele material podia ser martelado, laminado e, dependendo de maior ou menor imaginação criadora, tomar as mais diversas formas, em casa, na arte e na guerra” (Moura, 2007, p.11).

“O cobre romano vinha em grande parte do Chipre – *Cyprium*, em latim –, de que, provavelmente, se origina *cuprum* e a sigla Cu, símbolo químico do cobre” (MOURA, 2007, p.18).

“São muitas, aliás, as explicações para o nome cobre. *Cuprum* seria derivado da palavra assíria *Kipar*. Outra explicação é que a palavra cobre teria sua origem no próprio nome da ilha de Chipre – *Kypros*, em grego, a *Cyprium*, em latim –, onde eram abundantes as jazidas do metal” (Moura, 2007, p.18).

Moura (2007, p.19) diz que “[...] A ilha de Chipre exportava quantidades consideráveis do metal para o Egito e para as ilhas do mar Egeu. Dali a metalurgia do cobre passou para Creta, de onde chegou à Grécia e ao continente. Mais tarde espalhou-se em direção à Europa Central e ao longo do litoral do Mediterrâneo. Segundo outros historiadores, o conhecimento do cobre e de suas ligas teria vindo também do Oriente, atravessado os Cárpatos ainda no fim de 3.000 a.C., dali

chegando à Europa Central. Ricas em estanho, as cadeias montanhosas que circundam a Boêmia tornaram-se uma importante região mineira, onde eram obtidos os minérios para a produção de bronze – o cobre e o estanho”.



Foto 01: Machado de cobre usado na Europa, durante a Idade do Cobre

Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007

A partir destes dados históricos, percebe-se que o cobre sempre exerceu um papel fundamental na evolução da humanidade, sendo usado em todas as etapas das revoluções tecnológicas pelas quais o homem já passou. O fato de se ter encontrado objetos de cobre tão antigos em diversos lugares do mundo é prova da importância do metal.

2.3 História do Cobre no Brasil

“Nossa primeira área de cobre foi descoberta na Bahia, em 1783, numa região próxima à cidade de Juazeiro, mas permaneceu inexplorada”. (MOURA, 2007, p.54)

“No início de 1850, o Governo brasileiro sentiu a necessidade de incentivar a construção de estradas de ferro para escoar sua crescente produção agrícola. O Brasil já exportava cerca de 300 mil sacas de café, que saíam do país pelos portos fluminenses de Angra dos Reis e Paraty e pelo de Santos, em São Paulo. O transporte até os portos era feito no lombo de burros” (Moura, 2007, p.54).

Moura (2007, p.54 e 55) diz que “[...] Duas estradas de ferro foram construídas na região Nordeste, a Recife – São Francisco, em 1858, e a Bahia – São Francisco, inaugurada em 1860. Logo foi percebida a necessidade de ampliar a rede ferroviária. As escavações para novas estradas, coordenadas por engenheiros de ferrovias, como Antônio Maria de Oliveira Bulhões e o francês Charles Bernard, levaram à

descoberta de minérios. Entre eles, na área de uma fazenda, a Caraíba, na região de Jaguarari, sertão baiano a 500 quilômetros de Salvador, estava o cobre. Era a década de 1870”.

Moura (2007, p.55) também diz que “[...]Em 1900, outro engenheiro, Francisco de Paula Oliveira, realizou as primeiras escavações da mina de Caraíba, cavou um poço de 14 metros e constatou que o cobre ali era uma realidade à espera de alguma providência. No entanto, a distância dos grandes centros e a dificuldade em transportar o material fizeram com que o projeto de exploração ficasse parado por mais alguns anos. Só em 1944 é que os depósitos de Caraíba foram, finalmente, registrados no Departamento Nacional da Produção Mineral, DNPM. Investimentos sérios só seriam feitos pelo empresário Francisco Baby Pignatari, nos anos 60”.

Porém, demorou ainda alguns anos para que a produção de cobre fosse iniciada no Brasil.

Moura (2007, p.60 e 61) diz que “[...] Só em 1976 o Ministério da Indústria e Comércio finalmente aceitou que fossem instaladas na Bahia as unidades de concentração e metalurgia do cobre. O Projeto Caraíba – a mineradora em Jaguarari e a Caraíba Metais (metalurgia), no município de Dias d’Ávila, no pólo de Camaçari –, finalmente, havia sido aprovado e, no ano seguinte, começou a ser implantado. A exploração da mina a céu aberto teve início em dezembro de 1978 e, dois anos depois, a Mineradora Caraíba produzia seu primeiro concentrado de cobre. Para abrigar os trabalhadores da mina, foi criado o distrito de Pilar, a 60 quilômetros de Jaguarari. Atualmente são 1,6 mil habitações e uma população de aproximadamente 8 mil habitantes. A infra-estrutura também seguiu a receita de Pignatari: foi construído um hotel, escolas de níveis fundamental e médio, clubes, hospital, bancos e até um estádio de futebol. Em 1981, o concentrado da Mineração Caraíba passou a ser comercializado. A metalurgia na Caraíba Metais, começou a funcionar em 1982. A empresa se tornou a única companhia produtora de cobre eletrolítico do País”.



Foto 02: Francisco “Baby” Pignatari e a esposa em sua fábrica (abril de 1957)

Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007

Francisco “Baby” Pignatari não viu nada disso acontecer. Faleceu em 1977, vítima de leucemia. Sonhador e corajoso, deixou, entretanto, seu nome escrito na história da industrialização no Brasil (Moura, 2007, p.61).

2.4 Conceitos

2.4.1 Resistência Ôhmica ou Resistência Elétrica

Pode ser definida como a capacidade que um corpo qualquer tem de se opor a passagem de elétrons, quando neste corpo, existe uma diferença de potencial aplicada.

“A resistência elétrica é uma característica de um objeto em particular e depende do material de que ele é feito, assim como também do seu comprimento e área da seção transversal” (HALLIDAY, 2008, p.111).

Logo a resistência ôhmica pode ser dada pela seguinte expressão:

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

Onde:

R = Resistência elétrica, dada em Ω

ρ = resistividade elétrica, dada em Ωm

L = comprimento, dado em m

A = área, dada em m^2



2.4.2 Condutividade Elétrica

E definida como uma medida de quão bem um material acomoda o movimento de uma carga elétrica.

“Um valor grande de condutividade elétrica indica que o material é um bom condutor de corrente elétrica. A condutividade é uma propriedade do material, e não de uma amostra qualquer do material. A unidade do SI para a condutividade é o *Siemens por metro* (S/m)” (HALLIDAY, 2008, p.110).

Os valores de condutividade são muitas vezes apresentados como %IACS. IACS é uma sigla que significa *International Annealed Copper Standard*, ou seja, Padrão Internacional do Cobre Recozido. A condutividade do cobre recozido é $5,8108 \times 10^7$ S/m e é definido como

100%IACS a 20°C. Todos os outros valores de condutividade estão relacionados com a condutividade do cobre recozido. Portanto, o ferro com um valor de condutividade de $1,044 \times 10^7$ S/m, tem uma condutividade de aproximadamente 18% do cobre recozido, e isso é relatado como 18% IACS.

Uma observação interessante é que hoje, o comércio de produtos de cobre puro tem valores superiores a 100%IACS de condutividade elétrica, porque as técnicas de processamento vêm cada vez mais sendo aprimoradas e desta forma é possível remover uma quantidade maior de impurezas do metal.

Valores de condutividade elétrica dados em Siemens/metro podem ser convertidos para % IACS multiplicando o valor da condutividade por $1,7241 \times 10^{-6}$.

