

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**GABRIELA DE OLIVEIRA SOUZA**

**EFEITO DA MICROESTRUTURA E DA RELAÇÃO DIMENSIONAL NA  
DEFORMAÇÃO DURANTE O FORJAMENTO (COMPRESSÃO) DO COBRE  
ELETROLÍTICO**

**BELO HORIZONTE**

**2016**

GABRIELA DE OLIVEIRA SOUZA

**EFEITO DA MICROESTRUTURA E DA RELAÇÃO DIMENSIONAL NA  
DEFORMAÇÃO DURANTE O FORJAMENTO (COMPRESSÃO) DO COBRE  
ELETROLÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2016

GABRIELA DE OLIVEIRA SOUZA

**EFEITO DA MICROESTRUTURA E DA RELAÇÃO DIMENSIONAL NA  
DEFORMAÇÃO DURANTE O FORJAMENTO (COMPRESSÃO) DO COBRE  
ELETROLÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa - Orientadora

---

Prof. Dr. Wellington Lopes – Coorientador

---

Prof. Me Valmir Sales

---

Eng. Nayara Aparecida Neres da Silva

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus por ter me colocado no caminho certo para eu conseguir seguir meus sonhos e por me dar toda força possível para poder vencer todos os obstáculos que pudessem aparecer.

Aos meus pais por todo apoio, compreensão e incentivo.

Aos meus irmãos pela amizade verdadeira e o apoio a qualquer momento.

À minha orientadora Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueia Côrrea pela compressão e paciência, em especial por toda ajuda nos momentos de desespero e pela disponibilidade em ensinar, até mesmo durante a noite. Obrigada pela amizade e por todos os ensinamentos.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Wellington Lopes pelos esclarecimentos, e pelos ensinamentos durante todos esses anos.

Ao Prof. Me Valmir Sales por toda gentileza em se disponibilizar para me ajudar com os ensaios de compressão.

Ao pessoal do laboratório de metalografia pela troca de conhecimentos e por aquelas risadas depois de várias horas de trabalho. Em especial à Eng. Nayara Aparecida Neres da Silva, pelos esclarecimentos quanto à determinação do tamanho de grão.

Aos meus amigos da faculdade por terem tornado essa jornada mais leve e por terem contribuído de maneira direta ou indireta na produção deste trabalho

## RESUMO

O cobre eletrolítico é um dos metais não ferrosos mais utilizados pela humanidade, sendo que ele é obtido através do refino do minério e apresenta grau de pureza elevado, igual a 99,99%. Considerando esses aspectos, este trabalho pretendia analisar corpos de prova de cobre eletrolítico com variadas dimensões e submetidos a diferentes condições de tratamento térmico, através das quais pretendia-se obter amostras com diferentes tamanhos de grão. A partir daí, este trabalho propõe uma investigação a cerca do efeito que essa variação no tamanho de grão proporciona na capacidade do cobre eletrolítico em ser deformado plasticamente, sem apresentar defeitos ou fratura. Foi dada ênfase na deformação apresentada pelo material através de processos de forjamento em matriz aberta. A análise da deformação do cobre eletrolítico foi feita através da comparação de curvas de caminho de deformação definidas para cada condição de amostra. Essas curvas possibilitaram a observação da deformação axial e circunferencial, de modo a fornecer uma estimativa de como o material se deformava. A inclinação das curvas de caminho de deformação possibilitou criar uma relação entre as deformações axial e circunferencial para cada condição de corpo de prova. Assim, através da comparação entre essas inclinações foi possível perceber que a relação dimensional dos corpos de prova afeta de maneira mais significativa o modo de deformação do cobre eletrolítico, se comparado com o efeito provocado pela variação do tamanho de grão das amostras.

Palavras-chave: Cobre eletrolítico. Forjamento. Tamanho de grão. Conformabilidade. Deformação. Caminho de deformação.

## **ABSTRACT**

The electrolytic copper is a non-ferrous metal most used by mankind, and it is obtained through the ore refining and presents high degree of purity equal to 99.99%. Taking as starting point electrolytic copper specimens with various sizes and under different heat treatment conditions, we intend to obtain samples with different grain sizes. From there, this work proposes an investigation about the effect that this change in grain size provides in electrolytic copper ability to be plastically deformed without defects or fracture. Emphasis will be placed on the deformation presented by this material through open die forging processes. The analysis of the electrolytic copper strain is made by strain path curves, which enable observation of axial and hoop deformation, since these provide an estimate about how the copper undergoes deformation.

**Key Words:** Electrolytic copper. Forging. Grain Size. Workability. Deformation; Strain path.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 1 - Esquema de um martelo de queda livre com prancha. ....</b>                                                                                                                                                                 | <b>25</b> |
| <b>Figura 2 - Representação esquemática do forjamento em matriz livre ou matriz aberta. ....</b>                                                                                                                                         | <b>27</b> |
| <b>Figura 3 - Estiramento da ponta de uma barra por forjamento em matrizes abertas. ...</b>                                                                                                                                              | <b>28</b> |
| <b>Figura 4 - Operação de desbaste na forja livre, na qual a área hachurada identifica a área de conta da matriz superior com a peça que está sendo conformada. ....</b>                                                                 | <b>29</b> |
| <b>Figura 5 - Esquema de forjamento em matriz fechada.....</b>                                                                                                                                                                           | <b>29</b> |
| <b>Figura 6 - Vista em corte de uma matriz de forja, exibindo a rebarba proveniente do forjamento e a calha de rebarba. ....</b>                                                                                                         | <b>31</b> |
| <b>Figura 7 - Curva típica da carga de forja com o curso da matriz no forjamento em matriz fechada. ....</b>                                                                                                                             | <b>31</b> |
| <b>Figura 8 – Abaulamento lateral de corpo de prova durante ensaio de compressão. ....</b>                                                                                                                                               | <b>34</b> |
| <b>Figura 9 – Formato geométrico dos corpos de prova mais utilizados para os testes de conformabilidade de compressão.....</b>                                                                                                           | <b>35</b> |
| <b>Figura 10- Marcação desenhada sobre a superfície do corpo de prova para verificação da tensão e deformação axial e circunferencial ao longo do teste de compressão axial (a)marcação de malha quadrada (b)marcação circular. ....</b> | <b>36</b> |
| <b>Figura 11 - Caminhos de deformação em ensaios de compressão. ....</b>                                                                                                                                                                 | <b>38</b> |
| <b>Figura 12: Curva limite de conformação para corpos de prova cilíndrico, flangeado e cônico de plasticina (mistura de CaCO<sub>3</sub> com vaselina). ....</b>                                                                         | <b>37</b> |
| <b>Figura 13: Curva limite de conformação para os aços ABNT 1020 e 1040.....</b>                                                                                                                                                         | <b>37</b> |
| <b>Figura 14: Fluxograma do procedimento experimental realizado na primeira parte do projeto.....</b>                                                                                                                                    | <b>39</b> |
| <b>Figura 15 – Fluxograma dos procedimentos realizados na segunda parte do projeto. ...</b>                                                                                                                                              | <b>40</b> |
| <b>Figura 16 - Forno elétrico utilizado para realização dos tratamentos térmicos.....</b>                                                                                                                                                | <b>41</b> |
| <b>Figura 17 - Recipiente metálico e amostras de cobre eletrolítico utilizados no tratamento térmico .....</b>                                                                                                                           | <b>42</b> |
| <b>Figura 18 - Materiais utilizados no embutimento a quente e amostras embutidas.....</b>                                                                                                                                                | <b>43</b> |
| <b>Figura 19 – Embutimento à quente. ....</b>                                                                                                                                                                                            | <b>44</b> |
| <b>Figura 20 - Lixadeira.....</b>                                                                                                                                                                                                        | <b>44</b> |

|                                                                                                                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 21: Microscópio Óptico.....</b>                                                                                                                                                | <b>45</b> |
| <b>Figura 22 - Contagem da área de grão através do programa Image-Pro Plus6.0.....</b>                                                                                                   | <b>46</b> |
| <b>Figura 23 - Equipamento de corte de alta precisão .....</b>                                                                                                                           | <b>46</b> |
| <b>Figura 24: Corpos de prova confeccionados e com marcação superficial. ....</b>                                                                                                        | <b>49</b> |
| <b>Figura 25 - Prensa Hidráulica Manual.....</b>                                                                                                                                         | <b>50</b> |
| <b>Figura 26: Exemplo de corpo de prova no decorrer do ensaio de forjamento .....</b>                                                                                                    | <b>51</b> |
| <b>Figura 27 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 10 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x .....</b>           | <b>53</b> |
| <b>Figura 28 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 60 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x .....</b>           | <b>54</b> |
| <b>Figura 29 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 120 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x .....</b>          | <b>54</b> |
| <b>Figura 30 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 240 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x .....</b>          | <b>55</b> |
| <b>Figura 31 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 240 min no forno e com resfriamento no forno a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x ..</b>          | <b>55</b> |
| <b>Figura 32 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 360 min no forno e com resfriamento no forno a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x ..</b>          | <b>56</b> |
| <b>Figura 33 – Corpo de prova no decorrer do ensaio de forjamento em matriz aberta. ....</b>                                                                                             | <b>58</b> |
| <b>Figura 34 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 10.1, 10.2 e 10.3, com <math>h = D</math>, e tratamento de 10 minutos no forno com resfriamento ao ar.....</b>        | <b>68</b> |
| <b>Figura 35 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 10.4, 10.5 e 10.6, com <math>h = 1,5D</math>, e tratamento de 10 minutos no forno com resfriamento ao ar.....</b>     | <b>69</b> |
| <b>Figura 36 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 10.7, 10.8 e 10.9, com <math>h = 2D</math>, e tratamento de 10 minutos no forno com resfriamento ao ar.....</b>       | <b>69</b> |
| <b>Figura 37 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 120.1, 120.2 e 120.3, com <math>h = D</math>, e tratamento de 120 minutos no forno com resfriamento ao ar.....</b>    | <b>70</b> |
| <b>Figura 38 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 120.4, 120.5 e 120.6, com <math>h = 1,5D</math>, e tratamento de 120 minutos no forno com resfriamento ao ar.....</b> | <b>70</b> |
| <b>Figura 39 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 120.7, 120.8 e 120.9, com <math>h = 2D</math>, e tratamento de 120 minutos no forno com resfriamento ao ar.....</b>   | <b>71</b> |

|                                                                                                                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 40 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 360.1, 360.2 e 360.3, com <math>h = D</math>, e tratamento de 360 minutos no forno com resfriamento no forno.....</b>    | <b>71</b> |
| <b>Figura 41 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 360.4, 360.5 e 360.6, com <math>D = 1,5h</math>, e tratamento de 360 minutos no forno com resfriamento no forno.....</b> | <b>72</b> |
| <b>Figura 42 - Curva limite de conformação para os corpos de prova 360.7, 360.8 e 360.9, com <math>D = 2h</math>, e tratamento de 360 minutos no forno com resfriamento no forno.....</b>   | <b>72</b> |
| <b>Figura 43 – Curva de caminho de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 10 minutos e resfriados ao ar. ....</b>                                                     | <b>73</b> |
| <b>Figura 44 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 120 minutos e resfriados ao ar. ....</b>                                                    | <b>74</b> |
| <b>Figura 45 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 360 minutos e resfriados no forno. ....</b>                                                 | <b>74</b> |
| <b>Figura 46 – Curva de caminho de deformação dos corpos de prova com a relação de <math>h = D</math>. ....</b>                                                                             | <b>76</b> |
| <b>Figura 47 – Curva de caminho de deformação dos corpos de prova com <math>h = 1,5D</math>. ....</b>                                                                                       | <b>77</b> |
| <b>Figura 48 - Curva de caminho de deformação dos corpos de prova com <math>h = 2D</math>.....</b>                                                                                          | <b>77</b> |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Composição Química do Cobre Eletrolítico obtido, disponibilizado no certificado de compra.....                                                                                                                        | 40 |
| Tabela 2 - Condições de tratamento térmico para posterior escolha. ....                                                                                                                                                          | 42 |
| Tabela 3 - Resumo das características dos corpos de prova.....                                                                                                                                                                   | 47 |
| Tabela 4 - Identificação das amostras.....                                                                                                                                                                                       | 47 |
| Tabela 5 - Altura dos corpos de prova com tratamento térmico de 10 min de permanência no forno e resfriamento no ar e a média dos valores encontrados. ....                                                                      | 48 |
| Tabela 6 - Altura dos corpos de prova com tratamento térmico de 120 min de permanência no forno e resfriamento no ar e a média dos valores encontrados. ....                                                                     | 48 |
| Tabela 7 - Altura dos corpos de prova com tratamento térmico de 360 min de permanência no forno e resfriamento no forno e a média dos valores encontrados.....                                                                   | 49 |
| Tabela 8 - Tamanho médio dos grãos das amostras.....                                                                                                                                                                             | 56 |
| Tabela 9 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para os corpos de prova 10.1, 10.2 e 10.3 ( $h = D$ com tratamento de 10 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 25,50 $\mu\text{m}$ . ....           | 59 |
| Tabela 10 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para os corpos de prova 10.4, 10.5 e 10.6 ( $h = 1,5D$ e tratamento de 10 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 25,50 $\mu\text{m}$ . ....         | 60 |
| Tabela 11 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 10.7, 10.8 e 10.9 ( $h = 2D$ , com tratamento de 10 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 25,50 $\mu\text{m}$ . ....           | 61 |
| Tabela 12 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 120.1, 120.2 e 120.3 ( $h = D$ , com tratamento de 120 minutos no forno mais resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 34,07 $\mu\text{m}$ . ....     | 62 |
| Tabela 13 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 120.4, 120.5 e 120.6 ( $h = 1,5 D$ , com tratamento de 120 minutos no forno mais resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 34,07 $\mu\text{m}$ . .... | 63 |
| Tabela 14 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 120.7, 120.8 e 120.9 ( $h = 2D$ , com tratamento de 120 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 34,07 $\mu\text{m}$ . ....       | 64 |
| Tabela 15 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 360.1, 360.2 e 360.3 ( $h = D$ , com tratamento de 360 minutos no forno e resfriamento no forno). Tamanho de grão = 43,27 $\mu\text{m}$ . ....     | 65 |

**Tabela 16 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 360.4, 360.5 e 360.6 ( $h = 1,5D$ , com tratamento de 360 minutos no forno e resfriamento no forno). Tamanho de grão =  $43,27 \mu\text{m}$ . ..... 66**

**Tabela 17 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 360.7, 360.8 e 360. ( $h = 2D$ , com tratamento de 360 minutos no forno e resfriamento no forno). Tamanho de grão =  $43,27 \mu\text{m}$ . ..... 67**

## SUMÁRIO

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                                | <b>13</b> |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....                                                 | <b>14</b> |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                     | <b>15</b> |
| <b>3.1. Cobre e Suas Características</b> .....                            | <b>15</b> |
| <b>3.1.1. Características gerais</b> .....                                | <b>15</b> |
| <b>3.1.2. Ligas de cobre</b> .....                                        | <b>17</b> |
| <b>3.1.3. Cobre eletrolítico</b> .....                                    | <b>18</b> |
| <b>3.1.4. Tratamentos térmicos</b> .....                                  | <b>19</b> |
| <b>3.2. Conformação Mecânica</b> .....                                    | <b>21</b> |
| <b>3.3. Forjamento</b> .....                                              | <b>22</b> |
| <b>3.3.1. Aspectos gerais</b> .....                                       | <b>22</b> |
| <b>3.3.2. Equipamentos de forjamento</b> .....                            | <b>23</b> |
| <b>3.3.3. Tipos de forjamento</b> .....                                   | <b>25</b> |
| <b>3.3.3.1. Forjamento em matriz aberta</b> .....                         | <b>26</b> |
| <b>3.3.3.2. Forjamento em matriz fechada</b> .....                        | <b>29</b> |
| <b>3.4. Análise da Conformabilidade</b> .....                             | <b>31</b> |
| <b>3.4.1. Ensaio de compressão para análise da conformabilidade</b> ..... | <b>33</b> |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                       | <b>39</b> |
| <b>4.1. Aspectos Gerais do Trabalho Desenvolvido</b> .....                | <b>39</b> |
| <b>4.1. Material</b> .....                                                | <b>40</b> |
| <b>4.2. Tratamentos Térmicos</b> .....                                    | <b>41</b> |
| <b>4.3. Caracterização do Material</b> .....                              | <b>43</b> |
| <b>4.4. Confecção dos Corpos de Prova</b> .....                           | <b>46</b> |
| <b>4.5. Ensaio de Forjamento em matriz aberta</b> .....                   | <b>50</b> |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                    | <b>53</b> |
| <b>5.1. Caracterização Estrutural do Cobre Eletrolítico</b> .....         | <b>53</b> |
| <b>5.1.1. Determinação do tamanho médio dos grãos</b> .....               | <b>56</b> |
| <b>5.2. Corpos de prova durante o ensaio de forjamento</b> .....          | <b>57</b> |
| <b>5.3. Determinação da deformação axial e circunferencial</b> .....      | <b>58</b> |
| <b>5.4. Curvas de Caminho de Deformação</b> .....                         | <b>68</b> |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>79</b> |
|-----------------------------------------|-----------|

## 1. INTRODUÇÃO

O cobre eletrolítico é um produto derivado de processos de refino do minério, pelos quais é possível a obtenção de cobre com elevadíssima pureza. O processo de refino eletrolítico resulta em um cobre que com grau de pureza de cerca de 99,99%, e esse produto é de extrema importância para numerosas aplicações especializadas, como por exemplo, componentes de equipamentos eletrônicos, componentes de termostatos, radiadores, condutores para lâmpadas e válvulas, indústria automobilística e enrolamentos de rotores para geradores e motores de grande porte. Em geral, o cobre eletrolítico é muito utilizado em aplicações que requerem elevada condutividade e nas quais haja aquecimento na presença de gases redutores, inclusive nos processos de soldagem e brasagem (ASKELAND; PHULÉ, 2011; BARCELOS, 2010; CALLISTER, 2002).

Esse material pode ser conformado por diversas técnicas, entretanto neste trabalho serão enfatizadas as operações de forjamento, as quais podem ser aplicadas em matriz fechada ou aberta. Esse tipo de conformação pode ser realizado a partir do uso de equipamentos que provocam prensagem ou martelagem dos corpos de prova, com objetivo de provocar a deformação dos mesmos (SILVA; MEI, 2011, SILVA, 2011).

Neste trabalho amostras de cobre eletrolítico serão submetidas a tratamentos térmicos de diferentes condições como tempo de encharque e resfriamento, a fim de se obter variação no tamanho de grão das amostras. Além disso, serão analisados corpos de prova de diferentes relações altura/diâmetro. Isso será realizado, pois se pretende estudar o efeito provocado no comportamento relativo à deformação do cobre eletrolítico, em função da variação do tamanho de grão e da relação altura/diâmetro das amostras.

A avaliação da deformação será feita por testes que analisam a trabalhabilidade do cobre eletrolítico, através da percepção da deformação circunferencial e axial em determinados pontos de interesse na superfície da amostra.

## **2. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo Geral**

Esse trabalho tem como principal objetivo a avaliação experimental das características da deformação na compressão do cobre eletrolítico, em função da relação diâmetro/altura dos corpos de prova e do tratamento térmico realizado a fim de provocar variação no tamanho de grão das amostras.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Avaliar os efeitos dos parâmetros do tratamento térmico no tamanho de grão médio do cobre eletrolítico.
  
- Avaliar a influência do tamanho de grão médio na relação entre as deformações axial e circunferencial no cobre eletrolítico submetido à compressão.
  
- Analisar os efeitos da proporção altura/diâmetro dos corpos de prova na relação entre as deformações axial e circunferencial no cobre eletrolítico submetido à compressão.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Cobre e Suas Características

O cobre e as ligas baseadas nesse metal não-ferroso apresentam uma combinação desejável de propriedades, de modo que são utilizados em uma ampla variedade de aplicações desde a antiguidade (CALLISTER, 2002). Sendo um dos metais mais utilizados e mais importantes hoje em dia, o cobre apresentou participação de destaque na história da humanidade, uma vez que exerceu grande importância no desenvolvimento da sociedade. Sua relevância como metal está notificada desde a Idade do Cobre, e existem indícios deste ser o primeiro metal não-ferroso utilizado pelo ser humano, há aproximadamente 5.000 anos A.C. Segundo Askeland (2011), o cobre metálico foi extraído de rochas, até mesmo muito antes do ferro, uma vez que sua extração requer temperaturas baixas que podem ser mais facilmente alcançadas (ASKELAND; PHULÉ, 2011; SILVA, 2011).

##### 3.1.1. Características gerais

De acordo com Silva (2011) e Leben (1967), dentre as principais propriedades do cobre, merecem destaque:

- Sua excelente condução de calor e de eletricidade, sendo que é o melhor condutor de eletricidade e calor depois da prata;
- Resistência à corrosão;
- Propriedades antimicrobianas;
- Reciclável;
- Dúctil e maleável;
- Possibilidade de formação de ligas;
- Facilidade em soldar;
- Excelente aspecto visual (SILVA, A., 2011; LEBEN, H., 1967).

Segundo Coutinho (1980), o cobre puro apresenta reticulado cristalino com estrutura cúbica de faces centradas (CFC). Seu parâmetro de rede é igual a  $a = 3,607\text{Å}$ , e esse material exibe ponto de fusão igual a  $1084\text{ °C}$  e peso específico de  $8,93\text{ g/cm}^3$  (COUTINHO, 1980).

Devido à sua elevada ductilidade, o cobre puro tem seu processo de usinagem dificultado, mas sua capacidade de se submeter à deformação plástica à frio é praticamente ilimitada, devido ao fato de sua estrutura contribuir para ductilidade e conformabilidade (habilidade de um material de ser deformado plasticamente, sem apresentar defeitos ou fratura) (CALLISTER, 2002; CETLIN; HELMAN, 2010; SHACKELFORD, 2012).

Além disso, duas de suas principais propriedades, a eletrocondutibilidade e termocondutibilidade, apresentam valores iguais a  $60 \times 10^4 \text{ } |\Omega \cdot \text{cm}|^{-1}$  e  $0,91 \text{ cal}/\text{cms}^\circ\text{C}$ , respectivamente. O cobre laminado e recozido apresentará propriedades mecânicas com os valores determinados a seguir: resistência à tração: 23-25 kgf/mm<sup>2</sup>; alongamento: 40-50%; e dureza Brinell (HB): 30-40 (COUTINHO, 1980).

Outra importante característica referente ao cobre está relacionada ao fato dele ser muito sensível à formação de maclas mecânicas e de recozimento. Elas são resultantes de deslocamentos atômicos devido a um cisalhamento uniforme, paralelos a um determinado plano cristalino e numa direção específica (macla mecânica) ou devido tratamento térmico realizado após deformações (maclas de recozimento). Diferentemente do deslizamento de discordâncias, a maclação provoca alterações na orientação da rede, produzindo formas com contornos relativamente paralelos e retos no interior, ou através do cristal (CALLISTER, 2008; LEIS, 2003).

Além das propriedades mecânicas mencionadas anteriormente, o excelente aspecto visual notado nas peças de cobre também é uma característica importante, pois permite sua utilização como elemento decorativo. A boa aparência desse material se deve à reação dele com a atmosfera, resultando na formação de pátinas (carbonato de cobre = cobre + ácido carbônico), que são camadas de várias cores e com bom acabamento em sua superfície. Essas camadas coloridas são vermelhas para o cobre puro, amarelas para cobre com adições de zinco e prateadas para o cobre com adições de níquel. A cor verde ocorre quando a superfície do cobre é corroída, formando um sulfato de cobre básico que apresenta essa cor (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

Todas essas propriedades são determinantes para as principais aplicações desse material como, por exemplo, na cunhagem de moedas, na fabricação de armas e munições, na indústria

alimentícia, de embalagens, farmacêutica, de equipamentos e produtos agrícolas, de tintas e pigmentos, e na joalheria. Além disso, elas também são essenciais para o cobre ser largamente consumido pelas indústrias elétrica e eletrônica, pela engenharia industrial e construção civil, pelas indústrias de transportes, automobilística, de construção naval, aeronáutica e ferroviária, indústria de geração e distribuição de energia, instalações elétricas, trocadores de calor e radiadores. (ABM, 1989; CALLISTER, 2002; SHACKELFORD, 2012).

As propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do cobre podem ser aprimoradas pela formação de ligas. Evidenciam-se propriedades como sua excelente condutividade elétrica e térmica, entretanto a presença de impurezas diminui bruscamente essas condutividades do cobre. Outra importante propriedade exibida por essas ligas se refere a sua extraordinária resistência à corrosão em diversos ambientes, que variam desde atmosfera ambiente, água do mar, até alguns produtos químicos industriais, e ao fato de a maioria poder ser soldada ou fabricada em formas úteis (ASKELAND; PHULÉ, 2011; CALLISTER, 2002; SHACKELFORD, 2012).

Apesar de algumas ligas de cobre passarem por tratamentos térmicos com a finalidade de remover efeitos do trabalho à frio e reduzir a dureza, a maior parte das ligas de cobre não podem melhorar suas propriedades, como aumentar sua dureza ou ter sua resistência à corrosão melhorada, através de procedimentos de tratamentos térmicos. Em vista disso, utiliza-se a deformação plástica a frio e a formação de ligas por solução sólida com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas desse material (CALLISTER, 2002; COUTINHO, 1980).

### ***3.1.2. Ligas de cobre***

No campo metalúrgico, o cobre se apresenta como a base para diversos sistemas de ligas, dentre as mais comumente conhecidas estão os latões, os bronzes e as ligas de cobre-berílio. Os latões são ligas em que o zinco é o elemento de liga predominante, esse está presente na forma de soluto substitucional. Geralmente, os latões contêm de 0 a 50% de zinco e podem apresentar, em teores muito pequenos, outros elementos de liga, os quais são adicionados a fim de que o latão possua outras propriedades. Elementos como Pb, Sn, Ni, Fe, Si e Al, por exemplo, podem ser introduzidos na composição dos latões, com objetivo de elevar suas

propriedades mecânicas, melhorar sua usinabilidade e sua resistência à corrosão (MALISHEV *et al*, 1970; SHACKELFORD, 2012).

Outra importante liga baseada no cobre são os bronzes que além do cobre, contêm estanho e podem ser constituídas de vários outros elementos, como o alumínio, o silício e o níquel. Assim como nos latões, outros elementos podem ser adicionados aos bronzes, com a finalidade de melhorar sua usinabilidade, elevar propriedades tecnológicas e a resistência ao desgaste. O bronze de manganês, por exemplo, é uma liga com manganês e zinco para endurecimento por solução sólida, que possui alta resistência mecânica. Em relação aos latões, as ligas de bronze apresentam-se mais resistentes à corrosão e mais resistentes a tração. Suas principais aplicações estão relacionadas a essas propriedades (ASKELAND; PHULÉ, 2011; CALLISTER, 2002; MALISHEV *et al*, 1970).

Existem também as ligas cobre-berílio, que são as ligas de cobre endurecíveis por precipitação mais comuns. Apesar dessa classificação de ligas de cobre ser cara, devido à adição de berílio, ela apresenta uma combinação excelente de propriedades, uma vez que relaciona altos valores de limite de resistência à tração e elevados módulos de elasticidade com ótimas propriedades elétricas e de resistência à corrosão. As aplicações das ligas cobre-berílio estão voltadas para mancais, buchas do trem de pouso de aeronaves e instrumentos cirúrgicos e dentários. Além disso, essas ligas apresentam propriedades antifaíscas, de maneira que se tornam úteis na fabricação de peças utilizadas em ambientes com gases líquidos e inflamáveis (ASKELAND; PHULÉ, 2011; CALLISTER, 2002).

### **3.1.3. Cobre eletrolítico**

O minério de cobre disposto na natureza apresenta no máximo 2,5% de cobre no composto. Dessa maneira, são realizados processos com objetivo de aumentar o teor de cobre nos mesmos. Através de processos de moagem e imersão química é possível a obtenção de concentração de cobre com aproximadamente 30 à 38% de pureza (BARCELOS, 2010).

Sequencialmente, a aplicação da metodologia de pirometalurgia permite a obtenção de um produto com 98,5% de pureza. Após a eliminação de impurezas como enxofre, cobalto, níquel, arsênio, chumbo, zinco e ferro têm-se o anodo de cobre com cerca de 99,7% de pureza. Por último, têm-se a obtenção do cobre eletrolítico nos catodos de cobre, a partir da

utilização de técnicas de refinamento por eletrólise. Esse processo de refino apresenta o maior grau de pureza, sendo assim, o cobre eletrolítico irá apresentar 99,9% de nível de pureza (BARCELOS, 2010).

#### ***3.1.4. Tratamentos térmicos***

De maneira geral, pode-se dizer que os materiais não ferrosos, como o cobre, por exemplo, são bem descritos em termos de transformações de fase pelos diagramas de equilíbrio. Os tratamentos térmicos, aos quais os materiais não ferrosos são submetidos, são considerados um pouco diferentes dos realizados nos aços. Diferentemente desses últimos, submeter os materiais não ferrosos a elevadas taxas de resfriamento não levam a formação de uma fase dura e frágil, como a martensita, mas sim a um congelamento da microestrutura de elevada temperatura. As ligas não ferrosas endurecíveis por precipitação apresentam grande utilidade em processos que necessitam de boa conformabilidade e/ou tratamentos térmicos (MACHADO, 2002).

Os principais tratamentos térmicos mais usualmente realizados nas ligas de cobre são: homogeneização, recozimento, alívio de tensões, e solubilização e endurecimento por precipitação (CHIAVERINI, 1986)

Na homogeneização, a peça de cobre deve ser aquecida por um longo período de tempo até temperaturas relativamente elevadas, geralmente cerca de 90°C acima da máxima temperatura de recozimento. Esse tratamento é realizado com objetivo de eliminar ou reduzir a segregação de determinados elementos químicos ou fases por difusão dos átomos, em ligas que podem ser trabalhadas a frio ou a quente. As ligas de latão com 58% a 70% de cobre mostram significativa quantidade de fases secundárias segregadas nos produtos fundidos, e os bronzes de estanho com teor de estanho de até 8% também apresentam segregação, a qual se dá durante o resfriamento através do intervalo de temperatura correspondente à solidificação. Em virtude dessa segregação, torna-se necessário o tratamento térmico de homogeneização dessas ligas antes de se realizar trabalho a frio, a fim de se evitar o aparecimento de trincas (CHIAVERINI, 1986; POMPEO, 2011). A homogeneização é, principalmente, realizada em ligas bronze ao estanho, bronze ao silício e cupro-níquel. Entretanto, na maioria dos bronzes industriais não se aplica tratamentos térmicos, a não ser os tratamentos de recozimento para

homogeneização e recristalização, com resfriamento ao forno ou ao ar (CHIAVERINI, 1986; COUTINHO, 1980).

O tratamento térmico de recozimento pode ser aplicado ao cobre trabalhado a frio, uma vez que a deformação pode ser considerada como um importante mecanismo de endurecimento (aumento da densidade de discordâncias), podendo resultar em efeitos indesejáveis como perda de ductilidade ou surgimento de tensões residuais. Nesse caso, o recozimento pode ser aplicado com objetivo de provocar recristalização do cobre e o crescimento de grão e ainda a eliminação dessas tensões residuais (CHIAVERINI, 1986; ASKELAND; PHULÉ, 2011).

Durante o recozimento o material passa por três estágios: a recuperação, recristalização e o crescimento de grão. Quando se trata de recuperação não há mudança pronunciada na quantidade de discordâncias, de modo que permanecem suas propriedades mecânicas, porém esse tratamento remove as tensões residuais decorrentes do trabalho a frio (realizado abaixo da temperatura de recristalização), já que a temperatura permite que as discordâncias se desloquem nos planos de escorregamento (ASKELAND; PHULÉ, 2011; NOGUEIRA, 1995).

No caso de ligas de cobre, esse tratamento é conduzido por meio de um aquecimento a temperaturas de 190°C a 260°C, por cerca de uma hora. Ele pode ser aplicado para evitar trincas que podem ocorrer devido à corrosão sob tensão, quando estocadas em atmosferas industriais ou úmidas (CHIAVERINI, 1986; COUTINHO, 1980).

Na recristalização, o material é aquecido a uma temperatura na qual, além de ocorrer eliminação de tensões residuais, há nucleação de novos grãos em propensos sítios de nucleação, localizados nos contornos de discordâncias poligonizadas, o que reduz drasticamente a densidade de discordâncias, aumentando a ductilidade do material e influenciando em um aumento da deformação plástica total. Por fim, o estágio de crescimento de grãos ainda requer uma temperatura alta, suficiente para o crescimento de grãos, com os grãos maiores aumentando em detrimento dos pequenos. Esse aumento no tamanho de grão não é muito almejado, uma vez que prejudica as propriedades mecânicas (ASKELAND; PHULÉ, 2011; NOGUEIRA, 1995).

A temperatura de realização do recozimento pode variar para o metal cobre de 260°C a 650°C, e considera-se sua temperatura de recristalização como, aproximadamente, 200°C. No caso das ligas desse material, utiliza-se a faixa de temperatura de recozimento entre 425°C a 815°C. Essa faixa é ampla, mas sabe-se que uma maior precisão depende dos teores de elementos de ligas presentes. Além disso, tanto a temperatura de recristalização como a de recozimento são menores quanto maior o encruamento prévio do material, e ainda, quanto maior o tempo de recozimento menor será a temperatura de recristalização (CHIAVERINI, 1986; COUTINHO, 1980).

Outro tratamento aplicado às ligas de cobre se refere à solubilização e endurecimento por precipitação. Esses são aplicados, principalmente, aos bronzes ao alumínio e as ligas cobre-berílio. Esse tratamento implica, no caso dessas últimas ligas, na solubilização através do aquecimento por cerca de três horas, a temperaturas entre 775°C e 1035°C, de acordo com o tipo da liga. Em seguida, realiza-se a precipitação entre duas a cinco horas, em temperaturas na faixa de 300°C a 510°C. Nesse tratamento térmico, primeiramente, as ligas são solubilizadas e posteriormente conformadas a frio. Por fim, são endurecidas por precipitação (CHIAVERINI, 1986).

Algumas ligas de cobre também podem ser submetidas a tratamentos de endurecimento como têmpera e revenido. Exemplos são alguns latões que podem ser temperados a 850°C em água e posteriormente revenidos para melhorar a dureza e a uniformidade estrutural, e ligas de cobre-alumínio com teor de alumínio próximo ou acima de 10% (CHIAVERINI, 1986; COUTINHO, 1980).

### **3.2. Conformação Mecânica**

Operações de conformação plástica, como por exemplo, laminação, forjamento e extrusão são processos utilizados para produzir formas semi-acabadas e acabadas, e, ao mesmo tempo, promover mudanças e controle da estrutura metalúrgica para se obter as propriedades desejadas (DIETER; KUHN, 1977). A conformação plástica, então, diz respeito às técnicas em que é necessário aplicar uma força externa sobre o material inicial, a fim de que ele deforme plasticamente e atinja a forma final desejada (CASTRO, 2009).

Em comparação com todos processos de transformação, considera-se que conformação mecânica apresenta a vantagem de produzir peças com excelentes propriedades com mínima perda de material, resultando em um menor custo, e ainda de resultar em peças com diferentes formas partindo de uma geometria inicial relativamente simples (CASTRO, 2009).

Ainda no que diz respeito à conformação mecânica, também é importante mencionar que o estado de tensão e deformação em um material submetido a um processo de conformação, em geral, não é uniforme, mas apresenta variação de um ponto pra outro. Além disso, parâmetros associados ao *design* da matriz, à geometria da peça de metal, e às condições de lubrificação, os quais determinam a distribuição de tensão e deformação, podem ser controlados com objetivo de se obter condições favoráveis ao melhoramento da deformação antes da ruptura. Dessa forma, além de todas essas variáveis mencionadas, fatores como a velocidade de processamento, a temperatura e a quantidade de deformação vão contribuir para a qualidade final da peça (CASTRO, 2009; DIETER, KUHN, 1977; KUHN, 1978).

### **3.3.Forjamento**

#### ***3.3.1. Aspectos gerais***

Forjamento é um processo de conformação mecânica responsável pela produção de grande parte dos elementos mecânicos, que se caracteriza pela transformação do metal em uma forma desejada, mediante operação de martelamento ou prensagem (SILVA, 2011).

Uma operação de forjamento é constituída por vários passos característicos, dentre eles estão primeiramente o corte, o aquecimento, em seguida a conformação por forjamento, e por último a rebarbação e os processos de tratamento térmico. Através desse processamento é possível modificar a forma do metal, conferindo a esse a forma desejada, além disso, pode-se melhorar suas propriedades mecânicas por meio da modificação e distribuição de seus constituintes e pelo refino dos grãos. Portanto, pode-se dizer que a operação de forjamento confere ao material uma combinação de formas adequadas com excelentes propriedades, de modo que essa se tornou um dos processos de conformação mais empregados (SILVA; MEI, 2011; SILVA, 2011).

É necessário salientar que apesar de a maioria dos processos de conformação por forjamento ser realizada a quente, alguns metais podem fugir do forjamento convencional, de maneira que seja possível forjá-los a frio. Considerando que o trabalho a quente é aquele realizado acima da temperatura de recristalização do material e o à frio é aquele feito numa temperatura inferior à essa, pode-se dizer que haverá diferenças significativas nas características das peças obtidas por esses processos. Por exemplo, tem-se que o material forjado a frio possuirá maiores limites de resistência e menores ductilidades, devido ao efeito do encruamento sofrido durante a conformação, além disso, essa peça apresentará menor índice de rugosidade superficial (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989;).

Quando se trata do forjamento realizado a quente, é necessário aquecer o material, tanto no início quanto ao final do processo, até que ele alcance uma temperatura que lhe conceda elevada plasticidade, conseqüentemente, aumentando sua forjabilidade. Segundo Silva (2011), para metais não ferrosos, como as ligas de cobre e de alumínio, é comumente utilizado no forjamento temperaturas entre 300° e 800°, enquanto que em aços são utilizadas temperaturas mais altas, entre 800° e 1100°. A variação dessas temperaturas em um mesmo material depende das composições químicas dos mesmos (SILVA, 2011).

As peças conformadas tanto por forjamento conduzido a quente quanto por forjamento a frio podem apresentar defeitos típicos desses processos, como por exemplo, rebarbas, trincas superficiais, queimas, incrustações de óxido, trincas internas, gotas e descarbonetação. Essas discontinuidades podem ocorrer em função de falhas na matéria prima ou da própria técnica de operação.

### ***3.3.2. Equipamentos de forjamento***

Os equipamentos universalmente utilizados para realizar o procedimento de forjamento podem ser classificados de acordo com o princípio de operação. Assim surgem, basicamente, duas classes: os martelos e as prensas. Enquanto os martelos são responsáveis por aplicar golpes sucessivos e rápidos sobre a superfície do metal, provocando sua deformação por impacto, as prensas utilizadas nesse processo submetem o material às forças de compressão com uma velocidade relativamente baixa (DIETER, 1989; SILVA, 2011).

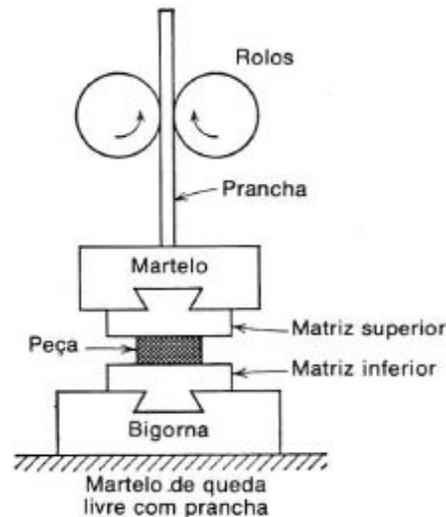
Devido a esses diferentes equipamentos que podem ser utilizados, as operações de forjamento cobrem um extensa faixa de formas e dimensões desejadas nos produtos, de maneira que as taxas de deformação empregadas em processos normais de forjamento variam desde  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  correspondente às prensas hidráulicas, até  $10^2 \text{ s}^{-1}$  referente ao processo realizado com auxílio de martelos de queda (SILVA; MEI, 2011).

Nos martelos, a energia utilizada para causar a deformação da peça no forjamento é dada pela queda de um peso, ou massa cadente do martelo, a qual cai livremente ou é impulsionada de certa altura. Usualmente essa massa está entre 200 a 3500 kg e cai de alturas que variam de 1,0 m a 3,5 m, dependendo do tipo de material que se pretende forjar. O impacto desse peso com a peça ocasiona a deformação (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989; SILVA, 2011).

Dentre os tipos básicos de martelos mais utilizados na operação de forja está o martelo de tábuas, também chamado de martelo de queda livre com prancha. Nesse equipamento, a matriz superior e a massa cadente do martelo são levantadas pela ação de rolos de fricção, entre os quais se localiza a tábua ou prancha. Sucessivamente, a tábua é liberada pelo sistema de disparo do martelo, de maneira que esse entre em queda, atingido imediatamente a peça. Em seguida, a tábua é novamente erguida e solta, provocando uma nova pancada. Geralmente, essa sequência é realizada repetitivamente, podendo se aplicar de 60 a 150 pancadas por minuto. Essas pancadas provocadas pela queda do peso proporcionam a deformação do material. Na Figura 1 pode-se observar um desenho esquemático desse martelo (DIETER, 1989). Esse tipo de máquina é considerado energeticamente limitada, pois a deformação ocorrida é limitada pelo peso da massa cadente e pela sua máxima altura de queda (SILVA, I.,2011).

As prensas utilizadas no processo de forja podem apresentar acionamento hidráulico ou mecânico. Enquanto as prensas mecânicas são limitadas pelo curso da pancada do sistema deformante, as hidráulicas são acionadas, assim como os martelos pneumáticos, por pistões hidráulicos e podem ter grande curso. Apesar disso, essas últimas também apresentam uma limitação: sua capacidade de deformação é limitada pela sua máxima capacidade de carga. (DIETER, 1989; SILVA, 2011).

Figura 1 - Esquema de um martelo de queda livre com prancha.



Fonte: DIETER, 1989.

As prensas hidráulicas apresentam como principal característica o fato de a carga total de pressão poder ser transmitida em qualquer ponto do curso do pistão, assim é aplicada uma pressão uniforme com velocidade de deformação praticamente constante. A velocidade desse tipo de equipamento é relativamente baixa, o que pode permitir pequenas tolerâncias dimensionais, entretanto o longo espaço de tempo que a prensa fica em contato com a peça pode provocar problemas de perda de temperatura da peça e deterioração da matriz. Em geral, as prensas hidráulicas são fabricadas com capacidade de carga de 300 a 50.000 toneladas, e apresentam custo relativamente mais elevado que as prensas mecânicas (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989; SILVA, 2011).

As prensas mecânicas são utilizadas, principalmente, para a fabricação de peças de tamanhos pequenos a médios, e em relação às hidráulicas, apresentam maior facilidade de manuseio e menor custo de operação. Segundo Dieter (1989), a maioria dessas prensas utiliza manivela excêntrica para transformar um movimento de rotação em movimento linear recíproco do cursor da prensa, controlando, assim, a aplicação da força. São fabricadas prensas mecânicas variando de 300 a 12000 toneladas (DIETER, 1989; SILVA, 2011).

### 3.3.3. Tipos de forjamento

Nesse tipo de conformação são utilizadas matrizes, que são peças que entram em contato com

o metal durante o forjamento, e são responsáveis, junto aos esforços aplicados, pelo formato final da peça. Essas peças necessitam exibir propriedades específicas, como por exemplo: elevada tenacidade, alta dureza, alta resistência ao desgaste, alta resistência mecânica a quente e resistência a fadiga. Essas características são requeridas, pois as matrizes de forjamento ficam submetidas à alta solitação térmica, devido ao contato dela com a peça aquecida, a choque mecânicos e a altas tensões de compressão (DIETER, 1989; SILVA, 2011).

Em função dessas propriedades, as matrizes de forjamento são geralmente formadas de aço-ferramenta, principalmente de aços-liga e metal duro, sendo que a constituição dessa matriz dependerá, principalmente, do material que passará pela operação de forjamento (SILVA, 2011).

Tratando-se da conformação de metais não ferrosos de baixa densidade, por exemplo, alumínio e suas ligas, são preferíveis utilizar aços cromo-níquel e cromo-níquel-molibdênio devido à alta tenacidade apresentada por eles. Em comparação, no forjamento de aços são mais utilizadas matrizes de aços ligados ao tungstênio, em função de sua elevada resistência a quente. No caso de serem necessárias matrizes com maior dureza e maior resistência à compressão, o metal duro, feito através da metalurgia do pó, é uma boa opção (SILVA, 2011). Em função do tipo de matriz utilizada durante a operação, pode-se realizar uma divisão do processo de forjamento em duas categorias principais: forjamento livre, também chamado de forjamento em matriz aberta e o forjamento em matriz fechada ou forjamento em matriz (DIETER, 1989).

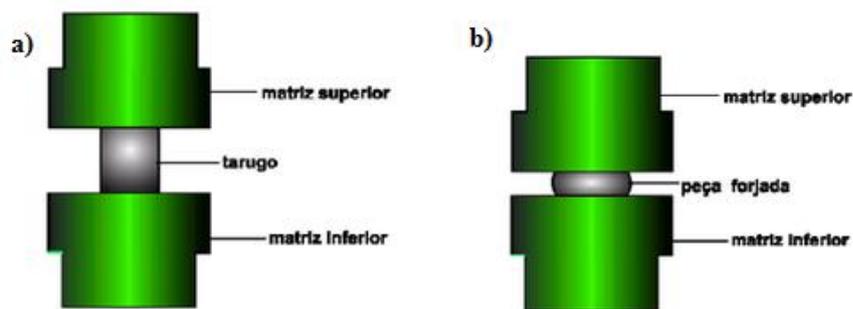
#### *3.3.3.1. Forjamento em matriz aberta*

No forjamento livre ocorre deformação do material entre matrizes planas ou em matrizes que apresentam formato geométrico relativamente simples, podendo ser utilizada uma grande prensa hidráulica ou um martelo mecânico para auxiliar a operação. Usualmente, essa operação é realizada em barras limitadas aquecidas por inteiro ou aquecidas somente em suas extremidades (SILVA, 2011).

Esse é um processo frequentemente utilizado em peças grandes ou quando o número de componentes requerido é pequeno, uma vez que nesses casos não é válida, financeiramente, a

confeção de matrizes de alto valor. Atualmente, o forjamento em matriz aberta vem sendo aperfeiçoado de maneira a possibilitar o desenvolvimento de estados tensões apropriado, que auxilie na eliminação de defeitos internos. Exemplos de peças tipicamente fabricadas por forjamento livre são eixos de turbinas e de hélices, aros, virabrequins, tubos de canhão, anéis e vasos de pressão. Na Figura 2 pode-se observar uma representação esquemática de forjamento em matriz aberta (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989).

**Figura 2 - Representação esquemática do forjamento em matriz livre ou matriz aberta.**



a) o início da operação; b) final da operação apresentando a peça forjada.