2.4.3 Resistividade Elétrica

É o inverso da condutividade elétrica. Pode ser definida como a oposição de um corpo para o fluxo da corrente elétrica através dele. A resistividade depende do tipo de material. Materiais com baixa resistividade são bons condutores de eletricidade e materiais com alta resistividade são bons isolantes. A unidade SI de resistividade elétrica é o ohm metro.

Os valores de condutividade e resistividade elétricas são tipicamente relatados a 20°C. Isso é feito porque a condutividade e resistividade do material são dependentes da temperatura. A condutividade da maioria dos materiais diminui com o aumento da temperatura. Como alternativa, a resistividade do material aumenta com o aumento da temperatura.

Quando o coeficiente de temperatura é conhecido, o valor da resistividade ajustado pode ser calculado utilizando a seguinte expressão:

$$R_1 = R_2 \times [1 + \alpha \times T_{(T_1 - T_2)}]$$

Onde:

R_1 = valor ajustado resistividade a T_1

R_2 = valor de resistividade medido ou conhecido a uma temperatura T_2

α = Coeficiente de temperatura

T_1 = temperatura na qual o valor de resistividade precisa ser conhecido

T_2 = temperatura que conhecidos ou o valor medido foi obtido

A tabela a seguir irá informar os valores de resistividade elétrica de alguns materiais e seus respectivos coeficientes de temperatura.

Tabela 01 – Resistividade de alguns materiais à temperatura ambiente (20°C)

Material	Resistividade (Ωm)	Coefficiente de Temperatura
Prata	$1,62 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-3}$
Cobre	$1,69 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-3}$
Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-3}$
Ferro	$9,68 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-3}$

Fonte: HALLIDAY, David. Física 3. 5ª edição. Rio de Janeiro, 2008

2.4.4 Resistividade Elétrica Padrão

“A resistividade elétrica padrão de vergalhões de cobre, no estado recozido, é de $0,017241 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ a 20°C , equivalente a uma condutividade mínima de 100% IACS, exceto para o cobre eletrolítico isento de oxigênio, cujo valor é de $0,017070 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ a 20°C , equivalente a uma condutividade mínima de 101,0 %IACS” (NBR 14733, SET 2001).

2.5 Características do Cobre

O cobre é até hoje um dos metais mais utilizados nas aplicações industriais devido a suas excelentes características elétricas, mecânicas e térmicas.

Segundo Chiaverini (1986, vol.III, p.169 e 170) “O cobre é um metal vermelho-marrom, que apresenta ponto de fusão correspondente a 1.083°C e densidade correspondente a $8,96 \text{ g/cm}^3$ (a 20°C), sendo, após a prata, o melhor condutor do calor e da eletricidade. Sua resistividade elétrica é de $1,7 \times 10^{-6} \text{ ohm-cm}$ (a 20°C). Por este último característico, uma de suas utilizações principais é na indústria elétrica. O cobre apresenta ainda excelente deformabilidade. Além disso, o cobre possui boa resistência à corrosão: exposto à ação do ar, ele fica, com o tempo, recoberto de um depósito esverdeado. A oxidação, sob a ação do ar, começa em torno de 500°C . Não é atacado pela água pura. Por outro lado, ácidos, mesmo fracos, atacam o cobre na presença do ar. Apresenta, finalmente, resistência mecânica e característicos de fadiga satisfatórios, além de boa usinabilidade, cor decorativa e pode ser facilmente recoberto eletrodeposição ou por aplicação de verniz”.

2.60 Processo de Extração do Cobre

O processo de extração do cobre começa com a extração do minério com apenas 3% do metal.

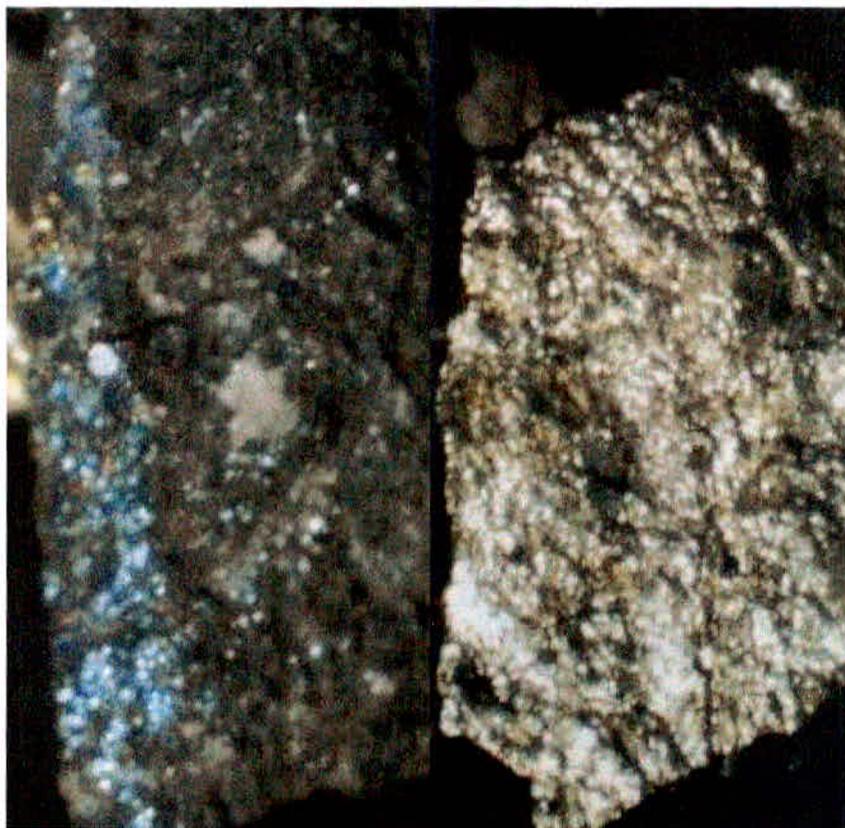


Foto 03: Minérios de cobre sulfetado. Destacam-se a bornita, azulada e a calcopirita, dourada
Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007

Depois, o minério passa pelo processo de britagem onde as pedras são reduzidas a tamanhos menores. Logo após a britagem vem a etapa de moagem, onde o minério sofre um processo de moagem em sucessivas etapas, sendo transformado em finos. A fase seguinte é de flotação, onde os finos provenientes da moagem são misturados com água e produtos químicos e colocados em tanques especiais. Com a ajuda de ar injetado nesse banho, forma-se uma espuma, que carrega as partículas ricas em cobre, sendo essa espuma recolhida em calhas laterais e conduzida a um forno de secagem. O produto assim obtido contém em média 30% em peso de cobre, sendo então embarcado para a metalurgia.

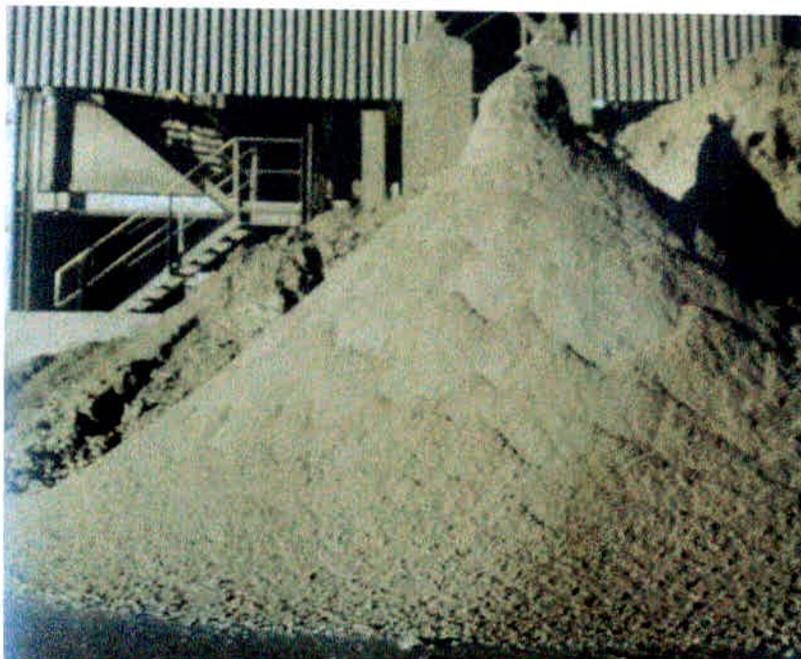


Foto 04: Concentrado de cobre com cerca de 30% a 33% de pureza

Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007.

Moura(2007, p.72)diz que “[...] O cobre da Mineração Caraíba é retirado da mina subterrânea com apenas 3% do metal. A etapa seguinte é a britagem, quando as pedrinhas são moídas. Depois, ele passa pela rebritagem, quando é novamente triturado, transformado em pó. A fase seguinte é a da flotação, na qual os minérios se separam e o cobre se concentra. O composto sai da flotação com teor entre 30% e 33% de cobre. Esse concentrado, colocado em caminhões, vai até a estação de carregamento da Barrinha, a 54 quilômetros da mina, de onde segue pela ferrovia Centro Atlântica para a Caraíba Metais, a 500 quilômetros dali”.

O material proveniente da mineração é misturado ao calcário e alimentado no primeiro forno de refino, chamado *flash*. No forno, cobre mais calcário fundem-se formando o *matte* que contém 60% de cobre. O *matte* é transportado em cadinhos até os fornos conversores, que através da injeção de oxigênio produz o cobre *blister* com teor de 98,5%. Novamente o cobre *blister* é transportado ao forno de refino a fogo, com queima de gás de cozinha (GLP) obtendo-se, assim, um material com teor de 99,3% de cobre contido. Esse material é vazado em moldes especiais formando os *anodos* (placas de aproximadamente 1,00m x 1,00m).

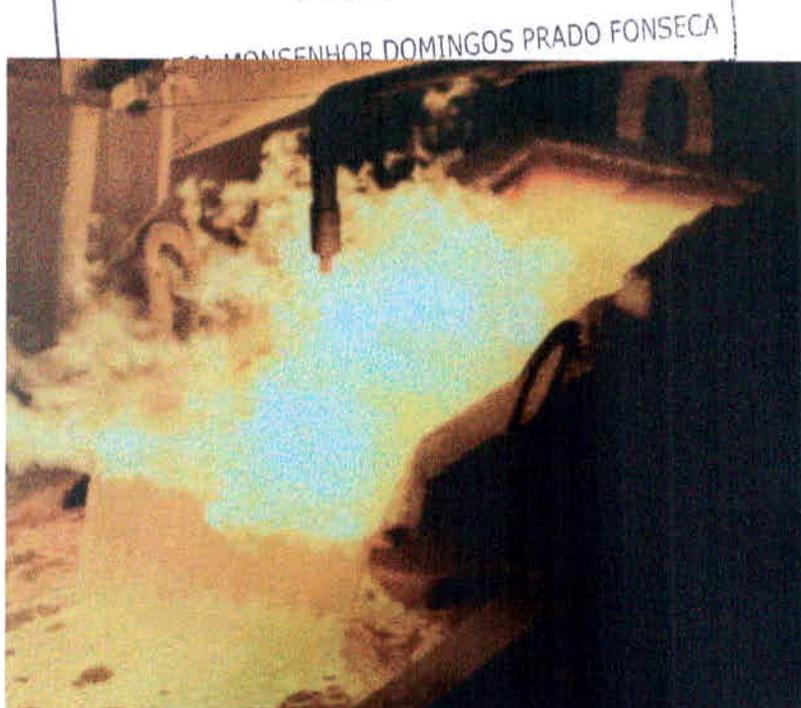


Foto 05: Fundição de *anodos* na roda de moldagem

Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007



Foto 06: Retirada de *anodos* do molde, após a fundição na roda de moldagem

Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007

A etapa seguinte é o refino eletrolítico, onde os anodos são colocados em cubas contendo solução de água e ácido sulfúrico, juntamente com chapas de partida de cátodo, denominadas chapas mãe. Através da passagem de corrente elétrica, do anodo, pólo positivo (+) para o cátodo pólo negativo (-) e, ataque do ácido sulfúrico ao anodo, ocorre uma migração do cobre para a chapa do cátodo, obtendo-se assim, um cobre com 99,9% de pureza.



Foto07: Trabalho de inspeção de curtos nas células eletrolíticas

Fonte: MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007

Moura(2007, p.66)diz que “[...]O processo produtivo da Caraíba pode ser dividido em quatro etapas.Começa com a fundição, em que acontece a fusão dos concentrados de cobre que chegam das mineradoras, em geral com 30 % do metal.Da fundição sai um novo produto, o *matte*, com um teor de 60 % de cobre, além da escória usada para jateamento de navios e correção de clínquer, matéria-prima do cimento. Submetido a novo ciclo de redução, o *matte* resulta no cobre *blister*, cujo teor de cobre corresponde a 98,5 %. Segue-se a etapa de refino a fogo, em que, pela eliminação do oxigênio e do enxofre residual, o teor de cobre passa para 99,4 %, sendo então moldado na forma de ânodos. A fase seguinte é o refino eletrolítico, os ânodos são colocados nas chamadas células de eletrólise, intercalados com as chapas de partida. O cobre é então transferido para essas chapas, constituindo o produto final, o cátodo de cobre, com pureza igual ou superior a 99,9 %, ficando os metais preciosos - ouro e prata-no fundo das células, de onde são retirados em forma de lama anódica e, posteriormente, processados em plantas específicas no exterior”.