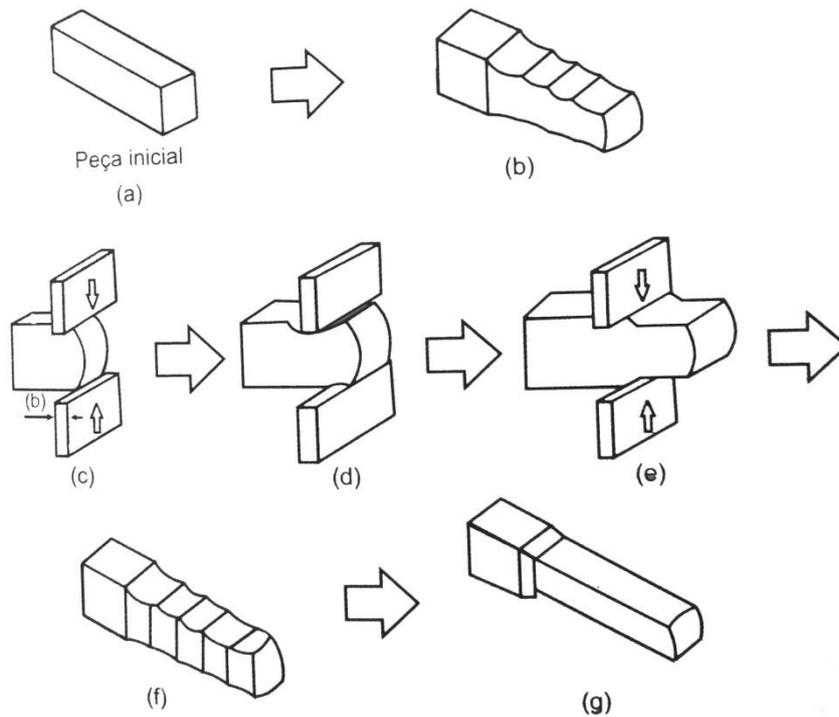
Fonte: CARDOSO, 2008.

As principais operações de forjamento livre são estiramento, desbaste, alargamento e recalque. Cada uma dessas operações apresenta certas peculiaridades, no recalque, por exemplo, o material escoar no sentido transversal da peça, diferentemente, na operação de estiramento o material escoar na direção do próprio eixo da peça, de maneira a alongá-lo. O estiramento é realizado em matrizes de pequena largura e ocorre através de pancadas compressivas e sucessivas e avanços da barra de metal. Esse processo é representado pelas Figuras 3 (c), (d), e, (e), a Figura 3 (b) representa a peça fornecida após a primeira etapa da operação. Ao final, a Figura 3 (f) indica a peça após passar por essas etapas várias vezes e realizar um giro de 90°, assim alisam-se as faces que foram forjadas, trocando-se as matrizes por outras de largura superior, Figura 3 (g) (CETLIN; HELMAN, 2010; SILVA, I.,2011).

Na operação de forjamento livre, a principal forma de deformação é a compressão, de modo que essa está sempre acompanhada por um apreciável espalhamento nas direções laterais, uma vez que a restrição do movimento lateral do metal é menor, em função da menor força de atrito nessa região. Essa deformação fica restrita, a cada tempo, a uma pequena porção da peça a ser trabalhada, uma vez que o tarugo que irá passar pelo processo de forjamento é

sempre muito maior que a ferramenta utilizada. Figura 4, observa-se um esquema de forjamento livre, de maneira a se identificar a área de contato da peça com a matriz, sujeita a deformação restrita (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989).

**Figura 3 - Estiramento da ponta de uma barra por forjamento em matrizes abertas.**

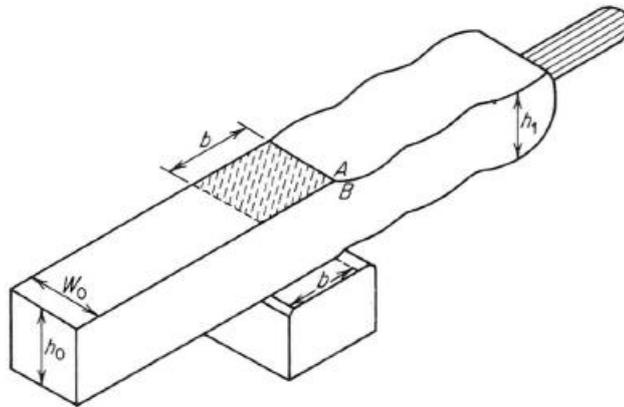


(a) peça inicial antes ao estiramento, (b) peça durante o ensaio de forjamento em matrizes abertas; (c) (d) (e) Representam a peça durante as varias etapas do processo; (g) Peça após primeira etapa do processo.

Fonte: CETLIN; HELMAN, 2010.

Segundo Silva (2011), a deformação ocorre mediante a aplicação de uma compressão direta, de maneira que o material escoar no sentido de menor resistência ao movimento (atrito), ou seja, sentido perpendicular à direção do esforço aplicado. Assim, em função das forças de atrito existentes na interface matriz-peça, a deformação que ocorre nessa interface, na medida em que o material escoar, é menor que a deformação que surge no meio da peça. De maneira geral, tem-se que o material escoará mais facilmente nas regiões de superfície livre, uma vez que essas apresentam condições de menor efeito do atrito. (CETLIN; HELMAN, 2010; SILVA; MEI, 2011; SILVA, 2011). É importante mencionar que o forjamento livre é muito utilizado para conformar a peça antes dessa passar pelo processo de forjamento em matriz o qual será explicado a seguir (SILVA, 2011).

**Figura 4 - Operação de desbaste na forja livre, na qual a área hachurada identifica a área de conta da matriz superior com a peça que está sendo conformada.**

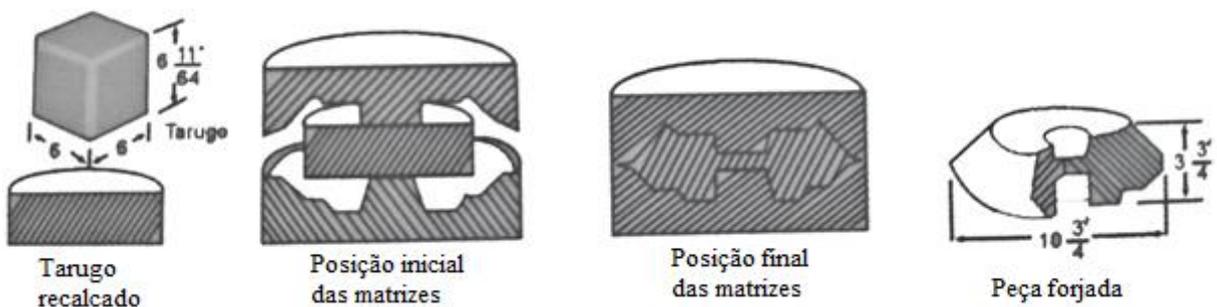


Fonte: DIETER, 1989.

### 3.3.3.2. Forjamento em matriz fechada

Em comparação, tem-se que no forjamento em matriz fechada o material também é conformado por compressão, mas, diferentemente, escoia através de deformação plástica dentro de uma matriz, sendo empurrado em direções determinadas pela forma dessa ferramenta. Assim, a deformação ocorre entre as duas metades dessa matriz, as quais conferem ao material a forma final desejada, de modo a provocar forte restrição ao livre espalhamento do material. Um esquema do processo de forjamento em matriz fechada pode ser observado na Figura 5. Como mencionado anteriormente, percebe-se que o tarugo utilizado foi previamente recalcado, possivelmente, pelo processo de forjamento livre, para, em seguida ser, conformado pelo processo de forjamento em matriz fechada (CETLIN; HELMAN, 2010; COLPAERT, 2008; DIETER, 1989).

**Figura 5 - Esquema de forjamento em matriz fechada**



Fonte: CETLIN; HELMAN, 2010.

As peças devem passar por várias etapas no forjamento em matriz fechada até alcançarem a forma final desejada. Para peças que não apresentam alto nível de complexidade, as etapas básicas de trabalho a serem seguidas são: corte através de cisalhamento ou cerramento, aquecimento do metal em fornos, forjamento intermediário (dobramento ou esboçamento da seção transversal), no caso de ser difícil a conformação em uma única etapa, forjamento final realizado em matriz com a forma e dimensões selecionadas, corte da peça forjada da barra no caso de um forjamento a partir de uma barra, tratamentos térmicos e tratamentos superficiais posteriores (SILVA, 2011).

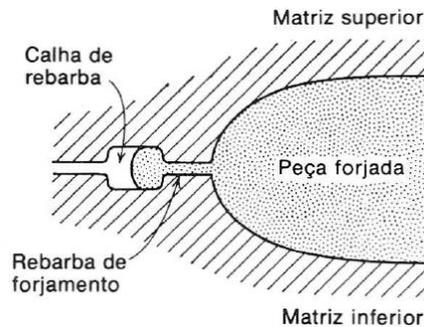
Ao contrário do forjamento livre, o forjamento em matriz fechada é utilizado para produção de uma grande quantidade de componentes a fim de se compensar o elevado valor de suas matrizes. Outro detalhe é que no processo de forja com matriz fechada é muito difícil a obtenção de componentes com filetes muito agudos, almas finas e frisos ou arestas muito altas. Além disso, a matriz desse tipo de forjamento deve ser afunilada para facilitar a retirada das peças formadas (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989; SILVA, 2011).

No forjamento em matriz fechada, a peça metálica é deformada sob alta pressão numa cavidade fechada e são utilizados blocos de matriz criteriosamente usinados, são esses os motivos que possibilitam a obtenção de peças com tolerâncias dimensionais bastante precisas. Para atingir esse objetivo, deve-se atentar ao fato de ser necessário utilizar quantidade de material suficiente para preencher completamente a cavidade da matriz. Em vista da dificuldade de se determinar exatamente essa quantidade, costuma-se trabalhar com excesso de material. Desse modo, parte do material escoar para fora da cavidade da matriz proporcionando a formação de rebarbas que precisam ser removidas na última etapa de forjamento em matriz. Um ressalto nomeado de calha de rebarba pode ser feito nas matrizes para evitar a formação de uma rebarba muito extensa, essa calha pode ser observada na Figura 6 (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989; SILVA, 2011).

As rebarbas, além de atuarem como válvula de segurança para o excesso de material inserido na cavidade, também apresentam a função de regular o escape do material, assim uma rebarba muito fina representa um aumento na resistência de escoamento do sistema, de maneira que a pressão atinja valores superiores e permita o preenchimento de todos os detalhes da matriz. A

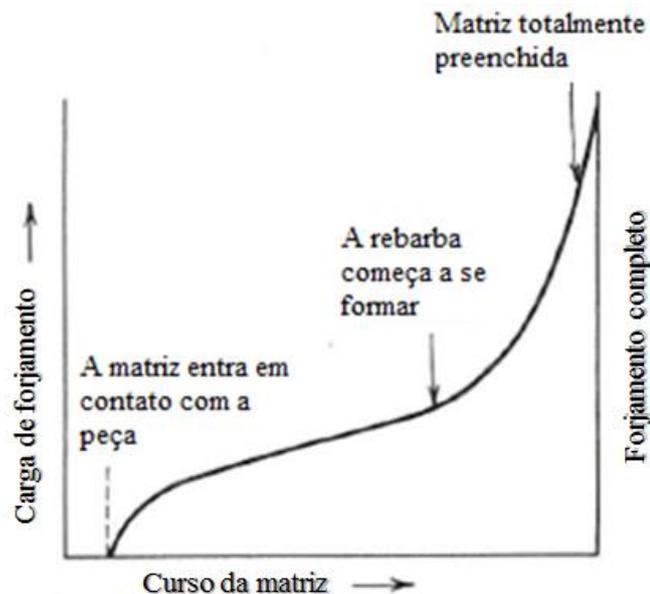
curva representada na Figura 7 retrata a carga no forjamento com o avanço da matriz durante o forjamento em matriz fechada (DIETER, 1989).

**Figura 6 - Vista em corte de uma matriz de forja, exibindo a rebarba proveniente do forjamento e a calha de rebarba.**



Fonte: DIETER, 1989.

**Figura 7 - Curva típica da carga de forja com o curso da matriz no forjamento em matriz fechada.**



Fonte: DIETER, 1989.

### 3.4. Análise da Conformabilidade

Conformabilidade ou trabalhabilidade pode ser entendida como a quantidade de deformação que o material pode exibir, durante um processo de conformação, sem apresentar defeitos ou fratura. As características do próprio material e o próprio processo de conformação apresentam influência equivalente na conformabilidade. Desse modo, o conceito de conformabilidade pode ser expresso pela seguinte relação:

$$\text{Conformabilidade} = W_1 (\text{Material}) - W_2 (\text{Processo}) \quad (1)$$

Onde  $W_1$  se refere às características relacionadas a ductilidade do material e  $W_2$  é baseada nas tensões e deformações impostas pelo processo de conformação (KUHN, 1978).

Em geral, pode-se dizer que a conformabilidade depende das condições locais de tensão, deformação, taxa de deformação e temperatura, combinadas com as características do material como tamanho e forma (DIETER, KUHN, 1977; KUHN, 1978).

Dessa maneira, a análise da conformabilidade de um material deve considerar dois pontos principais:

- a) O critério de fratura apresentando os estados de tensão e/ou deformação nos quais ocorre a fratura de um material, submetido à uma determinada temperatura e taxa de deformação;
- b) Uma descrição precisa das características do processo ao qual o metal está sendo submetido, ou seja, a determinação dos valores de tensão e de deformação prévia, taxa de deformação e temperatura nos locais onde existe uma maior tendência à ocorrência da fratura (KUHN, 1978).

Segundo Kuhn (1978), a comparação desses dois itens, as condições existentes no material durante o processo, com as condições limites fornecidas pelo critério de fratura, permite a finalização da análise da trabalhabilidade, determinando as variáveis com as quais o processo de conformação deve ser conduzido. A partir dessa análise, seria possível especificar as variáveis do processo de maneira a assegurar que as condições limites não sejam excedidas, de modo que se saiba o valor limite até o qual o material deve ser deformado plasticamente (ERTURK, KUHN, LEE, 1973; KUHN, 1978).

Para estabelecer os critérios de fratura, mencionados anteriormente, são feitos trabalhos experimentais, utilizando o que são chamados de teste de conformabilidade, ensaios como, por exemplo, testes de tensão, torção, compressão axial e dobramento. Esses testes são capazes de oferecer uma ampla faixa de estados de tensão e deformação controlados. Além disso, devem apresentar características de estados de tensão e deformação bem definidos e

sempre reproduzir as condições do material e do processo, de forma similar as da real situação (KUHN, 1978).

Na seção 3.4.1, será dado um maior enfoque no teste de conformabilidade de compressão, ou seja, um ensaio de forjamento com matriz aberta, já que essa será a técnica utilizada ao longo desse projeto, para avaliar a trabalhabilidade do cobre eletrolítico.

#### ***3.4.1. Ensaio de compressão para análise da conformabilidade***

De maneira geral, o teste de compressão, ou como mencionado anteriormente, ensaio de forjamento com matriz aberta, implica na aplicação de um esforço axial, que tende a provocar um encurtamento do corpo de prova, de forma que com o acréscimo da carga ocorra um aumento da seção transversal da amostra, juntamente com uma diminuição do seu comprimento (SOUZA, 1999).

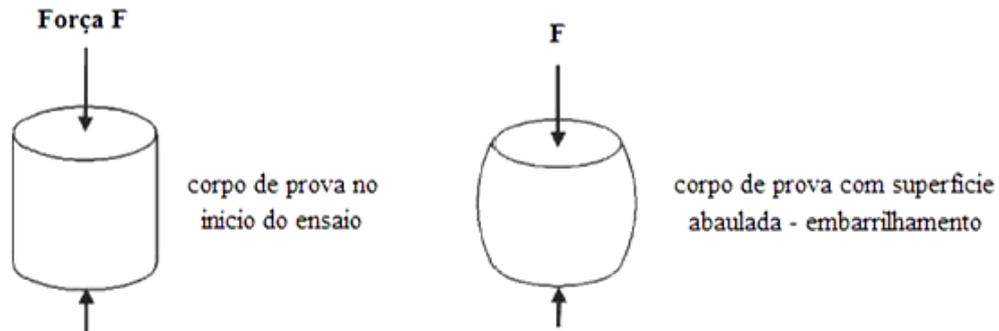
Esse tipo de teste é importante para a análise da conformabilidade, pois promove um teste de deformação, no qual o estado médio de tensões é similar aos processos de conformação massiva, que são aqueles nos quais ocorre acentuada alteração na espessura e nas outras dimensões do metal, como por exemplo, forjamento, laminação, trefilação e extrusão (DIETER, KUHN, 1977; KUHN, 1978).

No caso de ensaios de compressão com materiais muito dúcteis, como o cobre, por exemplo, o esforço de compressão provoca uma deformação lateral apreciável e essa prossegue durante o ensaio, até o corpo de prova se transformar em um disco sem que ocorra ruptura do mesmo (SOUZA, 1999).

No caso de testes de compressão em que não há atrito nos locais em que a matriz está em contato com as superfícies do corpo de prova, este último fica submetido a uma compressão uniforme, de forma que a deformação circunferencial é igual à metade da axial. Entretanto, quando se trata de testes com atrito, ocorre um bojamento, ou embarrilhamento, da superfície, Figura 8, em função do atrito que restringe a deformação lateral. Por esse motivo, o teste com atrito entre a matriz e as superfícies da amostra promove uma distribuição de tensão e

deformação de maneira não uniforme em todo volume do corpo de prova (ERTURK; KUHN; LEE, 1973; SOUZA, 1999).

**Figura 8 – Abaulamento lateral de corpo de prova durante ensaio de compressão.**



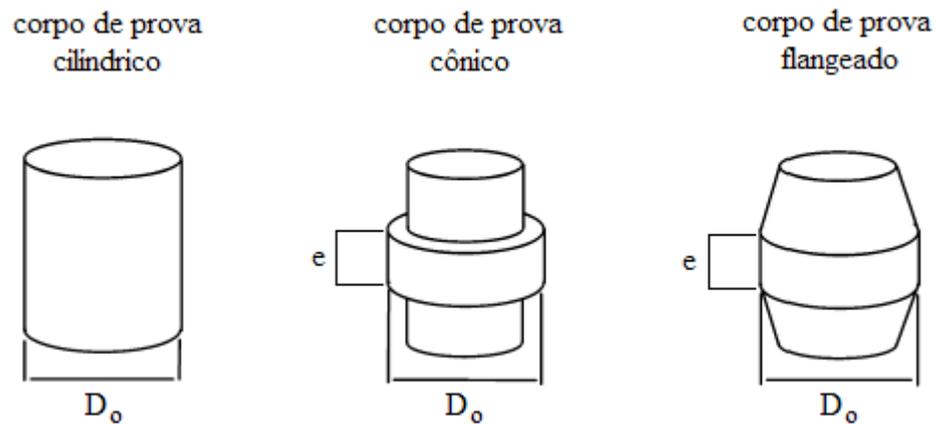
Fonte: CETLIN; PERTENCE, 2000.

O aumento do valor do atrito ou a diminuição da relação altura/diâmetro da amostra aumentará ainda mais a heterogeneidade da deformação e a curvatura lateral, de modo que a deformação axial seja inferior do que seria, caso fosse considerado um teste sem atrito (homogêneo) (ERTURK; KUHN; LEE, 1973).

O embarrilhamento que pode ocorrer na superfície dos corpos de prova cilíndricos já foi julgado como sendo desvantajoso, uma vez que causava dificuldades na obtenção de curvas tensão-deformação, mas na realidade, ele fornece considerável flexibilidade ao teste de compressão axial, auxiliando na obtenção de uma ampla faixa de estados de tensão e deformação, que são importantes para a determinação experimental do critério de fratura (KUHN, 1978).

O corpo de prova geralmente utilizado nesse tipo de ensaio é de forma cilíndrica, entretanto existem outros tipos de corpos de prova, também muito utilizados, uma vez que suas formas geométricas são capazes de reduzir os efeitos do atrito (CETLIN; PERTENCE, 2000). A Figura 9 apresenta o formato dos corpos de prova mais usuais, cilíndricos, cônicos e flangeados. Desde já, ressalta-se que nesse projeto serão utilizados apenas os corpos cilíndricos, mas com variação na relação altura/diâmetro.

**Figura 9 – Formato geométrico dos corpos de prova mais utilizados para os testes de conformabilidade de compressão.**



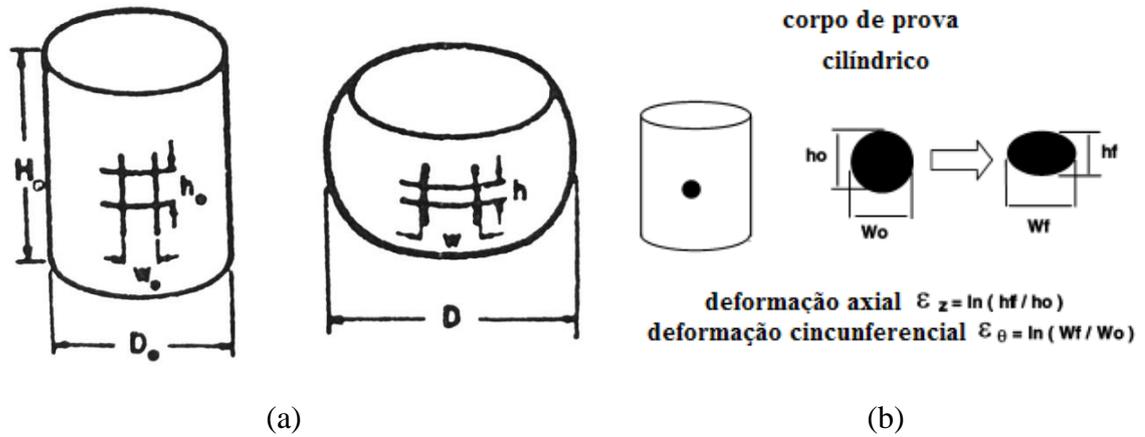
Fonte: CETLIN; PERTENCE, 2000.

Os testes de compressão, assim como os de dobramento apresentam vantagens em relação aos testes de tração e torção, uma vez que neles a fratura se inicia na superfície e vai se propagando para o interior do material, enquanto que nos testes de tração, as trincas se iniciam no centro. O modo de propagação da trinca nos testes de compressão e dobramento é, portanto, mais próximo do processo real (KUHN, 1978).

Para a realização deste teste, objetivando-se determinar as deformações axial (de compressão) e circunferencial (de tração), Erturk, Kuhn e Lee (1973) sugerem que os corpos de prova sejam marcados com o desenho de uma pequena malha, normalmente circular ou quadricular, na metade da altura dos mesmos. Essa marcação pode ser realizada através de método de ataque eletroquímico, marcas de recuo ou através de desenho com marcador permanente. Exemplo esquemático das marcações que podem ser feitas nos corpos de prova, para auxiliar na medida das deformações podem ser observados na Figura 10.

O procedimento deste teste implica na compressão do cilindro, de maneira que as marcações realizadas na superfície do corpo de prova fiquem visíveis. Para a coleta de possíveis resultados e análise da conformabilidade do material do corpo de prova é necessária a medição da alteração da marcação, durante vários estágios do ensaio (DIETER, KUHN, 1977; ERTURK, KUHN, LEE, 1973).

**Figura 10-** Marcação desenhada sobre a superfície do corpo de prova para verificação da tensão e deformação axial e circunferencial ao longo do teste de compressão axial.



(a) Marcação de malha quadrada; (b) Marcação de malha circular.

Fonte: ERTURK; KUHN; LEE, 1973.

A partir dessas medidas, é possível a obtenção da deformação axial  $\epsilon_z$  (ou de compressão) e da deformação circunferencial  $\epsilon_\theta$  (ou de tração) do cilindro, através das fórmulas:

$$\epsilon_z = \ln(h/h_0) \quad (2)$$

$$\epsilon_\theta = \ln(w/w_0) \quad (3)$$

onde:  $h_0$ ,  $h$  se referem, respectivamente, à medida inicial e final da marcação na vertical;  $w_0$ ,  $w$  se refere, respectivamente, à medida inicial e final da marcação na horizontal, conforme Figura 10.