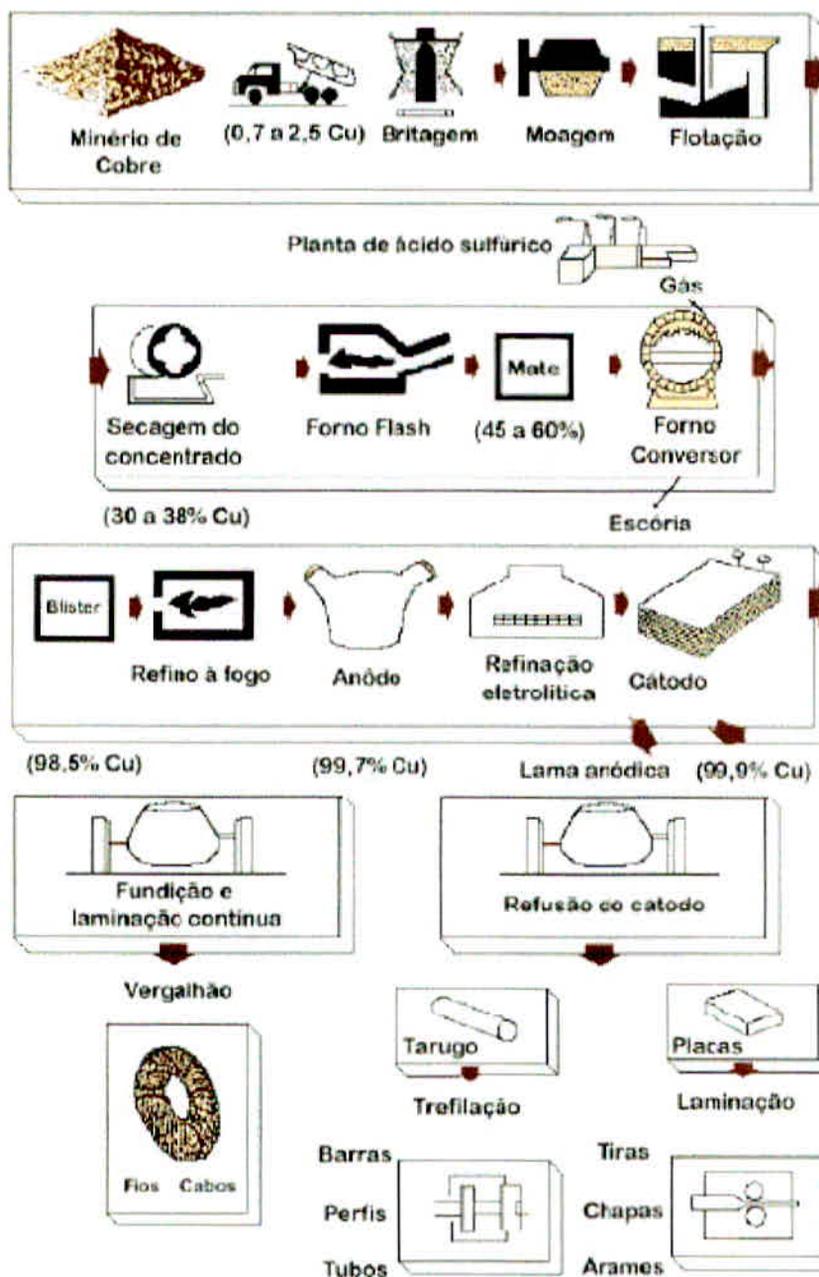


Figura 08: Fluxograma do processo de extração do minério de cobre até a obtenção do fio de cobre.

Fonte: <http://www.paranapanema.com.br>

Tabela 02 – Composição química do catodo - processo ETP

Ag	< 5,00 PPM
As	< 2,00 PPM
Bi	< 0,50 PPM
Co	< 1,00 PPM
Cr	< 1,00 PPM
Fe	< 6,00 PPM
Mn	< 1,00 PPM
Pb	< 1,00 PPM

S	<5,00 PPM
Sb	< 1,00 PPM
Se	< 0,50 PPM
Sn	< 1,00 PPM
Te	< 1,00 PPM
Zn	< 1,00 PPM
Cu	> 99,90 %

Fonte: O autor

Tabela 03 – Composição química do catodo - processo OF

Ag	< 1,00 PPM
As	< 1,00 PPM
Bi	< 0,50 PPM
Cd	< 1,00 PPM
Co	< 1,00 PPM
Cr	< 1,00 PPM
Fe	2,00 PPM
Mn	< 1,00 PPM
N	< 1,00 PPM
P	< 1,00 PPM
Pb	2,00 PPM
S	5,00 PPM
Sb	< 1,00 PPM
Se	< 0,50 PPM
Si	< 1,00 PPM
Sn	< 1,00 PPM
Te	< 0,50 PPM
Zn	< 1,00 PPM
Cu	> 99,99 %

Fonte: Certificado de qualidade. Companhia Minera Zaldivar SA.

Na produção do catodo de cobre eletrolítico a diferença básica entre o processo OF e o processo ETP ocorre após a fase da refinação eletrolítica onde o catodo OF ainda passa pela etapa da refusão em atmosfera controlada, garantindo ao mesmo uma pureza de cobre maior do que o catodo ETP que após a refinação eletrolítica já está pronto para ser fundido. Estes valores de pureza de cobre ficam entre 99,99% para o catodo OF contra 99,90% para o catodo ETP. Esta pequena diferença entre os dois produtos já irá influenciar a qualidade do material que eles irão dar origem, o vergalhão de cobre de 8,000mm.

2.7A Fundição Contínua, Processo ETP

“Em 1950, Arena criou um processo de fundição contínua que permite fundir chapas de tal modo que os produtos saem do forno praticamente na forma e na dimensão definitivas, eliminando, assim, processos intermediários” (MOURA, 2007, p.79).

Moura(2007, p.79) diz que “[...]O processo implantado por Salvador Arena apresentava diferenciais importantes. Conseguia eliminar, por exemplo, os chamados defeitos de contração, comuns na fundição convencional, que tornam o metal poroso e comprometem a qualidade do produto final. A inovação foi, de fato, um marco para indústria brasileira. As primeiras idéias sobre fundição contínua começaram a surgir na metade do século XIX e eram de domínio inglês ou norte-americano. Arena conseguiu entrar nesse grupo restrito”.

Moura(2007, p.79) ainda diz que “[...]Com a fundição contínua, as peças metálicas deram um salto de qualidade no Brasil, gerando uma reação em cadeia em todos os segmentos que usavam o cobre e suas ligas. Automóveis, refrigeradores, televisores e eletrodomésticos em geral, aparelhos de som, máquinas e equipamentos, cadeados, fechaduras, sistemas de geração e transmissão de energia elétrica e muitos outros produtos passaram também a gozar de melhor qualidade. Era uma revolução silenciosa, preciosa, mas meio escondida, com o cobre entre paredes, dentro de motores. Despercebida ao primeiro olhar, era sentida no desempenho e na durabilidade dos produtos e equipamentos”.

Neste processo o catodo de cobre é carregado em um forno tipo charuto e, fundido (estado líquido). Na laminação, que é realizada no estado de fusão, isto é, o cobre em estado líquido, o cobre fundido é coletado em uma máquina, na qual é realizada a solidificação contínua do cobre em formas de barras, que é então conduzida a um laminador para conformação no diâmetro de 8,000mm. Este vergalhão é acondicionado em forma de rolos superpostos chamados jumbos que podem chegar até 5.000kg.



Foto09: Jumbo de cobre produzido pelo processo ETP
Fonte: o autor

Chiaverini(1986, vol.II, p.40, 41 e 42) diz que “[...]Neste processo, as peças fundidas são longas, com secções quadradas, retangular, hexagonal ou de formatos diversos. Em outras palavras, o processo fundi barras de grande comprimento, com as secções mencionadas, as quais serão posteriormente processadas por usinagem ou pelos métodos de conformação mecânica no estado sólido. Em princípio, o processo consiste em vaziar-se o metal líquido num cadinho aquecido. O metal líquido escoar através de matrizes de grafita ou cobre, resfriadas a água. A barra, já está no estado sólido, porém ainda quente, é agarrada por cilindros de laminador e arrastada para frente, com velocidade correspondente às velocidades de resfriamento e solidificação do metal. No percurso, a barra continua resfriando e é cortada pelo emprego de serras circulares ou chama oxiacetileno. As peças cortadas são submetidas a processamento posterior.

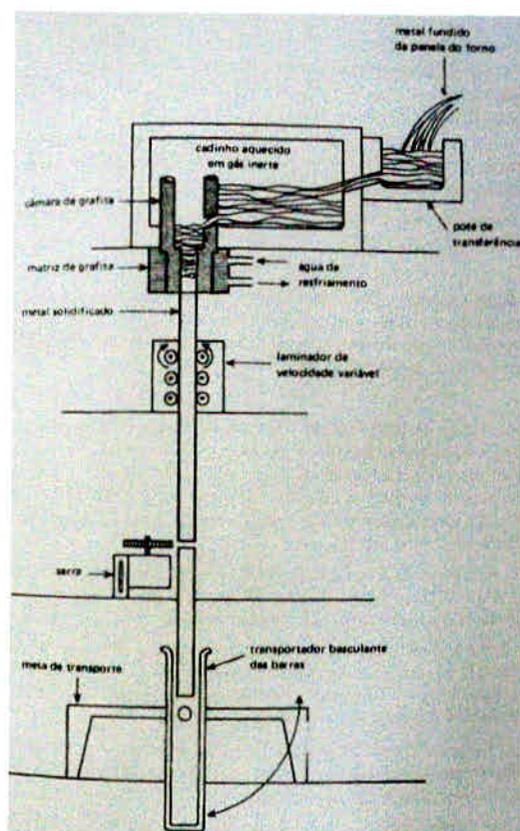


Figura 10: Máquina vertical de fundição contínua para ligas não ferrosas
 Fonte: CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2ª edição. Vol III. São Paulo, 1986

Este processo de fundição garante ao vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro as seguintes propriedades:

Tabela 04 – Tabela de propriedades do vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro obtido a partir do processo de fundição contínua ETP.