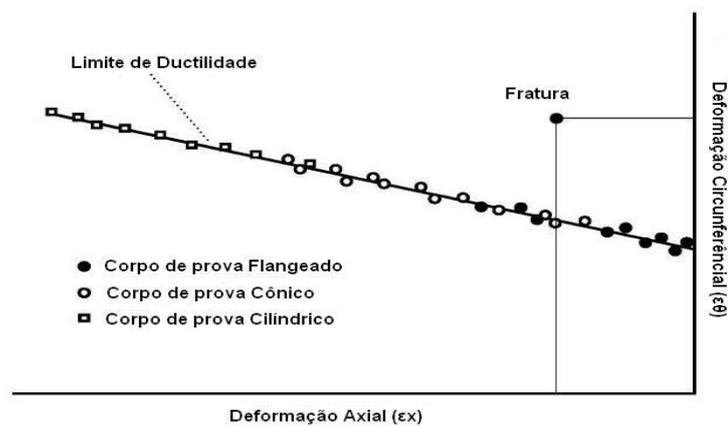
Através das deformações axial e circunferencial encontradas durante os vários estágios do ensaio de compressão, e com base nas equações 2 e 3, é possível obter uma curva de caminho de deformação, que apresenta nos eixos do plano cartesiano, a deformação axial e circunferencial e indica o modo de deformação do material. Além disso, a medida dessas deformações no momento da fratura é a base para a elaboração da curva limite de conformabilidade (CLC), a qual indicará o limite máximo que o material pode ser deformado, sem apresentar fratura (ERTURK; KUHN; LEE, 1973).

Para estudar a ductilidade e conformabilidade de alguns materiais, Cetlin e Pertence (2000) utilizaram testes de conformabilidade, inclusive o ensaio de compressão, em corpos de prova

de diferentes geometrias, para determinar as curvas limites de conformação. Como exemplo, podem ser observadas nas figuras 11 e 12, as curvas obtidas.

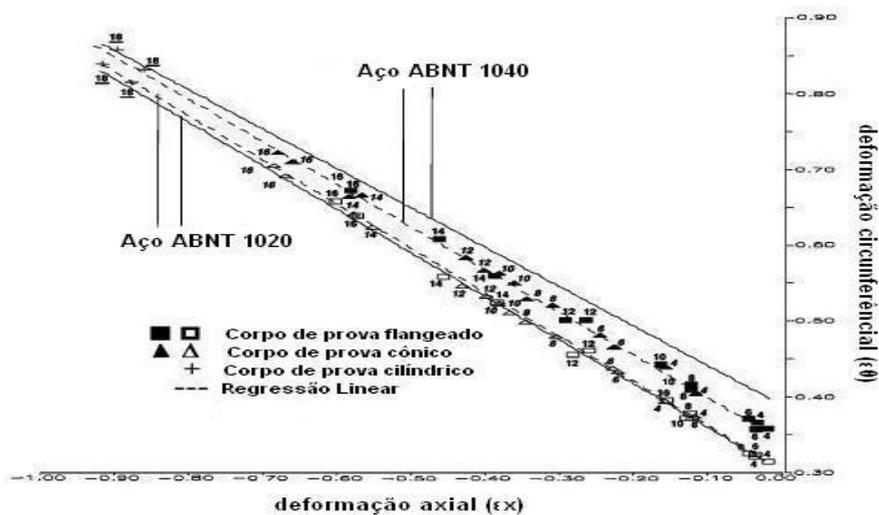
Na Figura 11 percebe-se que uma deformação que se localize acima da curva limite de deformação indicará que o material irá trincar. A Figura 12 indica a curva limite de dois metais: os aços ABNT 1020 e 1040.

**Figura 11: Curva limite de conformação para corpos de prova cilíndrico, flangeado e cônico de plasticina (mistura de CaCO<sub>3</sub> com vaselina).**



Fonte: CETLIN; PERTENCE, 2000.

**Figura 12: Curva limite de conformação para os aços ABNT 1020 e 1040.**

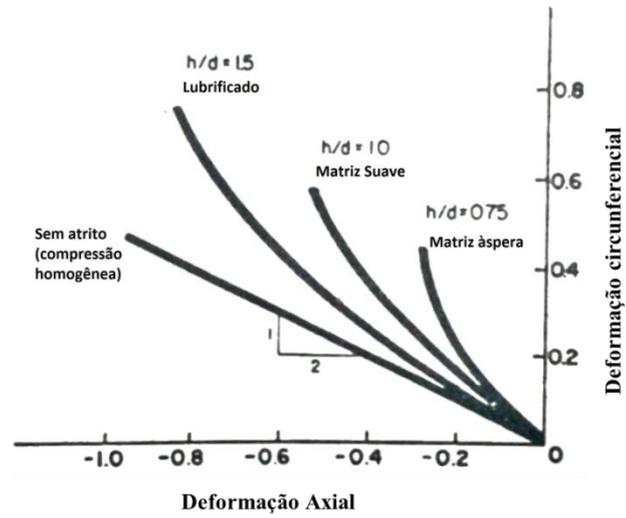


Fonte: CETLIN; PERTENCE, 2000.

A fim de analisar o modo de deformação de corpos de prova cilíndricos durante ensaios de compressão, dando enfoque na relação de medida entre as deformações axial e circunferencial, Kuhn (1978) obteve as curvas de caminho de deformação apresentadas na

Figura 13. Nessa figura apresentam-se os caminhos de deformação para corpos de prova com diferentes relações altura/diâmetro e diferentes condições da matriz de compressão.

**Figura 13 - Caminhos de deformação em ensaios de compressão.**



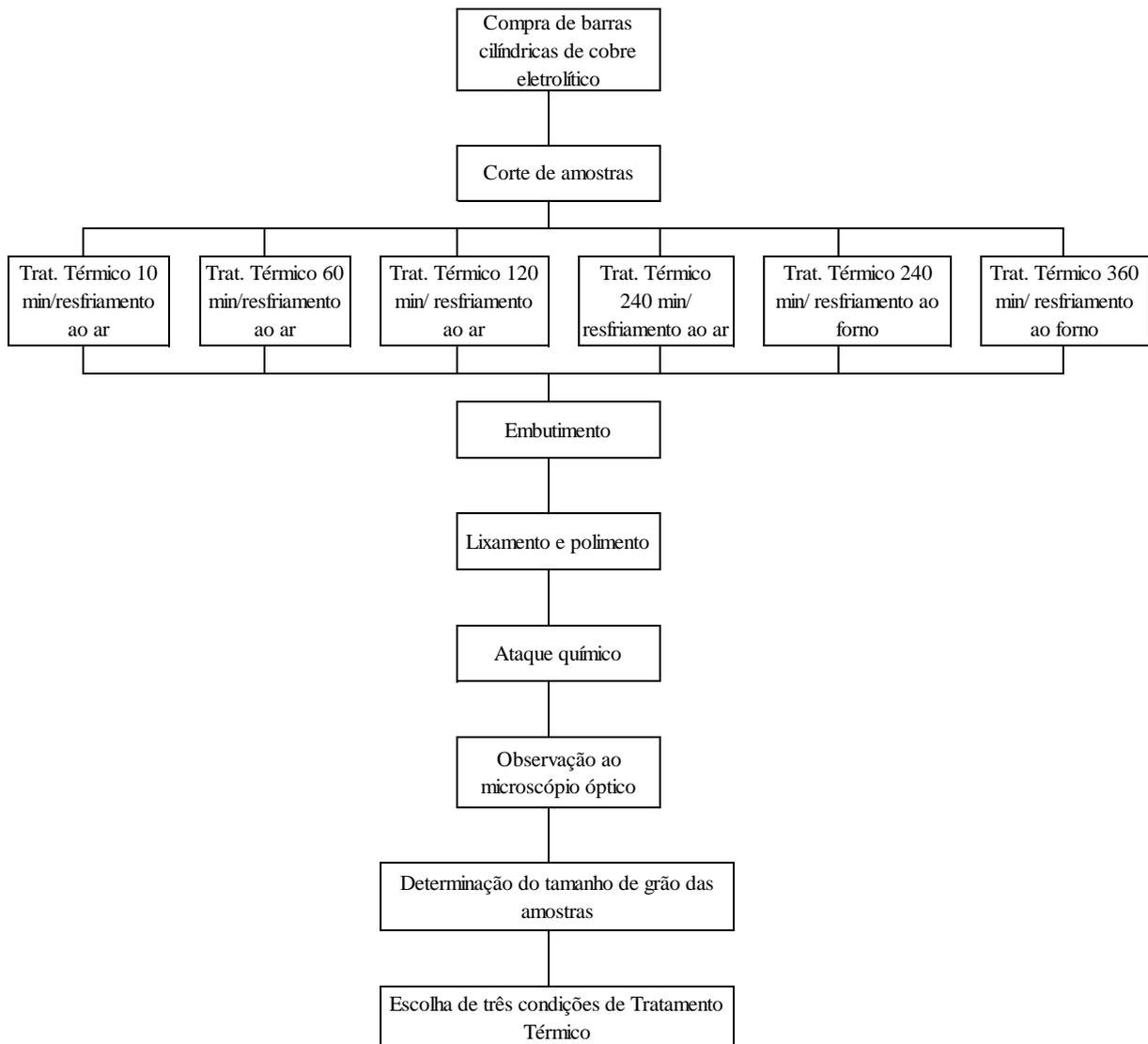
Fonte: KUHN, 1978.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Aspectos Gerais do Trabalho Desenvolvido

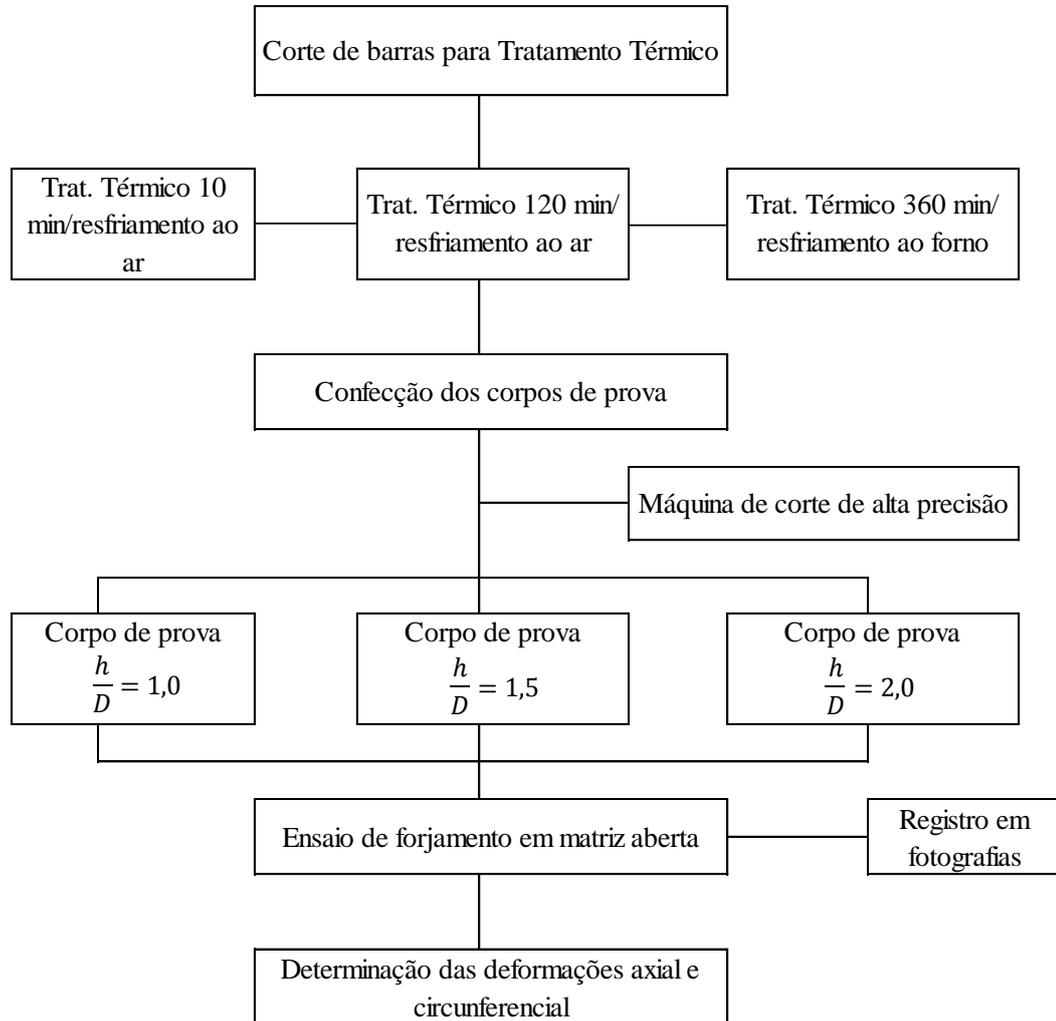
Neste trabalho pretendeu-se estudar a conformabilidade do cobre eletrolítico, conforme a variação do tamanho de grão definido pelo tempo de tratamento térmico e a variação na relação altura/diâmetro do corpo de prova. Para melhor facilidade de entendimento, a parte experimental deste trabalho foi dividida em duas etapas. A sequência de procedimentos realizados na primeira etapa e na segunda etapa está registrada nos fluxogramas das figuras 14 e 15.

**Figura 14: Fluxograma do procedimento experimental realizado na primeira parte do projeto.**



Fonte: Autor.

**Figura 15 – Fluxograma dos procedimentos realizados na segunda parte do projeto.**



Fonte: Autor.

#### 4.1. Material

O material utilizado como objeto de estudo foi o cobre eletrolítico, adquirido na forma de barra cilíndrica com  $\frac{1}{16}$ ", tendo sido acompanhado do certificado de qualidade. A composição química (% em peso) do material é exibida na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição Química do Cobre Eletrolítico obtido, disponibilizado no certificado de compra.**

| Composição Química do Cobre Eletrolítico |       |
|------------------------------------------|-------|
| Teste 20°C                               | %Cu   |
| Especificado                             | 99,90 |

Fonte: Autor.

## 4.2. Tratamentos Térmicos

Com objetivo de mudar as condições iniciais do material, foram realizados tratamentos térmicos nas amostras de cobre eletrolítico. Para tais tratamentos térmicos foi utilizado o forno elétrico da marca BRASIMET, exibido na foto da Figura 16.

Todos os tratamentos térmicos foram realizados na temperatura de 570° C, valor intermediário da faixa sugerida no item 3.1.4, durante diferentes intervalos de tempo e com resfriamento ao ar ou resfriamento lento ao forno.

**Figura 16 - Forno elétrico utilizado para realização dos tratamentos térmicos**



Fonte: Autor.

Os tratamentos térmicos foram realizados em duas etapas: a primeira incluiu diferentes condições de tratamentos térmicos, as quais serviriam de base para tomada de decisão sobre quais dessas condições realmente seriam realizadas e utilizadas no resto do projeto. Dessa forma, a segunda parte contemplava a repetibilidade das condições de tratamento, previamente escolhidas, em uma maior quantidade de amostras, a fim de que essas fossem utilizadas no decorrer do estudo.

Durante a primeira parte, foram realizados seis diferentes tratamentos térmicos, com amostras de, aproximadamente, 10 mm de altura. Como se tratavam de amostras muito pequenas, utilizou-se um recipiente de metal para facilitar a retirada das peças de dentro do forno. Esse

recipiente com duas das amostras pode ser observado na Figura 17. Importante ressaltar que tal foto foi feita após o processo de tratamento térmico, logo as amostras de cobre apresentam cor relativamente escura, devido à formação de óxido na camada superficial do material.

**Figura 17 - Recipiente metálico e amostras de cobre eletrolítico utilizados no tratamento térmico**



Fonte: Autor.

Nos tratamentos da primeira parte ainda considerou-se a mesma temperatura, mencionada anteriormente, mas utilizaram-se diferentes tempos de permanência no forno em cada ocasião. Além disso, os tratamentos se diferenciaram quanto ao resfriamento, o qual poderia ser no ar ou dentro do próprio forno (resfriamento lento). Na Tabela 2 encontra-se um resumo das condições de tratamento térmicos realizados nesta etapa.

**Tabela 2 - Condições de tratamento térmico para posterior escolha.**

| Temp. (°C) | Tempo de permanência no forno | Meio de resfriamento |
|------------|-------------------------------|----------------------|
| 570 °C     | 10 min                        | Ar                   |
| 570 °C     | 60 min                        | Ar                   |
| 570 °C     | 120 min                       | Ar                   |
| 570 °C     | 240 min                       | Ar                   |
| 570 °C     | 240 min                       | Forno                |
| 570 °C     | 360 min                       | Forno                |

Fonte: Autor.

Na segunda parte, realizaram-se três dentre os tratamentos descritos na Tabela 2, em amostras de cobre eletrolítico com, aproximadamente, 100 mm. Foi determinado que esses tratamentos

seriam feitos com amostras maiores, uma vez que as mesmas seriam posteriormente cortadas em diferentes tamanhos, a fim de se obter corpos de prova para o ensaio de forjamento, assuntos os quais serão detalhados nas seções 4.4 e 4.5.

### 4.3. Caracterização do Material

Realizou-se a caracterização microestrutural do cobre eletrolítico, a fim de se conseguir determinar o tamanho médio dos grãos produzidos a partir de cada condição de tratamento térmico. Para tanto foi necessário, primeiramente, realizar o embutimento, lixamento, polimento, seguido do ataque químico das mesmas com o uso de um reagente específico para o cobre.

As amostras que passaram pelos tratamentos térmicos da Tabela 2 foram embutidas, com objetivo de permitir maior firmeza e facilidade no manuseio das mesmas. As peças foram embutidas à frio, utilizando acrílico autopolimerizável, apresentados na Figura 18, e também embutidas à quente com baquelite, utilizando o uma prensa de embutimento da marca Arotec, Figura 19.

**Figura 18 - Materiais utilizados no embutimento a quente e amostras embutidas.**



Fonte: Autor.

**Figura 19 – Embutimento à quente.**



(a)

(b)

(a) Equipamento de embutimento a quente ; (b) amostras embutidas.

Fonte: Autor.

Após o embutimento, as amostras tiveram a superfície preparada empregando-se lixadeiras semiautomáticas da marca Arotec, Figura 20, com objetivo de dar um acabamento liso e espelhado à superfície do material e de remover possíveis riscos e marcas mais profundas, de forma a preparar a peça para o polimento (RHODES, 2010). O lixamento foi realizado utilizando, sucessivamente, lixas de granulometria cada vez menor, e sempre mudando a direção de lixamento em  $90^\circ$  entre uma lixa e outra. Para este trabalho, a sequência de mesh das lixas d'água utilizadas foi: #120, #240, #320, #400 e #600.

**Figura 20 - Lixadeira.**



Fonte: Autor.

Após o lixamento com a lixa mais fina, passou-se para o polimento das amostras. Esse procedimento foi realizado em politrizes também Arotec, com panos de 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , os quais tinham sido adicionados de abrasivo, que no caso foi a pasta de diamante. Ao se obter uma superfície espelhada do cobre eletrolítico, finalizou-se a etapa de polimento.

O ataque químico foi realizado com o reagente denominado DiCobre. O ataque foi realizado com um algodão embebido de tal solução e passado na superfície do metal. Após esse procedimento, a amostra foi imediatamente lavada com água, depois álcool e depois secada com jato de ar quente, para evitar manchas. Esse ataque químico foi necessário para deixar mais visível o contorno dos grãos do metal, revelando sua microestrutura durante a observação no microscópio óptico. Além também de revelar o contraste das maclas, presente no cobre, com seus grãos.

As amostras foram observadas no microscópio óptico Fortel, Figura 21, que juntamente com o programa *ScopePhoto*<sup>®</sup>, permitiu a obtenção de imagens da microestrutura do cobre, para cada condição de tratamento térmico, em um mesmo ponto com ampliações distintas.

**Figura 21: Microscópio Óptico**

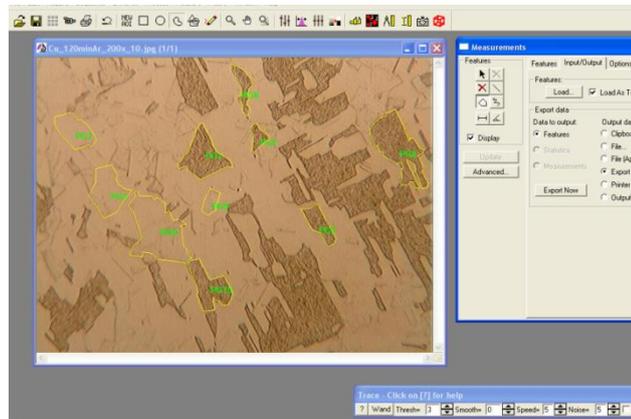


Fonte: Autor

Para definir o tamanho médio dos grãos nas diferentes condições de tratamento térmico, obtiveram-se vinte imagens, com ampliação de 200x, em diferentes pontos, para cada uma das amostras. Em seguida, tais fotos foram utilizadas juntamente como programa *Image-Pro Plus 6.0*<sup>®</sup>, o qual permitiu a contagem da área de dez diferentes grãos em cada foto, como

representado na Figura 22. Dessa forma, para cada condição foram medidos os tamanhos de duzentos grãos diferentes, para posteriormente ser calculada a média desses valores.

**Figura 22 - Contagem da área de grão através do programa *Image-Pro Plus 6.0*.**



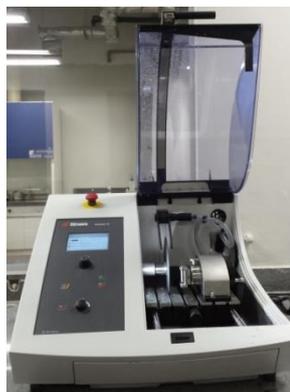
Fonte: Autor

A partir desses resultados, que serão apresentados na seção 5.1.1., foram definidas quais condições de tratamento térmico seriam aplicadas as peças que seriam os corpos de prova para o ensaio de forjamento em matriz aberta.

#### 4.4. Confeção dos Corpos de Prova

Após a realização dos tratamentos térmicos previamente definidos, as barras cilíndricas de, aproximadamente, 100 mm foram cortadas em uma máquina de corte de alta precisão da (*Secotom – 15*) marca *Struers*, Figura 23.

**Figura 23 - Equipamento de corte de alta precisão**



Fonte: Autor

Durante o ensaio de forjamento, foram utilizados três diferentes tamanhos de corpos de prova, para, em seguida, realizar-se a comparação da conformabilidade de cada um deles, juntamente com a análise do tratamento térmico sofrido pelos mesmos. Definiu-se então, que todos os corpos de prova seriam cilíndricos, mas que teriam diferentes relações de proporcionalidade entre suas alturas e seus diâmetros, de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3 - Resumo das características dos corpos de prova**

|                    | Diâmetro<br>(D) | Altura<br>(h) | Relação<br>D x h |
|--------------------|-----------------|---------------|------------------|
| Corpos de<br>prova | 7,95 mm         | 7,95 mm       | $h = D$          |
|                    | 7,95 mm         | 11,93 mm      | $h = 1,5D$       |
|                    | 7,95 mm         | 15,90 mm      | $h = 2D$         |

Fonte: Autor

Para cada uma das condições da Tabela 3, foram feitos três corpos de prova, resultando em um total de nove amostras para cada condição de altura e tratamento térmico. Os corpos de prova foram identificados de acordo com o tempo de permanência no forno e sua ordem de numeração. A Tabela 4 apresenta a identificação proposta.

**Tabela 4 - Identificação das amostras.**

|                       |                 | Tratamento Térmico |         |         |
|-----------------------|-----------------|--------------------|---------|---------|
|                       |                 | 10min              | 120 min | 360 min |
| Corpo de prova (CP's) | <b>h = D</b>    | 10.1               | 120.1   | 360.1   |
|                       |                 | 10.2               | 120.2   | 360.2   |
|                       |                 | 10.3               | 120.3   | 360.3   |
|                       | <b>h = 1,5D</b> | 10.4               | 120.4   | 360.4   |
|                       |                 | 10.5               | 120.5   | 360.5   |
|                       |                 | 10.6               | 120.6   | 360.6   |
|                       | <b>h = 2D</b>   | 10.7               | 120.7   | 360.7   |
|                       |                 | 10.8               | 120.8   | 360.8   |
|                       |                 | 10.9               | 120.9   | 360.9   |

Fonte: Autor

Após o corte, os corpos de prova foram medidos com auxílio de um paquímetro digital da marca Starrett, para verificar a altura de cada um deles. Nas tabelas 5, 6 e 7, encontram-se as medidas da altura de todos os corpos de prova confeccionados e a média dos valores.

**Tabela 5 - Altura dos corpos de prova com tratamento térmico de 10 min de permanência no forno e resfriamento no ar e a média dos valores encontrados.**

| Corpo de prova   | Altura (mm) | Corpo de prova   | Altura (mm) | Corpo de prova   | Altura (mm) |
|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| 10.1             | 7,98        | 10.4             | 11,93       | 10.7             | 15,90       |
| 10.2             | 7,95        | 10.5             | 11,99       | 10.8             | 15,89       |
| 10.3             | 7,96        | 10.6             | 11,84       | 10.9             | 15,94       |
| Média Aritmética | 7,96        | Média Aritmética | 11,92       | Média Aritmética | 15,91       |
| Desvio Padrão    | ±0,015      | Desvio Padrão    | ±0,075      | Desvio Padrão    | ±0,026      |

Fonte: Autor

**Tabela 6 - Altura dos corpos de prova com tratamento térmico de 120 min de permanência no forno e resfriamento no ar e a média dos valores encontrados.**

| Corpo de prova   | Altura (mm) | Corpo de prova   | Altura (mm) | Corpo de prova   | Altura (mm) |
|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| 120.1            | 7,95        | 120.4            | 11,93       | 120.7            | 15,89       |
| 120.2            | 7,97        | 120.5            | 11,93       | 120.8            | 15,90       |
| 120.3            | 7,98        | 120.6            | 11,95       | 120.9            | 15,93       |
| Média Aritmética | 7,97        | Média Aritmética | 11,94       | Média Aritmética | 15,91       |
| Desvio Padrão    | ±0,015      | Desvio Padrão    | ±0,012      | Desvio Padrão    | ±0,021      |

Fonte: Autor

**Tabela 7 - Altura dos corpos de prova com tratamento térmico de 360 min de permanência no forno e resfriamento no forno e a média dos valores encontrados.**

| Corpo de prova   | Altura (mm) | Corpo de prova   | Altura (mm) | Corpo de prova   | Altura (mm) |
|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| 360.1            | 7,95        | 120.4            | 11,90       | 120.7            | 15,89       |
| 360.2            | 7,95        | 120.5            | 11,91       | 120.8            | 15,90       |
| 360.3            | 7,94        | 120.6            | 11,93       | 120.9            | 15,90       |
| Média Aritmética | 7,95        | Média Aritmética | 11,91       | Média Aritmética | 15,90       |
| Desvio Padrão    | ±0,006      | Desvio Padrão    | ±0,015      | Desvio Padrão    | ±0,006      |

Fonte: Autor

Como mencionado anteriormente, na revisão bibliográfica, seria necessário uma marcação na superfície dos corpos de prova para auxiliar na determinação das deformações axial e circunferencial durante o ensaio de forjamento. A marcação deveria ser suficientemente nítida, deveria perdurar durante todo o ensaio e não poderia comprometer os resultados, isto é, não poderia ser um concentrador de tensões que pudesse induzir a formação de trincas.

Desse modo, decidiu-se que a marcação seria no formato de um círculo preenchido e que a mesma seria feita com marcador permanente de ponta ultrafina, com auxílio de um gabarito Tridente<sup>®</sup>. Importante ressaltar que essa marcação foi desenhada no meio do corpo de prova. Os três diferentes tipos de tamanho de corpo de prova, como exemplos, e suas marcações foram registrados na Figura 24.

**Figura 24: Corpos de prova confeccionados e com marcação superficial.**



Fonte: Autor

#### 4.5. Ensaio de Forjamento em matriz aberta

Com os corpos de prova confeccionados, realizou-se o ensaio de forjamento em matriz aberta, também conhecido como ensaio de compressão. Importante mencionar que não utilizado nenhum tipo de lubrificação durante o teste, uma vez que a presença ou não desse elemento pode variar a maneira como ocorre a deformação, de maneira uniforme ou não. Para tal procedimento foi utilizado uma prensa hidráulica manual, da marca MANLEY, Figura 25.

Figura 25 - Prensa Hidráulica Manual.



(a)

(b)

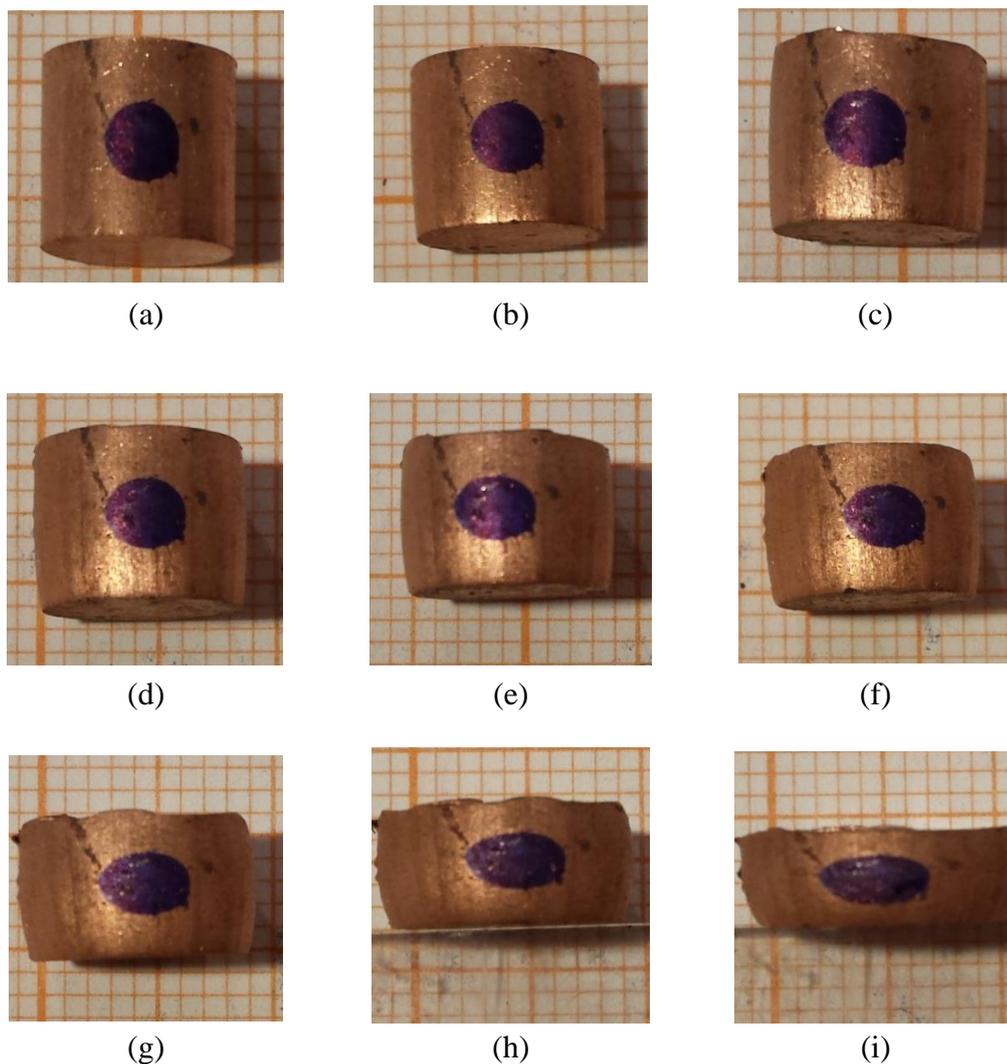
(a) Prensa manual utilizada para forjamento e matriz aberta (b) Detalhe do corpo de prova na matriz de compressão do forjamento.

Fonte: Autor.

Para quantificar e comparar a deformação dos corpos de prova foi necessário registrar, por meio de fotografias, o estado inicial das amostras, assim como o estado das mesmas durante o ensaio. Assim, foi retirada uma foto do corpo de prova no estado inicial em cima de um papel milimetrado, e com a marcação circular à mostra. Após a aplicação de uma força para compressão do material, outra foto foi tirada com o mesmo fundo de papel milimetrado, e assim foi sendo feito a cada etapa de compressão.

Para cada amostra foram tiradas nove fotos, considerando uma do estado inicial e oito de estágios durante o progresso do ensaio, sendo assim resultariam em vinte sete fotos (níveis de deformação) para cada condição de corpo de prova. Como exemplo, na Figura 26 podem-se observar as imagens de um único corpo de prova durante um dos ensaios de forjamento.

**Figura 26: Exemplo de corpo de prova no decorrer do ensaio de forjamento**



(a) Corpo de prova no estado inicial; (b) após o primeiro estágio do ensaio de forjamento; (c) após segundo estágio; (d) após terceira estágio; (e) após quarto estágio; após; (f) quinta estágio; (g) após sexto estágio, (h) após sétimo estágio; (i) após oitavo estágio.

Fonte: Autor.

Essas fotos foram passadas para o computador e, com auxílio do AutoCad 2017<sup>®</sup>, a marcação foi medida a cada etapa do forjamento. A partir dessas medidas, foi realizada uma simples

regra de três, considerando o papel milimetrado como referência, para determinar a medida real, em mm, da marcação. Essas medidas foram devidamente utilizadas nas equações 2 e 3, descritas na seção 3.4.1, a fim de se calcular a deformação axial e circunferencial das amostras.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

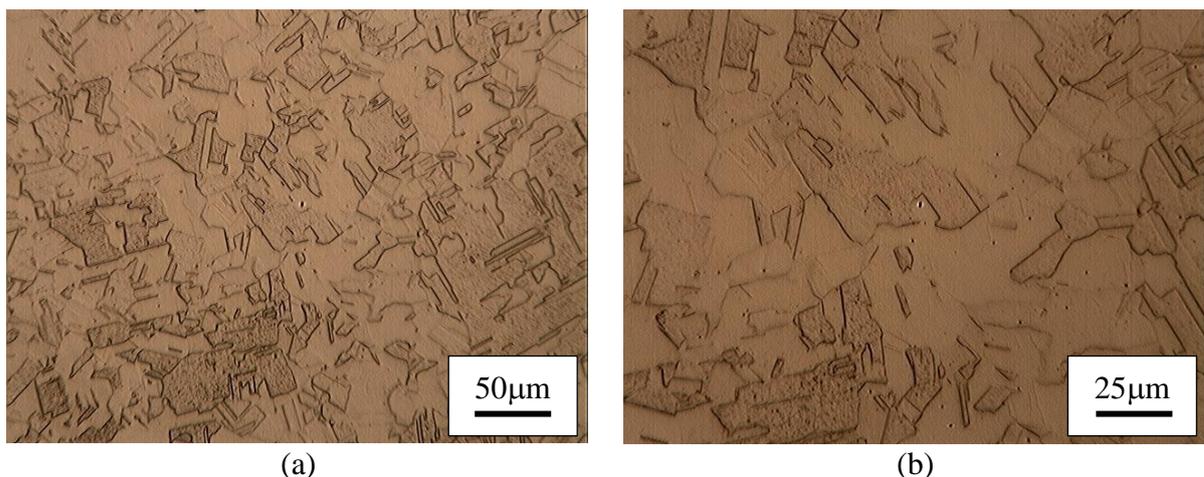
### 5.1. Caracterização Estrutural do Cobre Eletrolítico

O aspecto microestrutural do cobre eletrolítico, após os tratamentos térmicos, os quais consideravam 10 minutos no forno e resfriamento no ar, 60 minutos no forno e resfriamento no ar, 120 minutos no forno e resfriamento no ar, 240 minutos no forno e resfriamento no ar, 240 min no forno e resfriamento no forno e 360 min no forno e resfriamento no forno, podem ser observados nas figuras 27 à 32. Para todas essas figuras, as imagens a) e b) representam a microestrutura em um mesmo ponto, porém com ampliações distintas.

A partir das imagens da microestrutura do cobre, pode-se identificar uma grande quantidade de maclas, com formatos aproximadamente retos e paralelos e com um contraste visual diferente das partes não macladas dos grãos, conforme mencionado na seção 3.1.1.

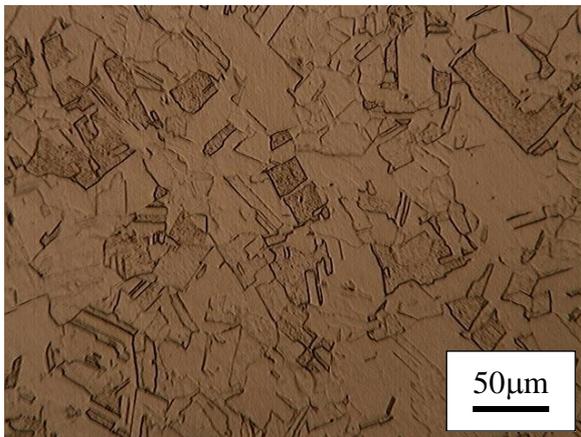
Além disso, também é possível perceber uma variação dos tamanhos de grão, na medida em que a peça passa mais tempo no forno durante o tratamento térmico.

**Figura 27 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 10 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x**

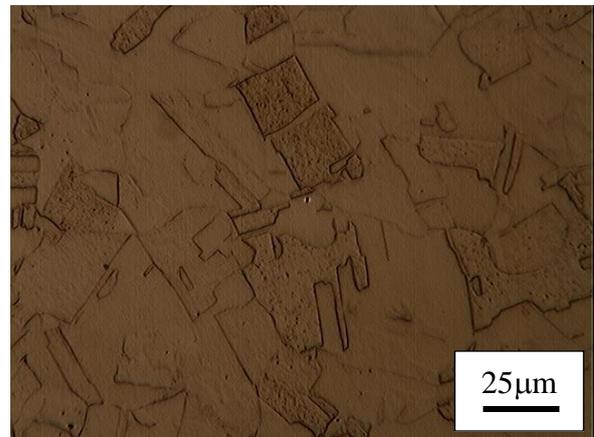


Fonte: Autor

**Figura 28 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 60 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x**



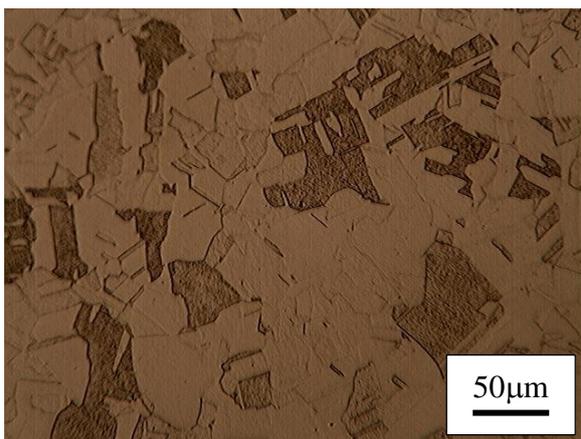
(a)



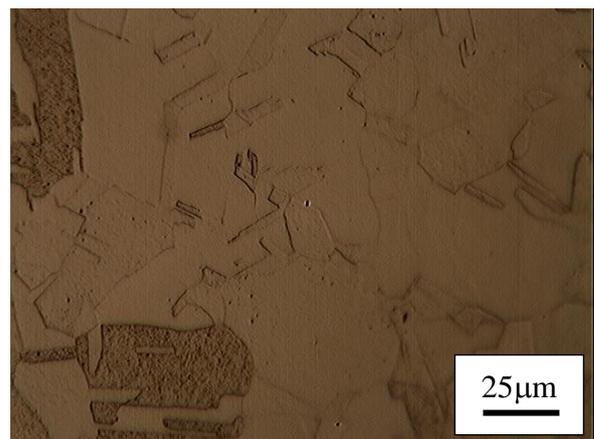
(b)

Fonte: Autor

**Figura 29 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 120 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x**



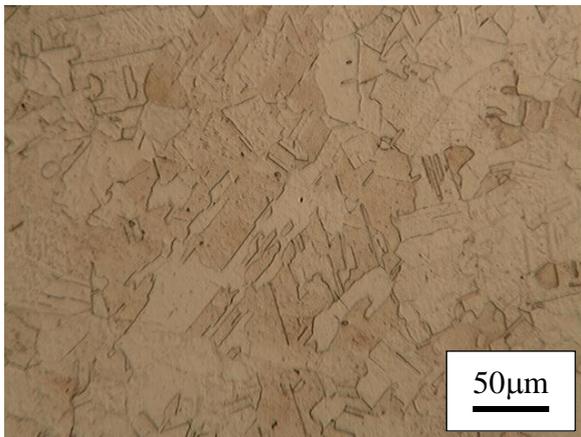
(a)



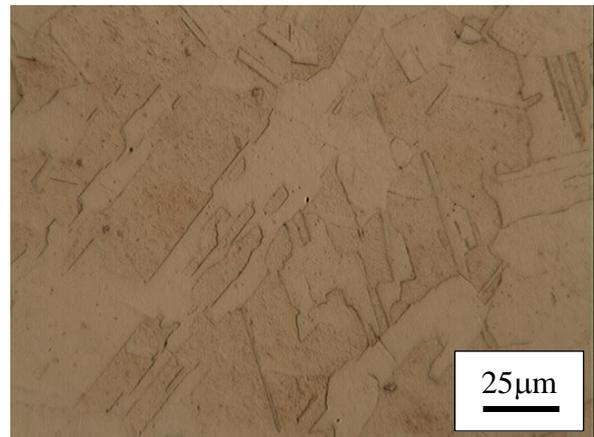
(b)

Fonte: Autor

**Figura 30 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 240 min no forno e com resfriamento no ar a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x**



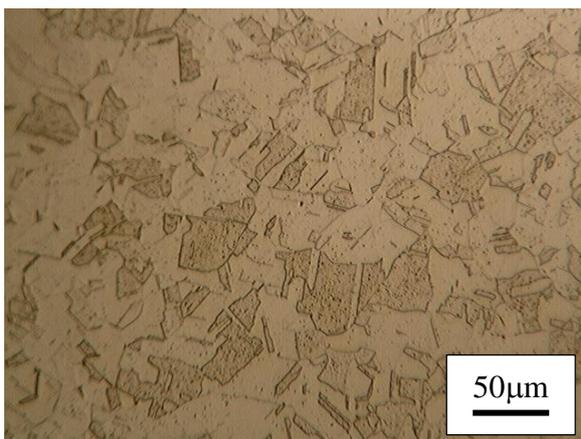
(a)



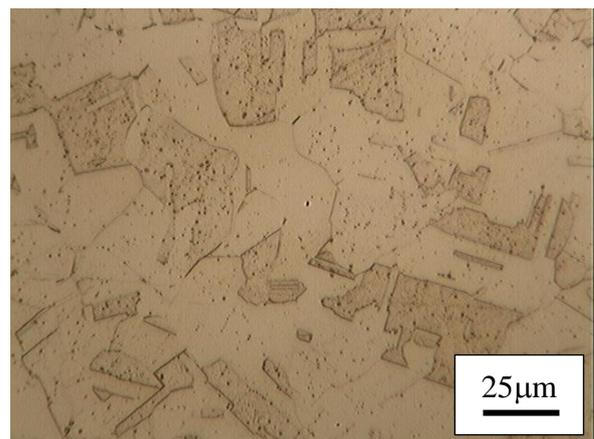
(b)

Fonte: Autor

**Figura 31 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 240 min no forno e com resfriamento no forno a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x**



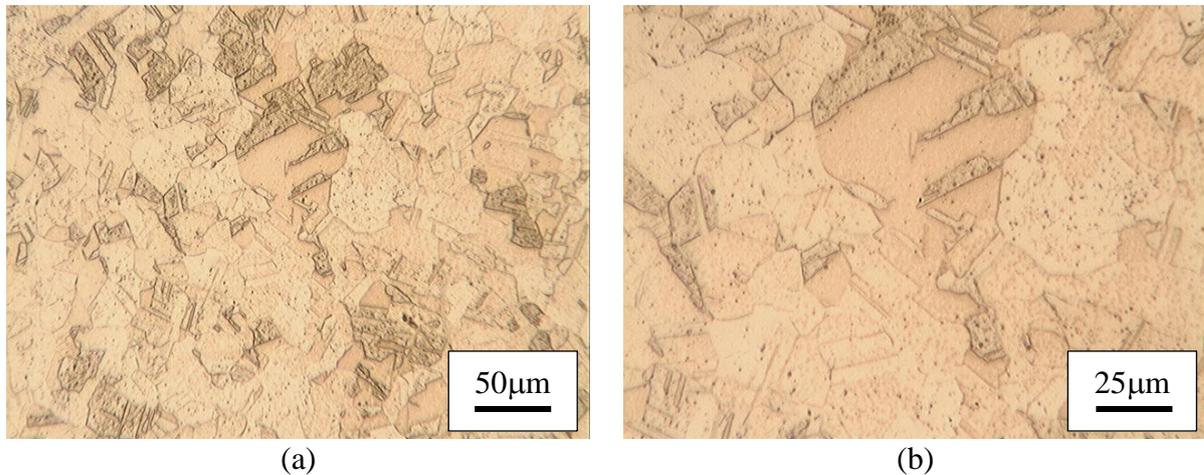
(a)



(b)

Fonte: Autor

**Figura 32 - Microestrutura do Cobre Eletrolítico com tratamento térmico de 360 min no forno e com resfriamento no forno a) com aumento de 200x b) com aumento de 400x**



Fonte: Autor

### 5.1.1. Determinação do tamanho médio dos grãos

A partir da análise das imagens de microestrutura do cobre eletrolítico em diferentes condições de tratamento térmico, foi possível determinar o tamanho médio dos grãos, em cada caso. Os resultados obtidos através do programa *Image-Pro Plus6.0*<sup>®</sup>, o qual calculava a área dos grãos nas imagens, podem ser encontrados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Tamanho médio dos grãos das amostras**

| Tempo no forno (min) | Resfriamento | Área média dos grãos (µm) | Tamanho médio dos grãos (µm) |
|----------------------|--------------|---------------------------|------------------------------|
| 10                   | Ar           | 650,36                    | 25,50                        |
| 60                   | Ar           | 757,53                    | 27,52                        |
| 120                  | Ar           | 1160,85                   | 34,07                        |
| 240                  | Ar           | 1529,86                   | 39,11                        |
| 240                  | Forno        | 1577,00                   | 39,71                        |
| 360                  | Forno        | 1872,33                   | 43,27                        |

Fonte: Autor.

Por meio da Tabela 8 confirmou-se o resultado que já era esperado. Na medida em que se aumentou o tempo de permanência no forno durante o tratamento térmico, houve uma elevação do tamanho de grão. Isso ocorreu porque a permanência das amostras dentro do forno por um tempo maior permitiu o crescimento dos grãos, uma vez que se trata de um

mecanismo difusional, com os grãos maiores consumindo os grãos menores, confirmando o que foi mencionado na seção 3.1.4.

Além disso, percebe-se que o tamanho de grão das amostras de tratamento de 240 minutos no forno, com resfriamento ao ar foi um pouco inferior ao tamanho de grão das amostras com resfriamento lento no forno. Entretanto, esperava-se que o tamanho de grão dessa última amostra fosse bem maior que o daquela, já que o resfriamento lento deveria permitir que os grão continuassem crescendo.

A partir dos valores de tamanho médio de grão presentes na Tabela 8, tomou-se a decisão de prosseguir o trabalho, no que faz referência à parte de ensaio de forjamento, com os tratamentos térmicos de 10 minutos, resfriamento ao ar, de 120 minutos, resfriamento ao ar e de 360 minutos, resfriamento lento no forno. A escolha por esses três tratamentos foi definida pelo fato de a diferença dos tamanhos de grãos entre essas condições ser relativamente grande, de maneira a proporcionar um estudo mais completo.