Limite de resistência a tração	230 MPa
Alongamento	40%
Dureza Rockwell F	82
Condutividade elétrica	101% IACS
Torção a ruptura	45 a 65 voltas

Fonte: O autor

Tabela 05 – Composição química do vergalhão de cobre - processo OF

Ag	9,00 PPM
As	1,10 PPM
Bi	0,18 PPM
Fe	2,40 PPM
Pb	0,38 PPM
S	3,90 PPM

Sb	< 1,00 PPM
Se	< 1,00 PPM
Sn	< 0,50 PPM
Te	< 0,50 PPM
Zn	< 1,00 PPM
O ₂	189,00 PPM
Cu	99,9689 %

Fonte: Certificado de qualidade. Grupo Paranapanema

2.8A Fundição Contínua, Processo OF

Neste processo, a matéria-prima, catodo, é inserida no forno de fusão através de uma mesa de alimentação onde será fundida a uma temperatura média de 1197°C. No forno é acrescentado carvão vegetal para fazer o isolamento do oxigênio atmosférico com o cobre já em estado líquido.

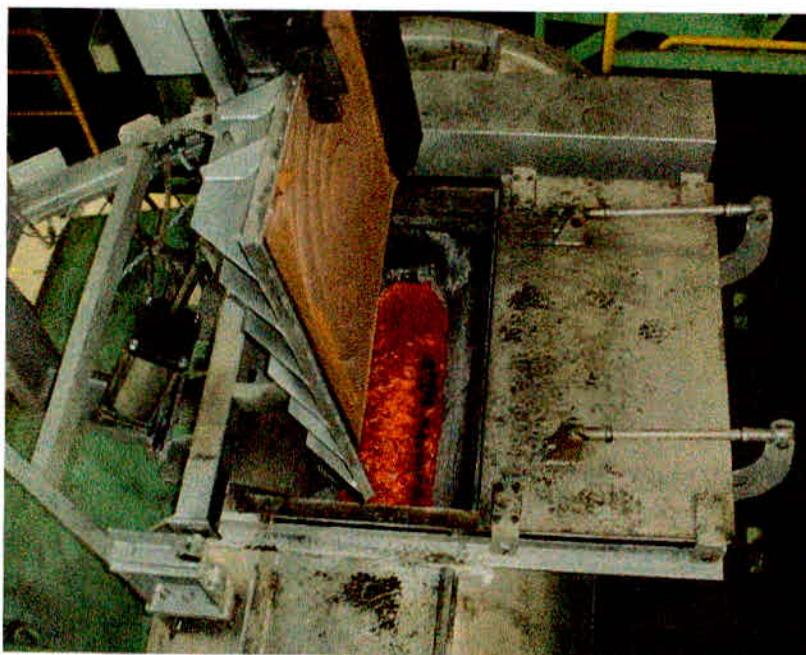


Foto 11: Mesa de alimentação das placas de catodo

Fonte: o autor

Após a fusão das placas de catodo, o cobre líquido será transferido para um forno de vazamento, também chamado de forno de espera. Na calha de transferência é injetado nitrogênio para garantir uma atmosfera inerte. No forno, são inseridas as matrizes por onde será solidificado o vergalhão de cobre no diâmetro desejado. No forno de espera é

acrescentado grafite em flocos para fazer o isolamento do oxigênio atmosférico com o cobre também em estado líquido.

Para cada diâmetro será utilizado uma matriz correspondente. As matrizes são de cobre e revestidas internamente com tubos de grafite para capturar o oxigênio ainda existem no cobre.

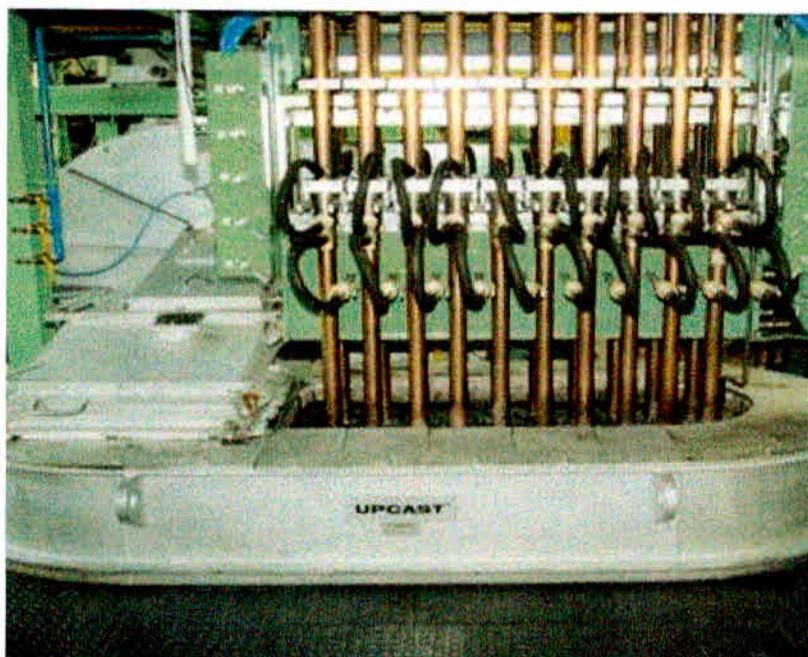


Foto 12: Matrizes de solidificação

Fonte: o autor

O vergalhão de cobre, após solidificação, será então puxado por motores sendo guiado até a unidade de lubrificação, onde é aplicado cera para proteção contra oxidação e para melhorar o bobinamento. Depois desta etapa, o vergalhão segue para os bobinadores formando então os jumbos de aproximadamente 4.000kg.



Foto13: Máquina de fundição contínua onde é retirado o cobre OF.
Fonte: O autor

Este processo de fundição, garante ao vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro as seguintes propriedades:

Tabela 06 – Tabela de propriedades do vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro obtido a partir do processo de fundição contínua OF.

Limite de resistência a tração	175 MPa
Alongamento	45%
Dureza Rockwell F	70
Condutividade elétrica	102%IACS
Torção a ruptura	40 a 65 voltas

Fonte: O autor

Tabela 07 – Composição química do vergalhão de cobre - processo OF

Ag	13,37 PPM
As	0,37 PPM
Bi	< 0,20 PPM
Cd	< 0,35 PPM
Co	< 0,12 PPM
Cr	0,17 PPM
Fe	0,45 PPM
Mn	0,36 PPM
P	0,33 PPM

Pb	0,76 PPM
S	7,86 PPM
Sb	< 0,95 PPM
Se	0,75 PPM
Si	< 0,20 PPM
Sn	< 0,65 PPM
Te	< 2,7 PPM
Zn	< 1,10 PPM
Al	< 0,08 PPM
Mg	<0,10 PPM
H	1,12 PPM
O₂	0,90 PPM
Cu	> 99,9971 %

Fonte: Certificado de qualidade. Laboratório LUVATA

De acordo com as tabelas 04, 05, 06 e 07 apresentadas, nota-se que o vergalhão de cobre de 8,000mm de diâmetro obtido através do processo OF tem limite de resistência a tração e dureza Rockwell F (HRF) menores do que os valores encontrados para o vergalhão de cobre obtido pelo processo ETP. Nota-se, que as propriedades de alongamento e condutividade elétrica são maiores para o processo OF. Outro fator importante é que no cobre OF a quantidade de O₂ é bem menor do que no cobre ETP; o oxigênio nestes processos é considerado uma impureza por dificultar a passagem de corrente elétrica. Também deve-se comentar o maior percentual de cobre contido no cobre OF, garantindo a ele um alto nível de pureza. Com estas características combinadas, o vergalhão de cobre OF apresenta melhor desempenho nos processos subsequentes que são trefilação e esmaltação. Este desempenho se reflete em uma quantidade menor de quebras durante estes dois processos e um produto final com melhor acabamento superficial.

2.9 Trefilação

Trefilação ou estiramento é um processo industrial que acarreta na redução da seção transversal do material e seu respectivo aumento de comprimento.

Para realizar a redução da seção transversal do material são utilizadas matrizes denominadas fieiras. A redução é feita gradativamente, numa sequência decrescente de acordo

com a especificação da máquina. Geralmente, vídria ou diamante sintético são os materiais usados para suportar o desgaste ao atrito e calor.

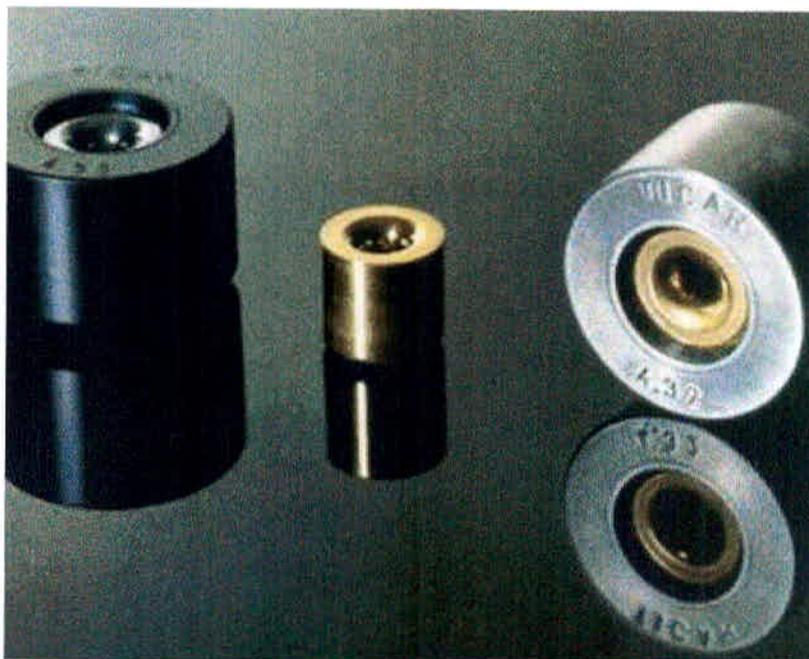


Foto14: Fieiras de trefilação
Fonte: O autor

O processo de trefilação requer um banho de lubrificação das matrizes. Estes banhos trabalham a temperaturas estáveis para obter-se uma melhor lubrificação e resfriamento. No decorrer do processo de trefilação é necessário um tratamento térmico do fio o qual é feito em um recozedor elétrico contínuo.

Segundo Chiaverini(1986, vol.II, p.132) “[...]Para a produção de fios e arames, parte-se de um produto semi-acabado denominados fio-máquina, geralmente laminado, de secção circular e de diâmetro não superior, em princípio, a 6,35 mm (1/4)”.

“[...] O equipamento empregado na operação de estiramento de fios e tubos consiste num banco de estiramento, onde um dos principais componentes é a matriz. O fio-máquina é tornado pontudo, por intermédio de uma operação de forjamento rotativo e inserido através da matriz; na outra extremidade, é agarrado nas mandíbulas do banco que é, então, acionado por um mecanismo hidráulico ou mecânico”.

Chiaverini(1986, vol.II, p.133) também diz que “[...] Existem bancos de estiramento com capacidade superior a 100 t de força de tração e velocidades de estiramento que variam de 9 a 1.500m/min”.

“[...] A maioria das matrizes para estiramento é feita de metal duro (carboneto de tungstênio sinterizado aglomerado com cobalto)”.

“[...] O fio-máquina a ser estirado (ou trefilado) é inicialmente decapado”.

“[...] No estiramento úmido, o fio é submerso num fluido lubrificante especial ou numa solução alcalina de sabão”.

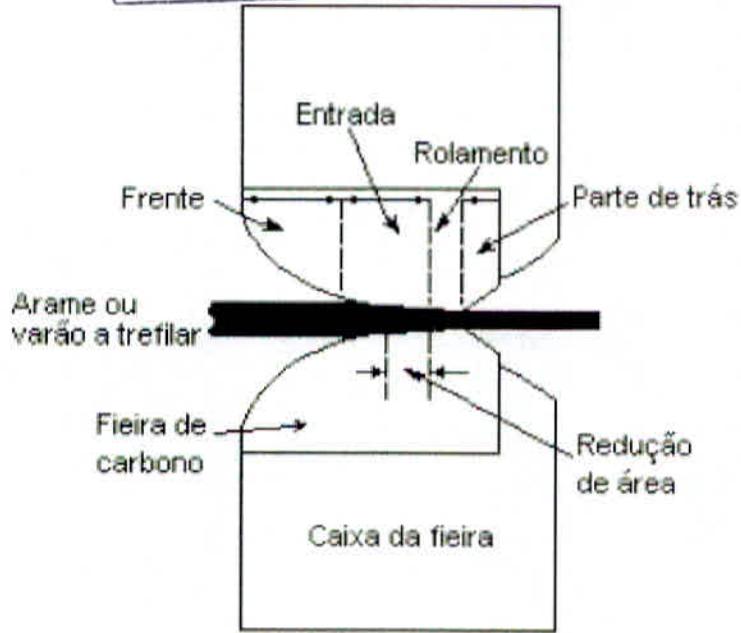


Figura 15: Representação esquemática da conformação mecânica pelo processo de trefilação
Fonte: O autor



Foto16: Máquina de trefilação primária
Fonte: O autor

Para o processo de trefilação, as principais diferenças entre o cobre OF e o ETP são as reduções de quebras do fio durante o estiramento e o melhor acabamento superficial obtido com a utilização do cobre OF, principalmente em diâmetros mais finos.

2.10 Esmaltação

Uma das principais aplicações do cobre, na forma de vergalhão de 8,000mm, é na produção de fios magnetos esmaltados de cobre. O fio esmaltado é um fio de cobre de alta pureza, recoberto com um material isolante chamado esmalte. Ele é denominado magneto porque em sua aplicação prática conduz eletricidade gerando campos de força.

Sua principal aplicação é na indústria elétrica e eletroeletrônica em bobinas, motores elétricos, compressores herméticos, etc.

É o processo de aplicação dos esmaltes sobre o fio condutor de cobre nu. O fio de cobre proveniente da trefilação é colocado em uma máquina esmaltadora, na qual é realizado inicialmente o seu amolecimento através da operação de recozimento. Após este processo, o fio segue para um dispositivo onde é aplicado no mesmo, finas camadas de esmalte sucessivamente. Aqui o esmalte está na forma líquida, a cada aplicação de uma fina camada de esmalte corresponde uma secagem em estufa apropriada, para fixação do esmalte até que a camada seja suficiente para isolar completamente o fio de cobre. O material é então acondicionado em carretéis plásticos colocados na própria máquina.