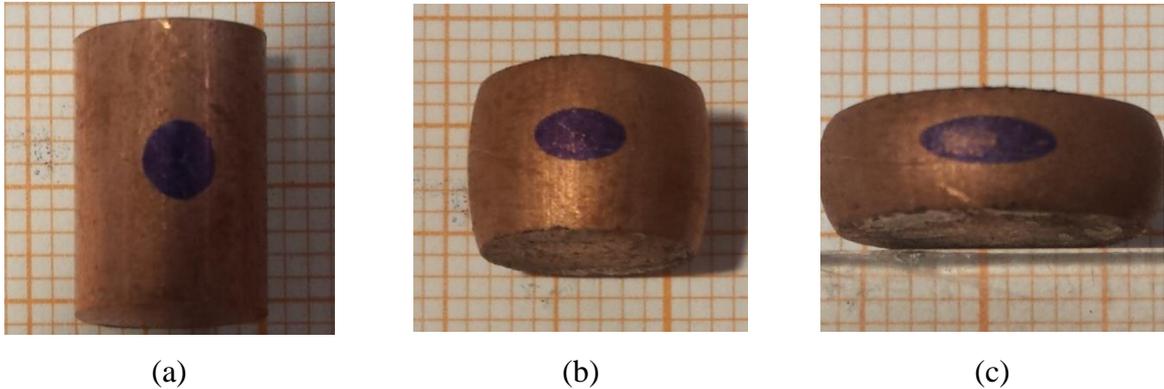
## **5.2. Corpos de prova durante o ensaio de forjamento**

Durante o ensaio de forjamento em matriz aberta, pôde-se observar uma variação no formato da marcação dos corpos de prova, que de circular, tornou-se elíptica ao longo do ensaio de forjamento em matriz aberta, evidenciando a deformação, por compressão, das amostras. Além disso, notou-se que ocorreu o bojamento de todos os corpos de prova, assim como previsto para matrizes com atrito, uma vez que não foi utilizado nenhuma lubrificação. Esse embarilhamento ocorreu, provavelmente, pelo fato de o atrito, entre a matriz e as superfícies do corpo de prova, ter restringido a deformação lateral deste. Esse fato está de acordo com a literatura, conforme explicitado na seção 3.4.1.

Também é importante ressaltar que nenhum dos corpos de prova apresentou a ocorrência de fratura ou trinca superficial até o nível de compressão realizado, sendo que o ensaio foi realizado até uma altura mínima dos corpos de prova. A elevada ductilidade do cobre eletrolítico permitiu que ele tivesse um alto nível de deformação sem que ele fraturasse.

Como exemplo do que pôde ser observado durante os ensaios, apresentam-se as fotos da Figura 33.

**Figura 33 – Corpo de prova no decorrer do ensaio de forjamento em matriz aberta.**



(a) Corpo de prova no antes do forjamento; (b) Corpo de prova no decorrer do ensaio de forjamento; (c) Corpo de prova ao final do ensaio.

Fonte: Autor.

### **5.3. Determinação da deformação axial e circunferencial**

A partir dos valores medidos nas marcações feitas nos corpos de prova, e da conversão desses valores em milímetros, foi possível determinar, através de cálculo, as deformações axial e circunferencial de cada corpo de prova.

As tabelas 9 à 11 apresentam os resultados para as deformações dos corpos de prova que foram tratados termicamente por 10 minutos e resfriaram ao ar, sendo elas se referem às amostras com  $h = D$ ,  $h = 1,5D$  e  $h = 2D$ , nessa respectiva ordem.

Em seguida, são apresentados os valores de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 120 minutos e resfriados ao ar. As tabelas 12, 13 e 14 dizem respeito aos corpos de prova com  $h = D$ ,  $h = 1,5D$  e  $h = 2D$ , respectivamente.

Por fim, as tabelas 15, 16 e 17 contêm os valores de deformações das amostras tratadas termicamente por 360 minutos no forno e que resfriaram lentamente, dentro do forno. As tabelas aparecem na sequência dos corpos de prova com  $h = D$ ,  $h = 1,5D$  e  $h = 2D$ .

Tabela 9 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para os corpos de prova 10.1, 10.2 e 10.3 (h = D com tratamento de 10 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 25,50  $\mu\text{m}$ .

| Corpo de prova 10.1 |                          |        |                                                |                                         |
|---------------------|--------------------------|--------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Número da medição   | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                     | Deformação Axial                        |
|                     | w                        | h      | $\varepsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\varepsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                   | 3,1086                   | 3,3912 | 0,0000                                         | 0,0000                                  |
| 1                   | 3,1788                   | 3,2075 | 0,0223                                         | -0,0557                                 |
| 2                   | 3,4164                   | 2,9677 | 0,0944                                         | -0,1334                                 |
| 3                   | 3,4674                   | 2,9501 | 0,1092                                         | -0,1393                                 |
| 4                   | 3,4819                   | 2,9266 | 0,1134                                         | -0,1474                                 |
| 5                   | 3,5644                   | 2,8816 | 0,1368                                         | -0,1628                                 |
| 6                   | 3,5993                   | 2,8594 | 0,1466                                         | -0,1706                                 |
| 7                   | 3,7100                   | 2,5875 | 0,1769                                         | -0,2705                                 |
| 8                   | 4,2125                   | 2,3626 | 0,3039                                         | -0,3614                                 |
| Corpo de prova 10.2 |                          |        |                                                |                                         |
| Número da medição   | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                     | Deformação Axial                        |
|                     | w                        | h      | $\varepsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\varepsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                   | 3,0863                   | 3,4454 | 0,0000                                         | 0,0000                                  |
| 1                   | 3,2989                   | 3,3003 | 0,0666                                         | -0,0430                                 |
| 2                   | 3,3451                   | 3,1216 | 0,0805                                         | -0,0987                                 |
| 3                   | 3,4057                   | 3,0340 | 0,0985                                         | -0,1272                                 |
| 4                   | 3,4233                   | 2,8965 | 0,1036                                         | -0,1736                                 |
| 5                   | 3,6265                   | 2,8487 | 0,1613                                         | -0,1902                                 |
| 6                   | 3,7327                   | 2,7191 | 0,1901                                         | -0,2367                                 |
| 7                   | 4,0955                   | 2,5597 | 0,2829                                         | -0,2972                                 |
| 8                   | 4,6468                   | 2,3886 | 0,4092                                         | -0,3663                                 |
| Corpo de prova 10.3 |                          |        |                                                |                                         |
| Número da medição   | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                     | Deformação Axial                        |
|                     | w                        | h      | $\varepsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\varepsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                   | 3,0631                   | 3,2841 | 0,0000                                         | 0,0000                                  |
| 1                   | 3,2604                   | 3,1859 | 0,0624                                         | -0,0304                                 |
| 2                   | 3,4836                   | 2,8405 | 0,1286                                         | -0,1451                                 |
| 3                   | 3,5181                   | 2,7674 | 0,1385                                         | -0,1712                                 |
| 4                   | 3,7851                   | 2,5352 | 0,2116                                         | -0,2588                                 |
| 5                   | 3,8822                   | 2,5168 | 0,2370                                         | -0,2661                                 |
| 6                   | 4,0544                   | 2,4876 | 0,2804                                         | -0,2778                                 |
| 7                   | 4,2660                   | 2,3420 | 0,3312                                         | -0,3381                                 |
| 8                   | 5,0655                   | 2,1100 | 0,5030                                         | -0,4424                                 |

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para os corpos de prova 10.4, 10.5 e 10.6 ( h = 1,5D e tratamento de 10 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 25,50 $\mu$ m.

| <b>Corpo de prova 10.4</b> |                                 |        |                                             |                                      |
|----------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Número da medição</b>   | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                            | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                          | 3,1455                          | 3,4267 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                          | 3,2782                          | 3,2745 | 0,0413                                      | -0,0454                              |
| 2                          | 3,2999                          | 3,0739 | 0,0479                                      | -0,1087                              |
| 3                          | 3,4134                          | 3,0126 | 0,0818                                      | -0,1288                              |
| 4                          | 3,4847                          | 2,9336 | 0,1024                                      | -0,1554                              |
| 5                          | 3,4917                          | 2,8342 | 0,1044                                      | -0,1898                              |
| 6                          | 3,5592                          | 2,7749 | 0,1236                                      | -0,2110                              |
| 7                          | 3,8115                          | 2,5526 | 0,1921                                      | -0,2945                              |
| 8                          | 4,2216                          | 2,4942 | 0,2943                                      | -0,3176                              |
| <b>Corpo de prova 10.5</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>   | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                            | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                          | 3,0388                          | 3,2239 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                          | 3,2409                          | 3,0731 | 0,0644                                      | -0,0479                              |
| 2                          | 3,4286                          | 2,9545 | 0,1207                                      | -0,0873                              |
| 3                          | 3,5603                          | 2,7522 | 0,1584                                      | -0,1582                              |
| 4                          | 3,5564                          | 2,6290 | 0,1573                                      | -0,2040                              |
| 5                          | 3,7500                          | 2,5942 | 0,2103                                      | -0,2173                              |
| 6                          | 3,8668                          | 2,4830 | 0,2410                                      | -0,2611                              |
| 7                          | 4,3632                          | 2,1519 | 0,3617                                      | -0,4043                              |
| 8                          | 5,0457                          | 1,9829 | 0,5071                                      | -0,4860                              |
| <b>Corpo de prova 10.6</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>   | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                            | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                          | 3,1028                          | 3,4034 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                          | 3,2708                          | 3,2862 | 0,0527                                      | -0,0351                              |
| 2                          | 3,4116                          | 3,0039 | 0,0949                                      | -0,1249                              |
| 3                          | 3,4829                          | 2,7557 | 0,1156                                      | -0,2111                              |
| 4                          | 3,7011                          | 2,7243 | 0,1763                                      | -0,2226                              |
| 5                          | 3,8943                          | 2,5798 | 0,2272                                      | -0,2771                              |
| 6                          | 4,1830                          | 2,3847 | 0,2987                                      | -0,3557                              |
| 7                          | 4,9559                          | 2,1999 | 0,4683                                      | -0,4364                              |
| 8                          | 5,8068                          | 2,0373 | 0,6267                                      | -0,5131                              |

Fonte: Autor.

**Tabela 11 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 10.7, 10.8 e 10.9 (  $h = 2D$ , com tratamento de 10 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 25,50  $\mu\text{m}$ .**

| <b>Corpo de prova 10.7</b> |                                 |        |                                                |                                         |
|----------------------------|---------------------------------|--------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Número da medição</b>   | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>              | <b>Deformação Axial</b>                 |
|                            | w                               | h      | $\varepsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\varepsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                          | 3,0949                          | 3,4321 | 0,0000                                         | 0,0000                                  |
| 1                          | 3,2694                          | 3,2279 | 0,0548                                         | -0,0614                                 |
| 2                          | 3,3489                          | 3,1180 | 0,0789                                         | -0,0960                                 |
| 3                          | 3,3619                          | 3,0525 | 0,0827                                         | -0,1172                                 |
| 4                          | 3,4660                          | 2,8841 | 0,1133                                         | -0,1740                                 |
| 5                          | 3,5295                          | 2,8144 | 0,1314                                         | -0,1984                                 |
| 6                          | 3,6771                          | 2,7985 | 0,1724                                         | -0,2041                                 |
| 7                          | 4,1591                          | 2,3869 | 0,2955                                         | -0,3632                                 |
| 8                          | 4,4550                          | 2,1507 | 0,3643                                         | -0,4674                                 |
| <b>Corpo de prova 10.8</b> |                                 |        |                                                |                                         |
| <b>Número da medição</b>   | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>              | <b>Deformação Axial</b>                 |
|                            | w                               | h      | $\varepsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\varepsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                          | 3,1682                          | 3,3279 | 0,0000                                         | 0,0000                                  |
| 1                          | 3,2353                          | 3,1902 | 0,0210                                         | -0,0423                                 |
| 2                          | 3,2906                          | 3,1037 | 0,0379                                         | -0,0698                                 |
| 3                          | 3,3463                          | 2,8361 | 0,0547                                         | -0,1599                                 |
| 4                          | 3,5001                          | 2,8115 | 0,0996                                         | -0,1687                                 |
| 5                          | 3,7515                          | 2,7050 | 0,1690                                         | -0,2072                                 |
| 6                          | 3,7760                          | 2,5977 | 0,1755                                         | -0,2477                                 |
| 7                          | 3,8997                          | 2,5571 | 0,2077                                         | -0,2635                                 |
| 8                          | 3,9060                          | 2,3777 | 0,2093                                         | -0,3362                                 |
| <b>Corpo de prova 10.9</b> |                                 |        |                                                |                                         |
| <b>Número da medição</b>   | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>              | <b>Deformação Axial</b>                 |
|                            | w                               | h      | $\varepsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\varepsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                          | 3,1239                          | 3,3296 | 0,0000                                         | 0,0000                                  |
| 1                          | 3,2712                          | 3,2037 | 0,0461                                         | -0,0385                                 |
| 2                          | 3,4229                          | 3,1163 | 0,0914                                         | -0,0662                                 |
| 3                          | 3,4807                          | 2,9122 | 0,1081                                         | -0,1339                                 |
| 4                          | 3,6056                          | 2,7350 | 0,1434                                         | -0,1967                                 |
| 5                          | 3,7112                          | 2,5418 | 0,1723                                         | -0,2700                                 |
| 6                          | 3,8181                          | 2,5313 | 0,2007                                         | -0,2741                                 |
| 7                          | 3,8401                          | 2,4966 | 0,2064                                         | -0,2879                                 |
| 8                          | 3,9946                          | 2,4752 | 0,2459                                         | -0,2965                                 |

Fonte: Autor.

Tabela 12 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 120.1, 120.2 e 120.3 (  $h = D$ , com tratamento de 120 minutos no forno mais resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 34,07  $\mu\text{m}$ .

| Corpo de prova 120.1 |                          |        |                                             |                                      |
|----------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Número da medição    | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                  | Deformação Axial                     |
|                      | w                        | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                    | 3,0474                   | 3,4084 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                    | 3,1176                   | 3,0714 | 0,0228                                      | -0,1041                              |
| 2                    | 3,1639                   | 3,0508 | 0,0375                                      | -0,1108                              |
| 3                    | 3,2473                   | 2,9648 | 0,0636                                      | -0,1394                              |
| 4                    | 3,2725                   | 2,9313 | 0,0713                                      | -0,1508                              |
| 5                    | 3,4267                   | 2,8963 | 0,1173                                      | -0,1628                              |
| 6                    | 3,5143                   | 2,8364 | 0,1426                                      | -0,1837                              |
| 7                    | 3,5428                   | 2,6896 | 0,1506                                      | -0,2368                              |
| 8                    | 3,8226                   | 2,5302 | 0,2267                                      | -0,2979                              |
| Corpo de prova 120.2 |                          |        |                                             |                                      |
| Número da medição    | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                  | Deformação Axial                     |
|                      | w                        | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                    | 3,1888                   | 3,3747 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                    | 3,2379                   | 3,1228 | 0,0153                                      | -0,0776                              |
| 2                    | 3,3149                   | 3,0672 | 0,0388                                      | -0,0955                              |
| 3                    | 3,4897                   | 2,9675 | 0,0902                                      | -0,1286                              |
| 4                    | 3,6644                   | 2,8538 | 0,1390                                      | -0,1677                              |
| 5                    | 3,7243                   | 2,8391 | 0,1552                                      | -0,1728                              |
| 6                    | 3,9386                   | 2,7213 | 0,2112                                      | -0,2152                              |
| 7                    | 4,3730                   | 2,4781 | 0,3158                                      | -0,3088                              |
| 8                    | 4,9336                   | 2,1511 | 0,4364                                      | -0,4503                              |
| Corpo de prova 120.3 |                          |        |                                             |                                      |
| Número da medição    | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                  | Deformação Axial                     |
|                      | w                        | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                    | 3,0825                   | 3,3164 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                    | 3,3007                   | 3,0727 | 0,0684                                      | -0,0763                              |
| 2                    | 3,3747                   | 2,9189 | 0,0906                                      | -0,1277                              |
| 3                    | 3,5083                   | 2,7614 | 0,1294                                      | -0,1831                              |
| 4                    | 3,6952                   | 2,6300 | 0,1813                                      | -0,2319                              |
| 5                    | 3,9653                   | 2,4252 | 0,2518                                      | -0,3129                              |
| 6                    | 3,9842                   | 2,3503 | 0,2566                                      | -0,3443                              |
| 7                    | 4,3356                   | 2,2923 | 0,3411                                      | -0,3693                              |
| 8                    | 5,1316                   | 2,0084 | 0,5097                                      | -0,5015                              |

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 120.4, 120.5 e 120.6 (h= 1,5 D, com tratamento de 120 minutos no forno mais resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 34,07 µm.

| <b>Corpo de prova 120.4</b> |                                 |        |                                       |                                |
|-----------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>     | <b>Deformação Axial</b>        |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \ln (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \ln (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0655                          | 3,3180 | 0,0000                                | 0,0000                         |
| 1                           | 3,1271                          | 3,1665 | 0,0199                                | -0,0467                        |
| 2                           | 3,1738                          | 3,0984 | 0,0347                                | -0,0685                        |
| 3                           | 3,3649                          | 3,0636 | 0,0932                                | -0,0798                        |
| 4                           | 3,4471                          | 3,0320 | 0,1173                                | -0,0901                        |
| 5                           | 3,5020                          | 2,9150 | 0,1331                                | -0,1295                        |
| 6                           | 3,5604                          | 2,8410 | 0,1497                                | -0,1552                        |
| 7                           | 3,7246                          | 2,8157 | 0,1948                                | -0,1641                        |
| 8                           | 3,8224                          | 2,6510 | 0,2207                                | -0,2244                        |
| <b>Corpo de prova 120.5</b> |                                 |        |                                       |                                |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>     | <b>Deformação Axial</b>        |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \ln (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \ln (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0395                          | 3,4139 | 0,0000                                | 0,0000                         |
| 1                           | 3,2154                          | 3,2904 | 0,0563                                | -0,0369                        |
| 2                           | 3,3400                          | 3,1830 | 0,0943                                | -0,0700                        |
| 3                           | 3,4042                          | 3,0125 | 0,1133                                | -0,1251                        |
| 4                           | 3,4909                          | 2,8692 | 0,1385                                | -0,1738                        |
| 5                           | 3,6670                          | 2,6809 | 0,1877                                | -0,2417                        |
| 6                           | 3,9016                          | 2,5223 | 0,2497                                | -0,3027                        |
| 7                           | 4,4162                          | 2,2185 | 0,3736                                | -0,4310                        |
| 8                           | 5,2312                          | 1,9297 | 0,5429                                | -0,5705                        |
| <b>Corpo de prova 120.6</b> |                                 |        |                                       |                                |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>     | <b>Deformação Axial</b>        |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \ln (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \ln (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0823                          | 3,3899 | 0,0000                                | 0,0000                         |
| 1                           | 3,1752                          | 3,2056 | 0,0297                                | -0,0559                        |
| 2                           | 3,2083                          | 3,0814 | 0,0401                                | -0,0954                        |
| 3                           | 3,4187                          | 2,8523 | 0,1036                                | -0,1727                        |
| 4                           | 3,4870                          | 2,8359 | 0,1234                                | -0,1784                        |
| 5                           | 3,8670                          | 2,8094 | 0,2268                                | -0,1878                        |
| 6                           | 3,9022                          | 2,5704 | 0,2359                                | -0,2767                        |
| 7                           | 4,1535                          | 2,4871 | 0,2983                                | -0,3097                        |
| 8                           | 4,7000                          | 2,2485 | 0,4219                                | -0,4105                        |

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 120.7, 120.8 e 120.9 ( h = 2D, com tratamento de 120 minutos no forno e resfriamento ao ar). Tamanho de grão = 34,07  $\mu\text{m}$ .

| <b>Corpo de prova 120.7</b> |                                 |        |                                             |                                      |
|-----------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,1541                          | 3,3519 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,2312                          | 3,1671 | 0,0241                                      | -0,0567                              |
| 2                           | 3,2731                          | 3,1103 | 0,0370                                      | -0,0748                              |
| 3                           | 3,3201                          | 3,0425 | 0,0513                                      | -0,0969                              |
| 4                           | 3,3706                          | 2,7655 | 0,0664                                      | -0,1923                              |
| 5                           | 3,5851                          | 2,6115 | 0,1281                                      | -0,2496                              |
| 6                           | 3,6416                          | 2,5256 | 0,1437                                      | -0,2831                              |
| 7                           | 3,7817                          | 2,4032 | 0,1815                                      | -0,3327                              |
| 8                           | 4,0939                          | 2,3155 | 0,2608                                      | -0,3699                              |
| <b>Corpo de prova 120.8</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0655                          | 3,3061 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,1834                          | 3,0711 | 0,0378                                      | -0,0737                              |
| 2                           | 3,3601                          | 3,0335 | 0,0918                                      | -0,0860                              |
| 3                           | 3,3857                          | 2,8706 | 0,0994                                      | -0,1413                              |
| 4                           | 3,4126                          | 2,7810 | 0,1073                                      | -0,1730                              |
| 5                           | 3,4377                          | 2,7024 | 0,1146                                      | -0,2016                              |
| 6                           | 3,6255                          | 2,6616 | 0,1678                                      | -0,2169                              |
| 7                           | 3,7163                          | 2,6403 | 0,1925                                      | -0,2249                              |
| 8                           | 3,8341                          | 2,6151 | 0,2237                                      | -0,2345                              |
| <b>Corpo de prova 120.9</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0819                          | 3,2657 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,2574                          | 3,1134 | 0,0554                                      | -0,0478                              |
| 2                           | 3,3115                          | 3,0361 | 0,0719                                      | -0,0729                              |
| 3                           | 3,3438                          | 2,9733 | 0,0816                                      | -0,0938                              |
| 4                           | 3,3694                          | 2,8716 | 0,0892                                      | -0,1286                              |
| 5                           | 3,3800                          | 2,7535 | 0,0923                                      | -0,1706                              |
| 6                           | 3,4985                          | 2,6541 | 0,1268                                      | -0,2074                              |
| 7                           | 3,7770                          | 2,6252 | 0,2034                                      | -0,2183                              |
| 8                           | 3,9250                          | 2,5942 | 0,2418                                      | -0,2302                              |

Fonte: Autor.

Tabela 15 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 360.1, 360.2 e 360.3 (  $h = D$ , com tratamento de 360 minutos no forno e resfriamento no forno). Tamanho de grão = 43,27  $\mu\text{m}$ .

| <b>Corpo de prova 360.1</b> |                                 |        |                                             |                                      |
|-----------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0903                          | 3,2424 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,1011                          | 2,9967 | 0,0035                                      | -0,0788                              |
| 2                           | 3,1618                          | 2,8759 | 0,0229                                      | -0,1199                              |
| 3                           | 3,2804                          | 2,8567 | 0,0597                                      | -0,1266                              |
| 4                           | 3,4524                          | 2,7624 | 0,1108                                      | -0,1602                              |
| 5                           | 3,5421                          | 2,7450 | 0,1364                                      | -0,1665                              |
| 6                           | 3,6396                          | 2,6563 | 0,1636                                      | -0,1994                              |
| 7                           | 3,8031                          | 2,6613 | 0,2075                                      | -0,1975                              |
| 8                           | 3,9272                          | 2,5361 | 0,2396                                      | -0,2457                              |
| <b>Corpo de prova 360.2</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0703                          | 3,2700 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,2002                          | 3,1833 | 0,0414                                      | -0,0269                              |
| 2                           | 3,3768                          | 3,1163 | 0,0951                                      | -0,0481                              |
| 3                           | 3,5594                          | 2,7939 | 0,1478                                      | -0,1574                              |
| 4                           | 3,7766                          | 2,6617 | 0,2070                                      | -0,2058                              |
| 5                           | 3,8743                          | 2,6396 | 0,2326                                      | -0,2142                              |
| 6                           | 4,0392                          | 2,4397 | 0,2743                                      | -0,2929                              |
| 7                           | 4,1541                          | 2,3775 | 0,3023                                      | -0,3188                              |
| 8                           | 4,6550                          | 2,2050 | 0,4162                                      | -0,3941                              |
| <b>Corpo de prova 360.3</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,1103                          | 3,3707 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,2356                          | 3,2315 | 0,0395                                      | -0,0422                              |
| 2                           | 3,2926                          | 3,1077 | 0,0569                                      | -0,0812                              |
| 3                           | 3,5449                          | 2,8818 | 0,1308                                      | -0,1567                              |
| 4                           | 3,7992                          | 2,6464 | 0,2000                                      | -0,2419                              |
| 5                           | 3,9119                          | 2,6045 | 0,2293                                      | -0,2579                              |
| 6                           | 3,9579                          | 2,5480 | 0,2410                                      | -0,2798                              |
| 7                           | 4,7400                          | 2,3449 | 0,4213                                      | -0,3629                              |
| 8                           | 5,3745                          | 2,1963 | 0,5469                                      | -0,4283                              |

Fonte: Autor.