Este processo pode ser feito em máquinas verticais, geralmente para fios grossos e médios (até 0,290mm) ou em máquinas horizontais para fios finos ou ultrafinos.

Antes de seguir para o cliente, o fio esmaltado de cobre sofre um rígido controle da qualidade para verificar se o mesmo atende às especificações.



Foto17: Máquina de esmaltção vertical
Fonte: O autor

Para o processo de esmaltação, a diferença entre o cobre OF e o ETP está relacionada aos ensaios elétricos realizados no fio de cobre esmaltado, principalmente no ensaio de resistência ôhmica, pois o cobre OF contém uma condutividade elétrica maior e, sendo assim, o fio de cobre esmaltado produzido a partir do vergalhão de cobre OF irá apresentar uma resistência ôhmica menor do que o fio de cobre produzido pelo processo ETP. Outra vantagem do cobre OF é devido ao melhor acabamento superficial obtido pelo mesmo durante o processo de trefilação, possibilitando obter melhor desempenho nos demais testes elétricos realizados do que o cobre ETP.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Produção dos Fios

Para a comprovação de que o fio de cobre esmaltado OF teria uma condutividade elétrica melhor do que o fio de cobre esmaltado ETP e ainda uma resistência ôhmica menor foi necessário produzir os dois produtos utilizando as mesmas condições de máquina, parâmetros de processo e principalmente o mesmo jogo de fieiras, para se obter assim, diâmetros de fio praticamente iguais.

O diâmetro escolhido para o teste foi o de 0,580mm que tem como especificação mínima 0,574mm e especificação máxima 0,581mm para o diâmetro do condutor. Sua especificação mínima quanto ao ensaio de resistência ôhmica é de 0,0628 Ω/m e máxima de 0,0666 Ω/m .

3.2 Ensaio Realizados

Foram realizados dois ensaios específicos nas 25 amostras colhidas de cada produto fabricado; o ensaio dimensional e o ensaio de resistência ôhmica.

3.2.1 Ensaio Dimensional

Após a produção dos dois produtos com as mesmas condições de trabalho se fez necessário realizar o ensaio dimensional do cobre nu do fio OF e do fio ETP a fim de encontrar o diâmetro médio de cada produto.

3.2.1.1 Descrição resumida do ensaio

Com emprego de um micrômetro milesimal, efetua-se a medida do diâmetro do fio, verificando-se também a ovalização do mesmo. O fio deve ser medido em quatro pontos defasados de 45° aproximadamente entre si em torno da circunferência. Deve ser registradas a maior e a menor medida e a média entre as duas leituras deve ser tomada como valor do diâmetro. A ovalização é a diferença entre o maior e o menor diâmetro encontrado.

Micrômetros Digital MDC-Lite



Foto18: Micrômetro digital milesimal
Fonte: O autor

3.2.2 Ensaio de Resistência Ôhmica

Assim como foi realizado para o ensaio dimensional, também se fez necessário realizar o ensaio de resistência ôhmica do cobre esmaltado do fio OF e do fio ETP a fim de encontrar o valor médio de cada produto.

3.2.2.1 Descrição resumida do ensaio

Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência ôhmica do fio de cobre esmaltado, dada em Ω/m , prendendo o fio nas garras existentes nas extremidades do equipamento e, convertendo o valor encontrado no display a temperatura de 20°C através de um fator de correção.

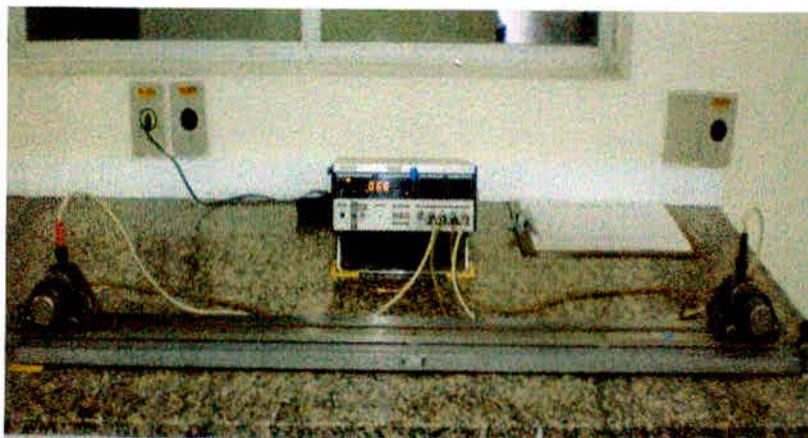


Foto19: Equipamento de medição de resistência ôhmica
Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizar o ensaio dimensional e o ensaio de resistência ôhmica das amostras coletadas, foram encontrados os seguintes valores médios para o diâmetro do condutor e resistência ôhmica. Os valores de resistividade e condutividade elétrica foram calculados.

Tabela 08 – Comparativo entre o fio 0,580mm produzido pelo processo ETP e pelo processo OF.

Produto	Diâmetro Médio do Condutor	Resistência Ôhmica Média	Resistividade Elétrica	Condutividade Elétrica
0,580mm_OF	0,5765mm	0,06486 Ω /m	0,016920 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	101,9% IACS
0,580mm_ETP	0,5768mm	0,06538 Ω /m	0,017102 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	100,8% IACS

Fonte: O autor

Sendo assim, foi possível comprovar que o fio de cobre esmaltado produzido pelo processo OF apresenta valores de resistência ôhmica e resistividade elétrica menores que o fio de cobre esmaltado produzido pelo processo ETP, além de uma condutividade elétrica maior, quando os dois materiais apresentam o mesmo diâmetro.

Tabela 09 – Comparativo Geral entre o cobre OF e o cobre ETP

Produto		Produto	
Cobre OF		Cobre ETP	
Processo	Catodo de Cobre	Processo	Catodo de Cobre
99,99% de pureza de Cu		99,90% de pureza de Cu	
Processo	Vergalhão de 8,000mm	Processo	Vergalhão de 8,000mm
Máximo de 10 PPM de Oxigênio		Máximo de 200 PPM de oxigênio	
Material com maior ductilidade		Material com maior dureza	
Processo	Trefilação	Processo	Trefilação
99,995% de pureza de Cu		99,95% de pureza de Cu	
Menor número de quebras		Maior índice de quebras	
Melhor acabamento superficial		Acabamento superficial irregular	
Processo	Esmaltação	Processo	Esmaltação
Melhor desempenho nos ensaios elétricos		Desempenho abaixo do cobre OF	

Fonte: O autor

Portando, de acordo com a tabela 09 apresentada, pode-se concluir que o fio de cobre esmaltado produzido através do processo OF irá apresentar uma qualidade maior do que o fio de cobre produzido pelo processo ETP. Esta maior qualidade pode ser verificada no melhor desempenho do cobre OF quanto aos ensaios elétricos, principalmente no ensaio de resistência ôhmica; no melhor acabamento superficial gerado durante o processo de trefilação devido a sua maior ductilidade e trefilabilidade.

4.1 Identificação da Oportunidade de Melhoria

Tendo em mãos um produto com características elétricas e acabamento superficial melhores do que o produto até então sempre utilizado, foi necessário viabilizar esta vantagem técnica agora de forma comercial.

Era notório que o fio de cobre esmaltado produzido pelo processo OF apresentava valores melhores de condutividade elétrica e em consequência disto menor resistência ôhmica.

Então surgiu a seguinte hipótese: Se é verdade que o cobre OF possui melhores propriedades elétricas, então é possível reduzir a quantidade de fios de cobre esmaltado dentro dos motores, bobinas, compressores, etc., mantendo ainda as especificações técnicas exigidas pelos clientes consumidores deste produto.