Tabela 16 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 360.4, 360.5 e 360.6 (h = 1,5D, com tratamento de 360 minutos no forno e resfriamento no forno). Tamanho de grão = 43,27  $\mu\text{m}$ .

| Corpo de prova 360.4 |                          |        |                                             |                                      |
|----------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Número da medição    | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                  | Deformação Axial                     |
|                      | w                        | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                    | 2,9450                   | 3,3646 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                    | 3,2003                   | 3,1473 | 0,0831                                      | -0,0668                              |
| 2                    | 3,3156                   | 2,9392 | 0,1185                                      | -0,1352                              |
| 3                    | 3,4259                   | 2,8265 | 0,1512                                      | -0,1743                              |
| 4                    | 3,4462                   | 2,6894 | 0,1571                                      | -0,2240                              |
| 5                    | 3,6182                   | 2,6306 | 0,2059                                      | -0,2461                              |
| 6                    | 3,6658                   | 2,5528 | 0,2189                                      | -0,2761                              |
| 7                    | 3,9271                   | 2,5090 | 0,2878                                      | -0,2934                              |
| 8                    | 3,9879                   | 2,4682 | 0,3032                                      | -0,3098                              |
| Corpo de prova 360.5 |                          |        |                                             |                                      |
| Número da medição    | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                  | Deformação Axial                     |
|                      | w                        | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                    | 3,2007                   | 3,3840 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                    | 3,3176                   | 3,1754 | 0,0359                                      | -0,0636                              |
| 2                    | 3,4613                   | 3,0797 | 0,0783                                      | -0,0942                              |
| 3                    | 3,5368                   | 2,8429 | 0,0999                                      | -0,1742                              |
| 4                    | 3,7594                   | 2,7911 | 0,1609                                      | -0,1926                              |
| 5                    | 3,7697                   | 2,7198 | 0,1636                                      | -0,2185                              |
| 6                    | 3,8037                   | 2,6655 | 0,1726                                      | -0,2387                              |
| 7                    | 4,1933                   | 2,6711 | 0,2701                                      | -0,2366                              |
| 8                    | 4,3763                   | 2,5159 | 0,3128                                      | -0,2964                              |
| Corpo de prova 360.6 |                          |        |                                             |                                      |
| Número da medição    | Medição da marcação (mm) |        | Deformação Circunferencial                  | Deformação Axial                     |
|                      | w                        | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                    | 3,1961                   | 3,3097 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                    | 3,2034                   | 3,1317 | 0,0023                                      | -0,0553                              |
| 2                    | 3,3160                   | 3,0031 | 0,0368                                      | -0,0972                              |
| 3                    | 3,4487                   | 2,8515 | 0,0761                                      | -0,1490                              |
| 4                    | 3,5163                   | 2,6809 | 0,0955                                      | -0,2107                              |
| 5                    | 3,7537                   | 2,4945 | 0,1608                                      | -0,2828                              |
| 6                    | 4,3960                   | 2,3611 | 0,3188                                      | -0,3378                              |
| 7                    | 4,7605                   | 2,1855 | 0,3984                                      | -0,4150                              |
| 8                    | 5,6266                   | 1,8695 | 0,5656                                      | -0,5712                              |

Fonte: Autor.

Tabela 17 - Cálculo de deformação circunferencial e axial para corpo de prova 360.7, 360.8 e 360. (h = 2D, com tratamento de 360 minutos no forno e resfriamento no forno). Tamanho de grão = 43,27 µm..

| <b>Corpo de prova 360.7</b> |                                 |        |                                             |                                      |
|-----------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,0400                          | 3,3857 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,1163                          | 3,1825 | 0,0248                                      | -0,0619                              |
| 2                           | 3,3021                          | 3,0048 | 0,0827                                      | -0,1193                              |
| 3                           | 3,3409                          | 2,8881 | 0,0944                                      | -0,1590                              |
| 4                           | 3,4092                          | 2,7136 | 0,1146                                      | -0,2213                              |
| 5                           | 3,6969                          | 2,6119 | 0,1956                                      | -0,2595                              |
| 6                           | 3,7218                          | 2,3846 | 0,2024                                      | -0,3505                              |
| 7                           | 4,1816                          | 2,1358 | 0,3188                                      | -0,4607                              |
| 8                           | 4,5537                          | 2,1278 | 0,4041                                      | -0,4645                              |
| <b>Corpo de prova 360.8</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,1357                          | 3,3323 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,2574                          | 3,2860 | 0,0381                                      | -0,0140                              |
| 2                           | 3,2909                          | 3,1764 | 0,0483                                      | -0,0479                              |
| 3                           | 3,3143                          | 2,9384 | 0,0554                                      | -0,1258                              |
| 4                           | 3,3514                          | 2,8761 | 0,0665                                      | -0,1472                              |
| 5                           | 3,3957                          | 2,7124 | 0,0797                                      | -0,2058                              |
| 6                           | 3,6279                          | 2,6827 | 0,1458                                      | -0,2168                              |
| 7                           | 3,6568                          | 2,4951 | 0,1537                                      | -0,2893                              |
| 8                           | 3,8428                          | 2,4110 | 0,2033                                      | -0,3236                              |
| <b>Corpo de prova 360.9</b> |                                 |        |                                             |                                      |
| <b>Número da medição</b>    | <b>Medição da marcação (mm)</b> |        | <b>Deformação Circunferencial</b>           | <b>Deformação Axial</b>              |
|                             | w                               | h      | $\epsilon_{\theta} = \text{Ln} (W_f / W_0)$ | $\epsilon_z = \text{Ln} (h_f / h_0)$ |
| 0                           | 3,1541                          | 3,3232 | 0,0000                                      | 0,0000                               |
| 1                           | 3,2430                          | 3,1121 | 0,0278                                      | -0,0656                              |
| 2                           | 3,2604                          | 3,0232 | 0,0331                                      | -0,0946                              |
| 3                           | 3,4359                          | 2,8222 | 0,0856                                      | -0,1634                              |
| 4                           | 3,4618                          | 2,7565 | 0,0931                                      | -0,1870                              |
| 5                           | 3,6191                          | 2,5727 | 0,1375                                      | -0,2560                              |
| 6                           | 3,7401                          | 2,4043 | 0,1704                                      | -0,3237                              |
| 7                           | 3,9861                          | 2,2734 | 0,2341                                      | -0,3797                              |
| 8                           | 4,0341                          | 2,2570 | 0,2461                                      | -0,3869                              |

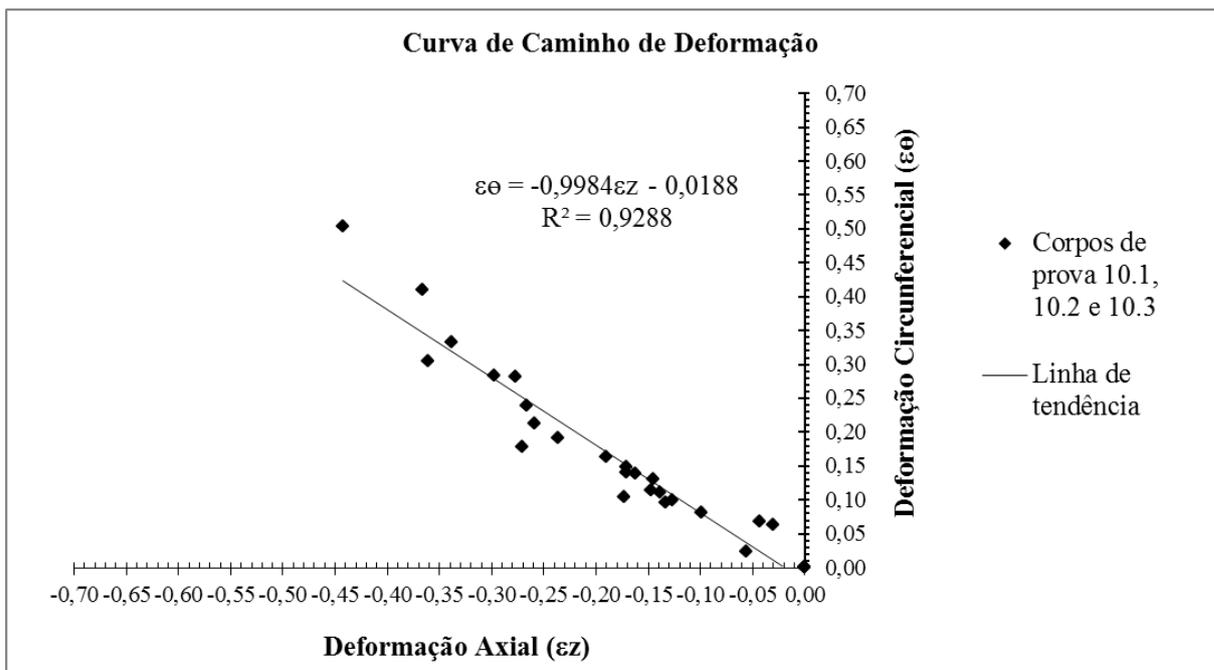
Fonte: Autor.

#### 5.4. Curvas de Caminho de Deformação

Como mencionado anteriormente, os valores definidos de deformação axial e circunferencial, expostos na seção 5.3, podem ser plotados em um gráfico de deformação axial ( $\epsilon_z$ ) x deformação circunferencial ( $\epsilon_\theta$ ), com objetivo de se obter a curva de caminho de deformação.

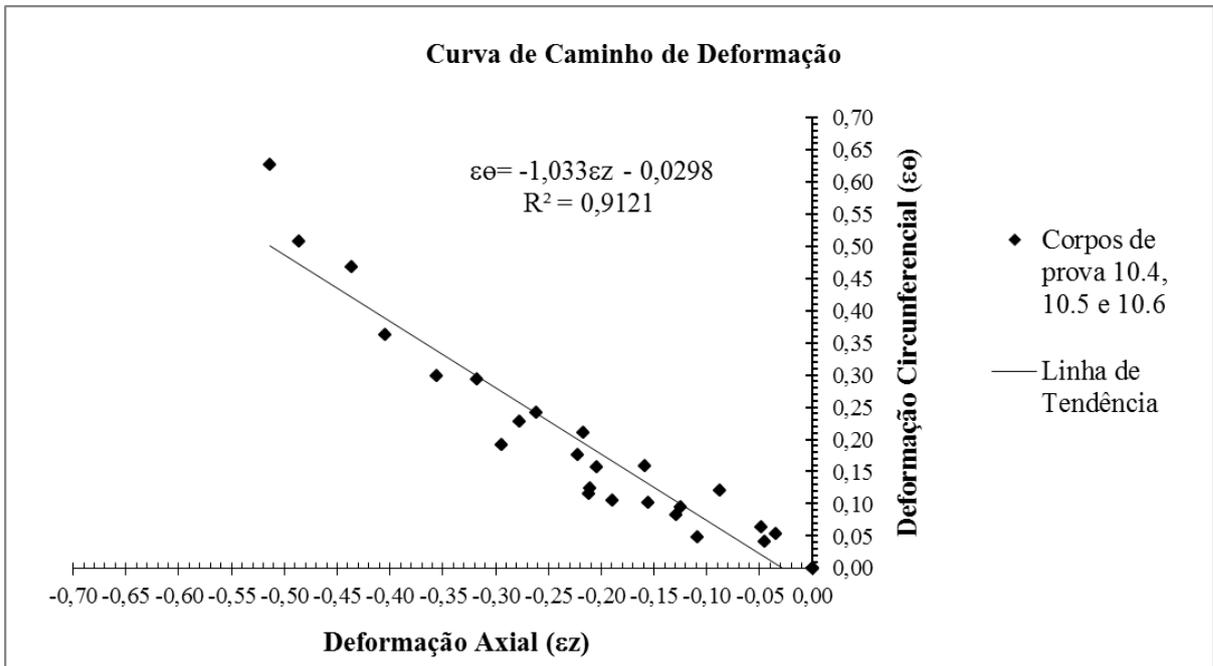
Nos gráficos das figuras 34 à 45 são exibidas as linhas de tendência para cada uma das nove condições analisadas nos ensaios de forjamento. Tal linha representa a curva de caminho de deformação, a qual possibilita a caracterização do modo de deformação do material para cada relação de altura/diâmetro dos corpos de prova e para cada tamanho de grão.

**Figura 34 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 10.1, 10.2 e 10.3, com  $h = D$ , e tratamento de 10 minutos no forno com resfriamento ao ar.**



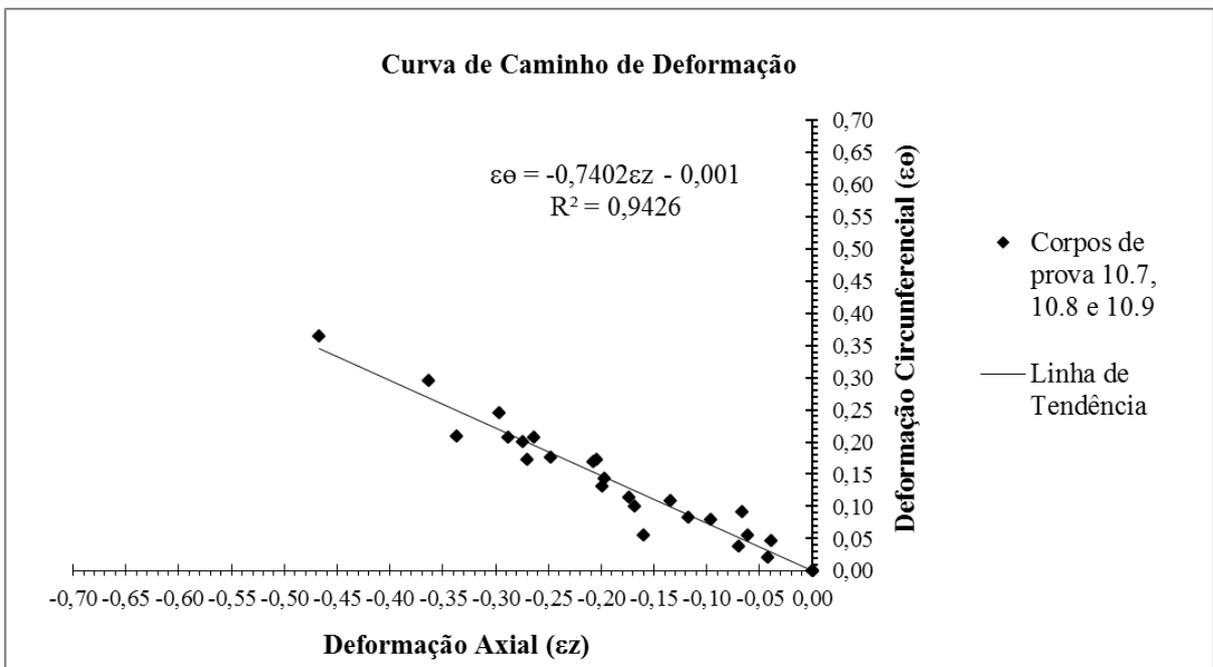
Fonte: Autor.

Figura 35 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 10.4, 10.5 e 10.6, com  $h = 1,5D$ , e tratamento de 10 minutos no forno com resfriamento ao ar.



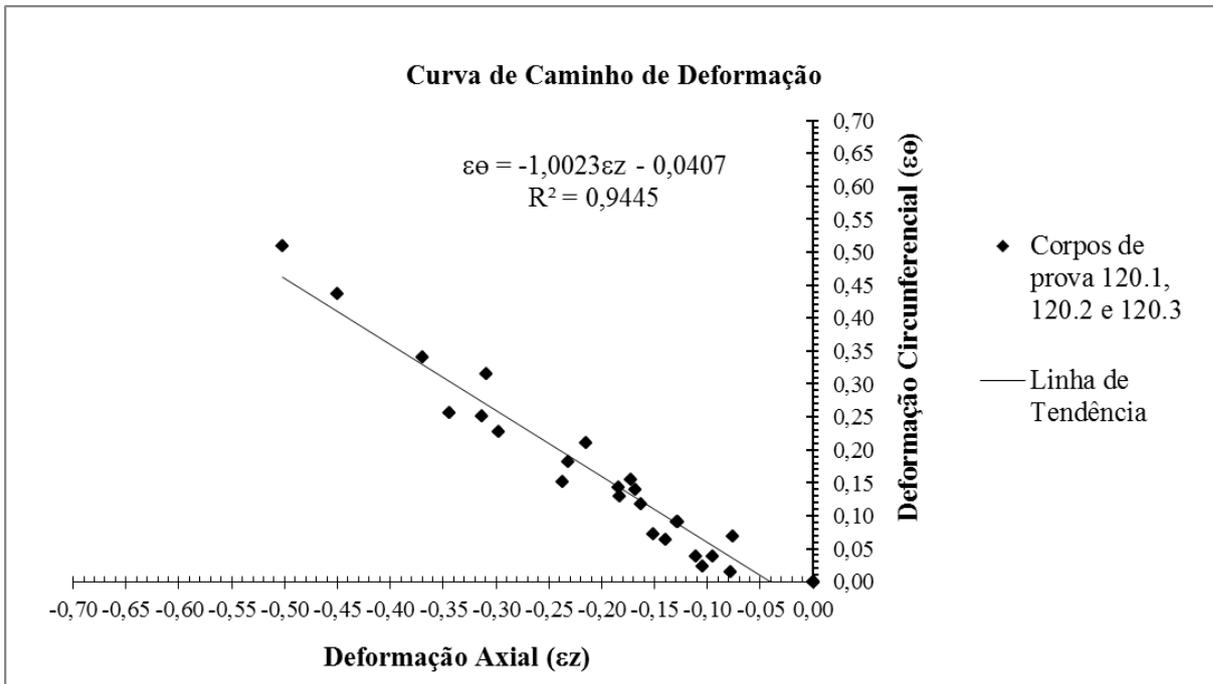
Fonte: Autor.

Figura 36 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 10.7, 10.8 e 10.9, com  $h = 2D$ , e tratamento de 10 minutos no forno com resfriamento ao ar.



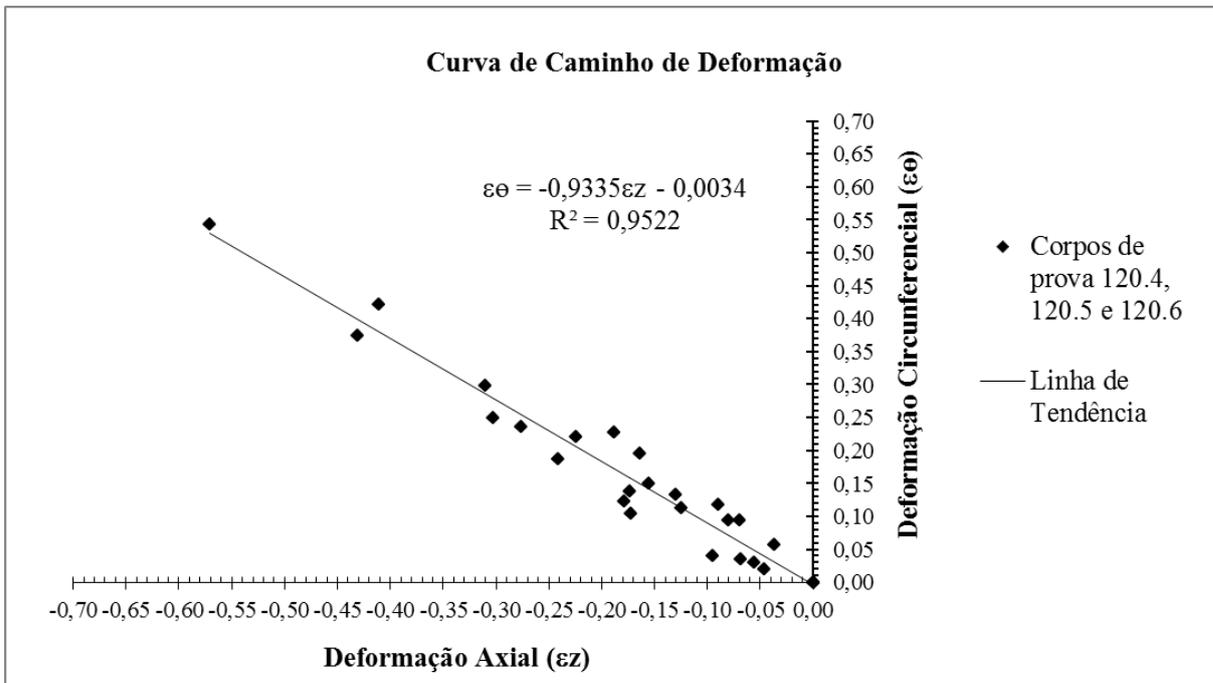
Fonte: Autor.