A resposta a esta indagação foi positiva. Era sim possível reduzir a seção transversal do fio de cobre esmaltado OF mantendo-o ainda dentro dos padrões normativos exigidos.

Porém, logo surgiu outra pergunta: Qual vantagem esta redução da seção transversal traria sendo que seria introduzido uma quantidade menor de fio de cobre esmaltado dentro do produto final do cliente já que a empresa fabricante do fio esmaltado ganha pela quantidade vendida?

A resposta para esta pergunta foi que seria oferecido ao cliente um produto com melhores características técnicas onde seria possível reduzir a quantidade de fio de cobre esmaltado dentro de seu produto final e assim o mesmo teria uma redução no tamanho do pacote de seu produto possibilitando a sua empresa comprar uma quantidade menor de fio. Em contrapartida, o fabricante do fio de cobre esmaltado OF teria um aumento no volume comprado deste produto dentro da organização consumidora.

4.2 Desenvolvimento da Amostra

O projeto foi proposto a um dos maiores clientes da São Marco. Foi escolhido o diâmetro de 0,580mm por ser o item que o cliente mais compra no mês.

Com esta comprovação efetuada através de ensaios laboratoriais e testes práticos no processo de produção, foi proposto ao cliente à redução da especificação do diâmetro do fio 0,580mm como demonstrado nas tabelas 10 e 11 abaixo.

Tabela 10 – Especificação do diâmetro do condutor e para a resistência ôhmica do fio de cobre esmaltado ETP de 0,580mm de diâmetro

Valor Especificado do Condutor		Valor Especificado da Resistência Ôhmica	
Mínimo	0,574mm	Mínimo	0,06393 Ω /m
Máximo	0,581mm	Máximo	0,06663 Ω /m

Fonte: O autor

Tabela 11 – Valor proposto para a especificação do diâmetro do condutor e para a resistência ôhmica do fio de cobre esmaltado OF de 0,580mm de diâmetro

Valor Proposto do Condutor		Valor Encontrado da Resistência Ôhmica	
Mínimo	0,569mm	Mínimo	0,06493 Ω /m
Máximo	0,576mm	Máximo	0,06654 Ω /m

Fonte: O autor

De acordo com as tabelas 10 e 11, a redução média do diâmetro do fio 0,580mm é de 0,005mm mantendo ainda o valor de resistência ôhmica dentro do especificado.

4.3 Ganhos do Cliente

Com esta redução dimensional, a vantagem para o cliente é que ele irá comprar uma menor quantidade de fio, pois a seção transversal foi reduzida. Logo, como o fio de cobre esmaltado é um produto relativamente caro, os lucros mensais por parte do cliente estão conforme tabela 12.

Tabela 12 – Redução média obtida em mm, g/m e %a partir da nova especificação do cobre OF de 0,580mm de diâmetro. Quantidade faturada no mês de junho de 2008 para o fio 0,580mm. Redução média obtida em kg se fosse utilizado o cobre OF. Redução em R\$, considerando que o quilo do cobre custe 20 reais.

Redução Obtida em mm	Diferença em g/m	Diferença em %	Quantidade Faturada em kg	Redução em kg	Redução em R\$
0,005	0,047	2,1	86.056,3	1.807,2	36.144,00

Fonte: O autor

Com a comprovação do resultado para o fio 0,580mm de diâmetro, foram estendidas as reduções para todas as bitolas de fio consumidas pelo cliente.

O projeto foi implantado efetivamente no mês de outubro de 2009. Após um ano de implantação os ganhos obtidos pelo cliente estão descritos conforme tabela 13.

Tabela 13 – Ganhos obtidos pelo cliente após um ano do projeto implantado.

Mês	Quantidade Faturada	Diferença em %	Redução em kg	Redução em R\$
Outubro	510.849,1	1,59	8.191,6	163.832,0
Novembro	543.027,1	1,73	9.423,0	188.460,0
Dezembro	483.184,7	1,51	7.243,4	144.868,0
Janeiro	458.497,0	1,59	7.499,0	149.980,0
Fevereiro	539.614,8	1,40	7.123,5	142.470,0
Março	551.411,3	1,48	8.518,8	170.376,0
Abril	568.680,4	1,56	9.552,0	191.040,0
Maio	555.182,6	1,60	9.162,7	183.254,0
Junho	569.005,3	1,64	9.115,0	182.300,0
Julho	555.604,9	1,72	8.943,5	178.870,0
Agosto	578.248,5	1,45	8.882,5	177.650,0
Setembro	488.644,6	1,86	9.580,8	191.616,0

Fonte: O autor

Conforme tabela 13, o cliente deixou de comprar após um ano de projeto implantado, 103.235,8 kg de fio de cobre esmaltado. Considerando o quilo do cobre a R\$20,00 reais, o cliente teve uma economia anual de R\$2.064.716,0 reais.

4.4 Ganhos da São Marco

A São Marco ganhou em participação de faturamento de fios de cobre esmaltado para este cliente. Subiu de 25% para 60%. Como o cliente consome 900.000 kgde fio esmaltado por mês, a participação em quilos passou de 225.000 kg para 540.000 kg, se tornando o principal fornecedor de fio de cobre esmaltado.

5 CONCLUSÃO

Atualmente, dentro das organizações industriais, todo o projeto para ser concretizado necessita de embasamento teórico e prático. Assim, no desenvolver das atividades deste trabalho, todo este conhecimento aprendido na em sala de aula foi importante para o sucesso final do projeto.

O trabalho de conclusão de curso teve como objetivo demonstrar a comparação entre os processos OF e ETP para a produção do fio de cobre esmaltado.

Com este trabalho pode-se concluir que o fio de cobre esmaltado produzido com o cobre OF apresenta melhores propriedades elétricas e mecânicas do que o fio de cobre esmaltado produzido pelo processo ETP. Estas propriedades podem ser evidenciadas durante a trefilação do fio, onde o número de quebras é menor e o acabamento superficial melhor. Na esmaltação pode ser destacado o melhor desempenho do fio OF nos ensaios elétricos.

Conclui-se também, que o fio de cobre OF apresenta uma condutividade elétrica tão elevada que foi possível reduzir a seção transversal dos condutores, garantindo ainda que os padrões de resistência ôhmica dos produtos onde este fio estivesse sido enrolado se mantivessem dentro das especificações técnicas exigidas.

Ao proporcionar uma redução na quantidade de fio de cobre esmaltado OF a ser consumida pelos fabricantes de compressores, através da redução da seção transversal, foi estabelecida a entrada em definitivo no mercado de um novo produto, o fio de cobre Oxy-Free.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Vergalhão de cobre para uso elétrico - Requisitos**. NBR 14733: SET 2001.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica. Processos de Fabricação e Tratamento**. 2ª edição. Volume II. São Paulo, 1986. Editora McGraw-Hill Ltda. ISBN: 0074500899.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica. Materiais de Construção Mecânica**. 2ª edição. Volume III. São Paulo, 1986. Editora McGraw-Hill Ltda. ISBN: 0074500910.

Fluxograma do processo de extração do minério de cobre até a obtenção do fio de cobre. Disponível em <http://www.paranapanema.com.br> acesso em 10 jun. 2010, 16h47min.

HALLIDAY, David. **Física 3**. 5ª edição. Rio de Janeiro, 2008. Editora LTC. ISBN: 978-85-216-1391-6.

MOURA, Luiz Felipe Heide Aranha. **Cobre Metal Eterno**. 1ª edição. São Paulo, 2007. Editora Magma Cultural. ISBN: 978-85-98230-11-5.