**Figura 37 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 120.1, 120.2 e 120.3, com  $h = D$ , e tratamento de 120 minutos no forno com resfriamento ao ar.**



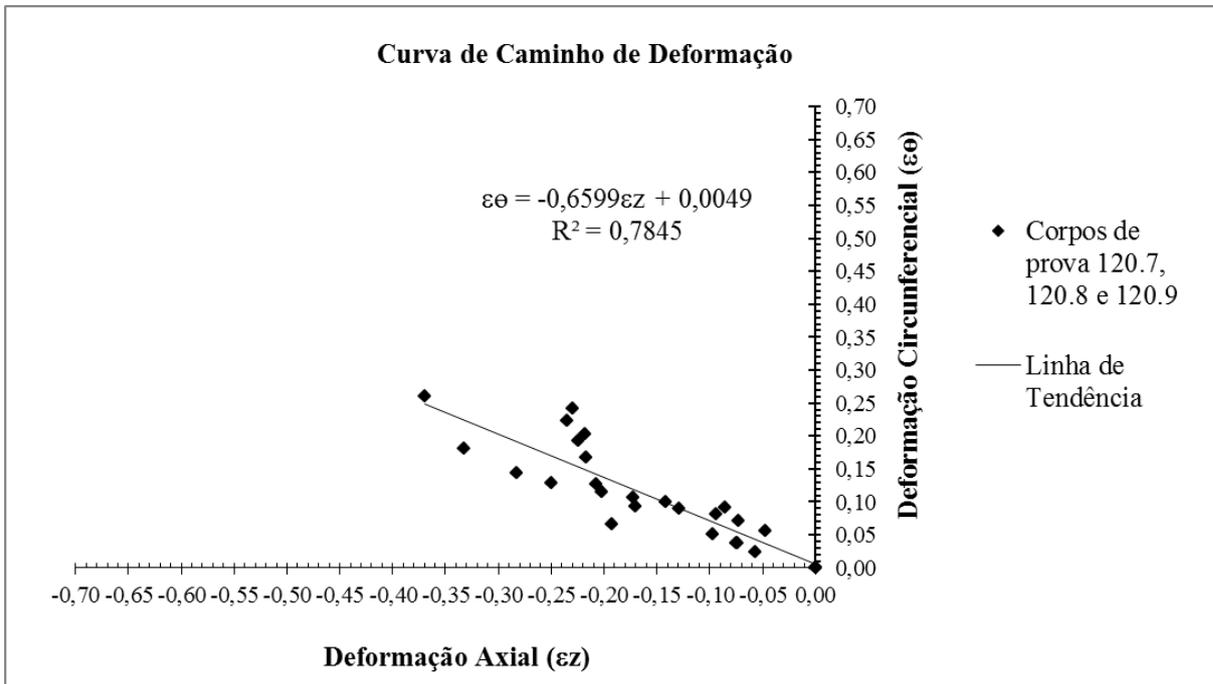
Fonte: Autor

**Figura 38 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 120.4, 120.5 e 120.6, com  $h = 1,5D$ , e tratamento de 120 minutos no forno com resfriamento ao ar.**



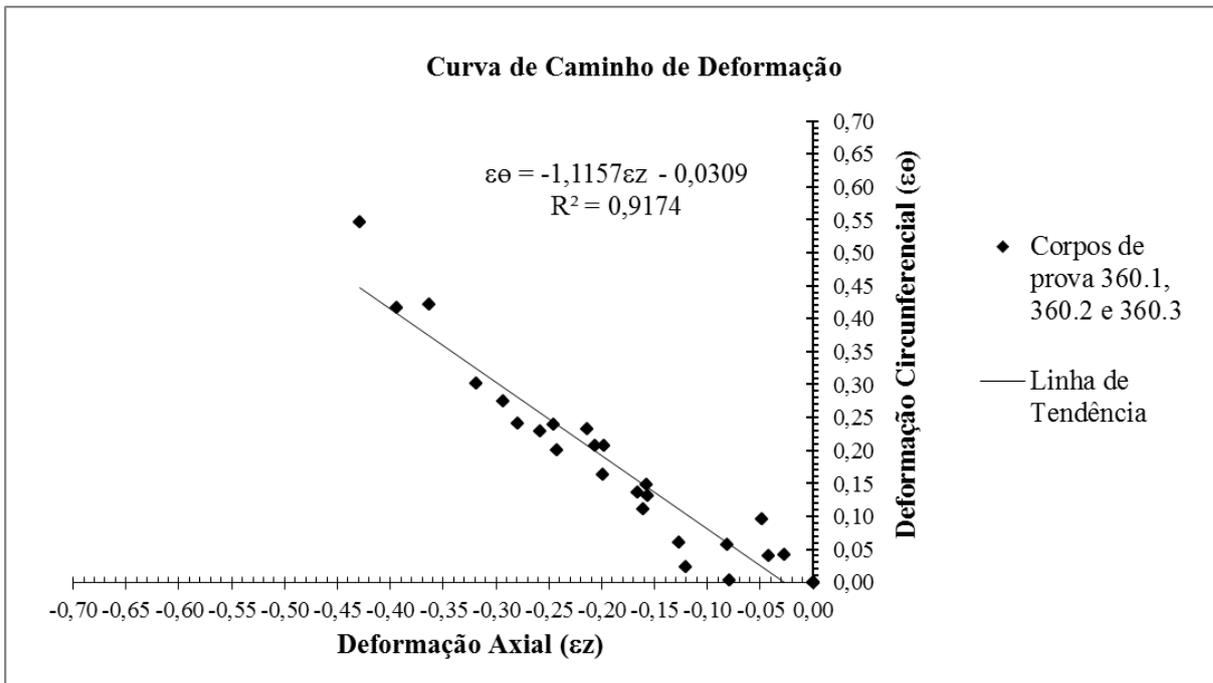
Fonte: Autor.

**Figura 39 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 120.7, 120.8 e 120.9, com  $h = 2D$ , e tratamento de 120 minutos no forno com resfriamento ao ar.**



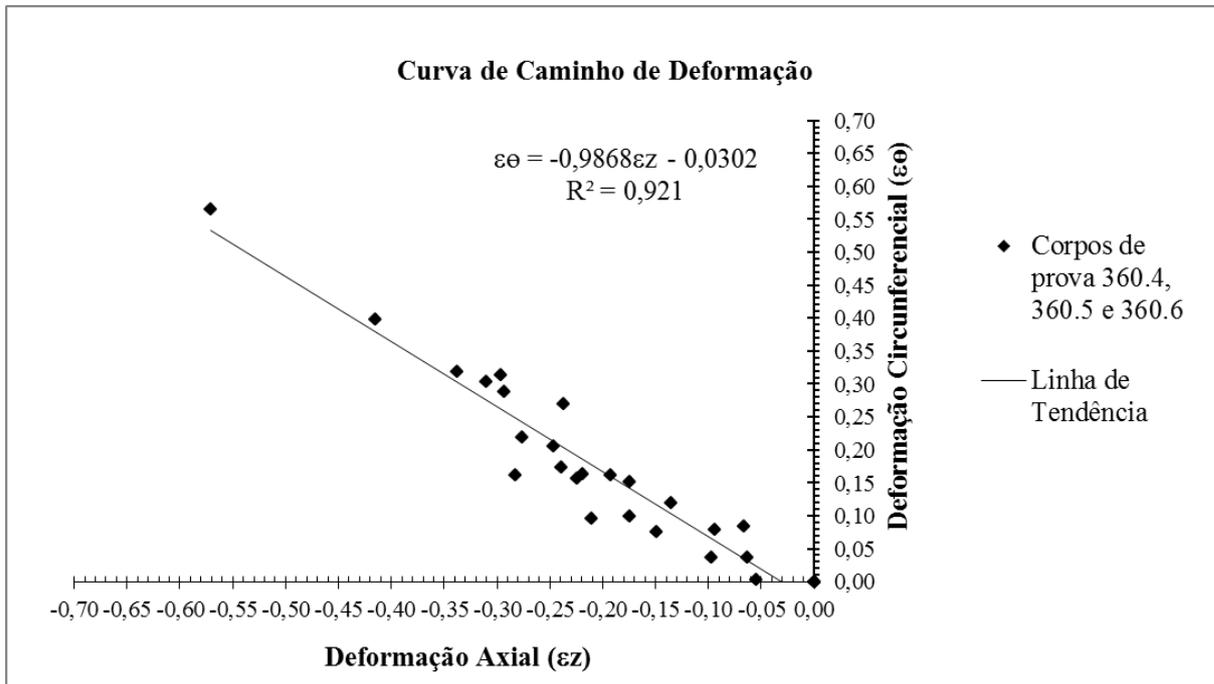
Fonte: Autor.

**Figura 40 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 360.1, 360.2 e 360.3, com  $h = D$ , e tratamento de 360 minutos no forno com resfriamento no forno.**



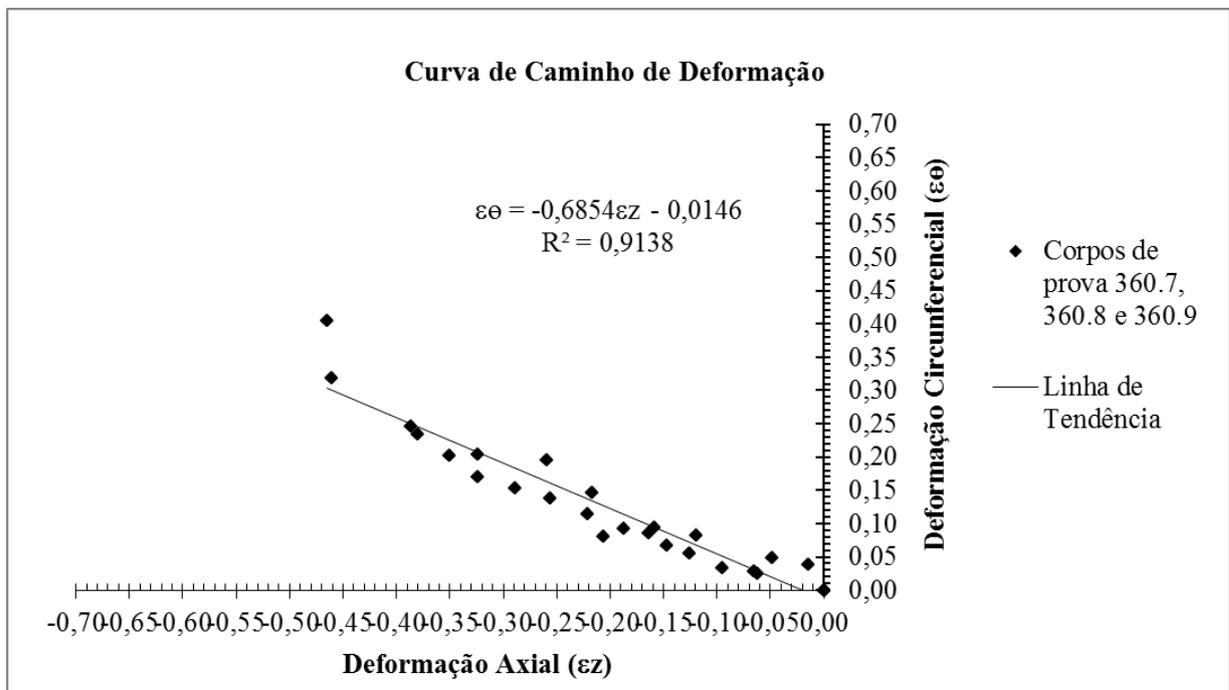
Fonte: Autor.

Figura 41 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 360.4, 360.5 e 360.6, com D = 1,5h, e tratamento de 360 minutos no forno com resfriamento no forno.



Fonte: Autor.

Figura 42 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova 360.7, 360.8 e 360.9, com D = 2h, e tratamento de 360 minutos no forno com resfriamento no forno.

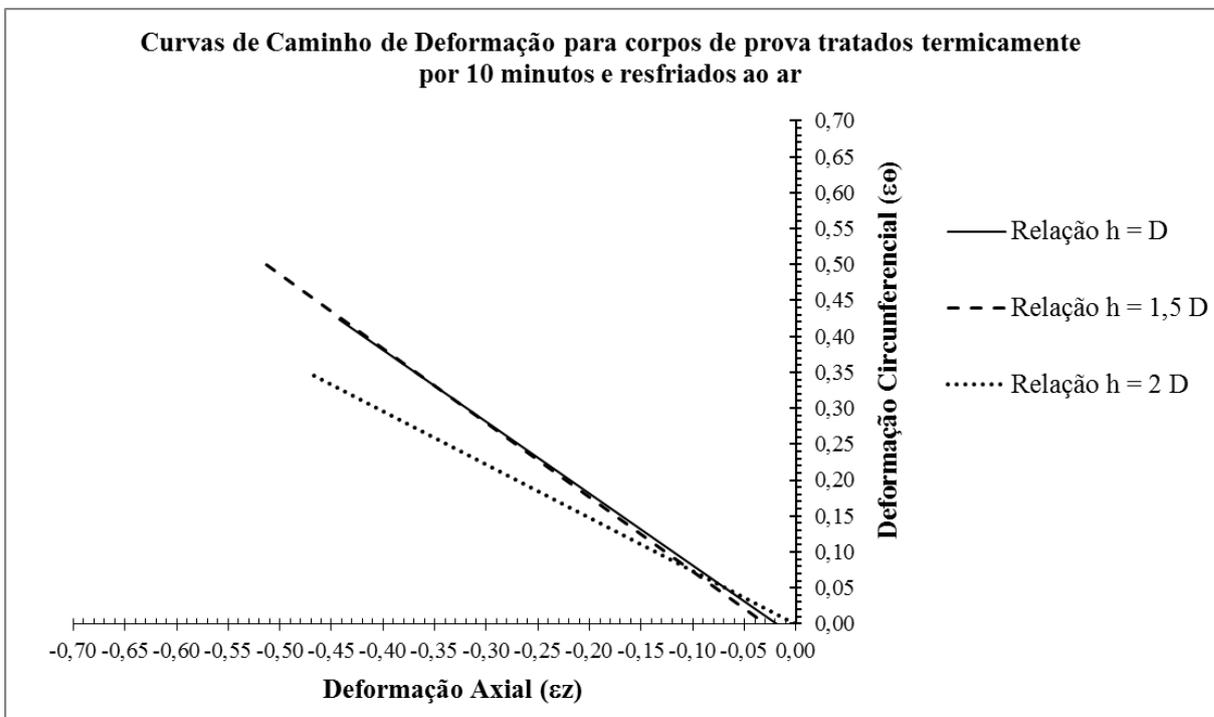


Fonte: Autor.

A partir dos gráficos anteriores, é possível fazer duas análises em relação à deformação das amostras durante o ensaio de forjamento em matriz aberta: uma que envolva o efeito da relação altura/diâmetro dos corpos de prova, no modo de deformação do cobre eletrolítico e outra que relacione o tamanho de grão ao processo de deformação desse material.

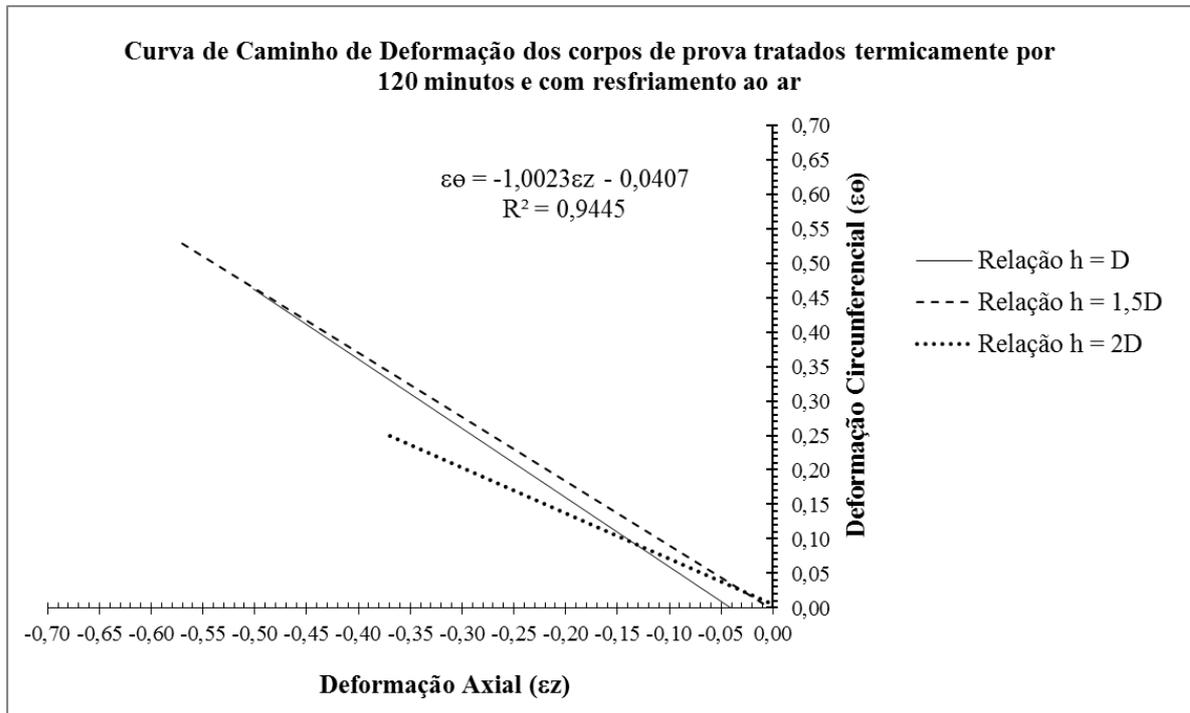
Para facilitar a análise do efeito da relação altura/diâmetro, foram feitos os gráficos, figuras 43 à 45, os quais fixam uma condição de tratamento térmico e comparam os três tipos de corpos de prova:  $h = D$ ,  $h = 1,5D$  e  $h = 2D$ .

**Figura 43 – Curva de caminho de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 10 minutos e resfriados ao ar.**



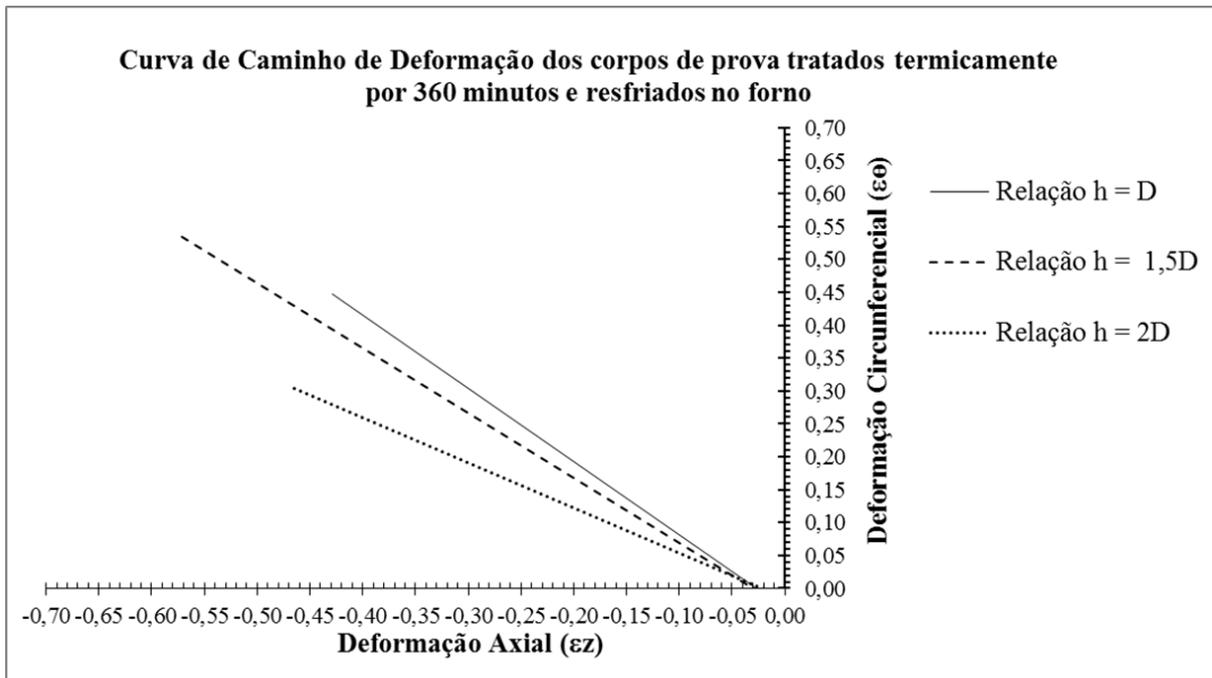
Fonte: Autor.

**Figura 44 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 120 minutos e resfriados ao ar.**



Fonte: Autor.

**Figura 45 - Curva de caminho de deformação para os corpos de prova tratados termicamente por 360 minutos e resfriados no forno.**



Fonte: Autor.

Primeiramente, fixando-se uma mesma condição de tratamento térmico, de 10 minutos no forno, com resfriamento ao ar, consideram-se os caminhos de deformação referentes aos corpos de prova com  $h = D$ ,  $h = 1,5D$  e  $h = 2D$ , mostrados na Figura 43. Em relação ao caminho de deformação para os corpos de prova de  $h = D$ , observa-se, que de acordo com a linha de tendência, as deformações axiais (de compressão) e circunferenciais (de tração) se dão em proporções e valores similares. Dessa forma, pode-se dizer que para uma deformação axial de valor igual a “x”, têm-se um valor correspondente de deformação circunferencial próximo ou até mesmo igual ao valor de “x”. Isso pôde ser observado tanto graficamente, comparando os valores de deformação axial e circunferencial, como também pela inclinação da linha de tendência, a qual apresenta um coeficiente angular (indica o quão a curva está inclinada) próximo do valor um.

Ainda no que diz respeito às amostras tratadas termicamente por 10 minutos, para o caso dos corpos de prova com  $h = 1,5D$ , o mesmo parece ocorrer. A inclinação da linha de tendência permanece com um valor próximo de um, e ao mesmo tempo verifica-se que as deformações axial e circunferencial aparentam ocorrer, novamente, nas mesmas proporções: quando uma aumenta, a outra tende a aumentar proporcionalmente.

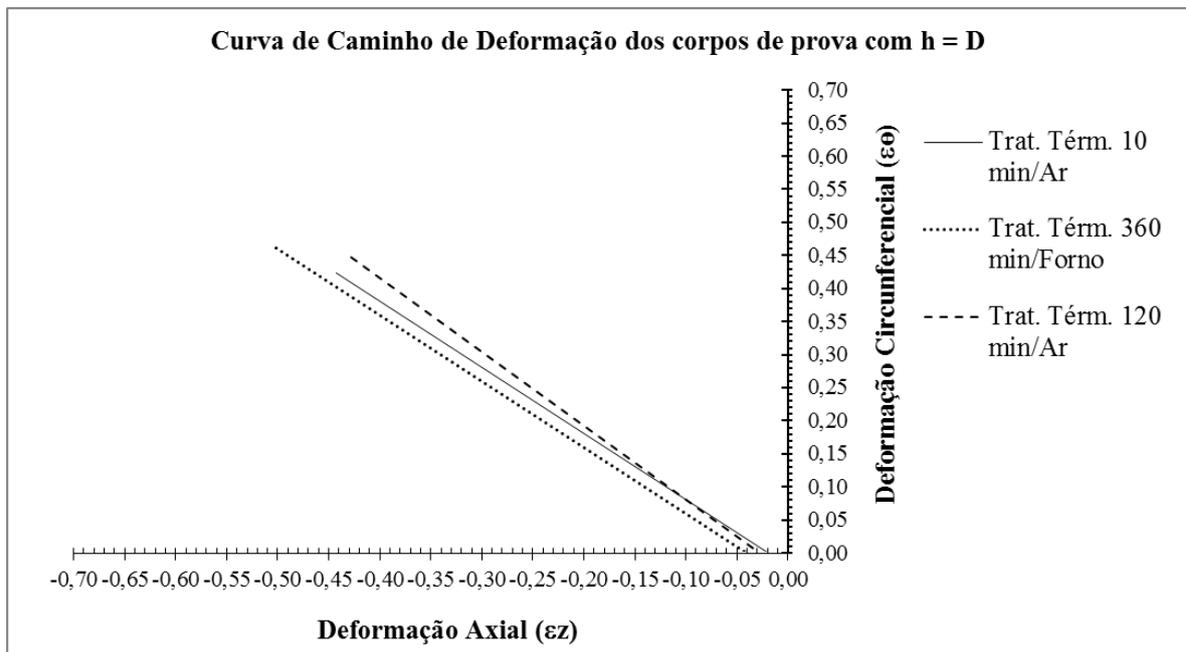
Entretanto, para os corpos de prova que possuíam  $h = 2D$ , não é possível identificar essa relação de igualdade entre as deformações. A linha de tendência desse gráfico apresentou uma redução de sua inclinação. Desse modo, pôde-se concluir que, para essa relação de altura/diâmetro, a deformação axial se dá de uma maneira mais intensa que a deformação circunferencial. Assim, para um dado estágio do ensaio de forjamento, a deformação axial proporcionada seria superior à sua deformação circunferencial correspondente.

Ao se estudar a relação altura/diâmetro para as outras condições de tratamento térmico (120 minutos com resfriamento ao ar e 360 minutos com resfriamento ao forno), a partir das figuras 44 e 45, percebe-se uma repetibilidade daqueles resultados: para  $h = D$  e  $h = 1,5D$ , as deformações se dão de maneira proporcional e a linha de tendência está próxima do valor um, mas para  $h = 2D$  as deformações axiais ocorrem de maneira mais acentuada que as circunferenciais.

A partir das ideias mencionadas anteriormente, chegou-se a conclusão de que, para todas as condições de tratamento térmico estudadas, o aumento da relação altura/diâmetro favorece a deformação axial, de forma que o material tende a se deformar mais significativamente na direção axial do que na circunferencial. Isso indica que o limite de deformação para os corpos de prova com  $h = 2D$  foi menor que para as outras relações altura/diâmetro. Essa base de resultados vai ao encontro com as ideias registradas por Kuhn (1978), segundo o qual o aumento da relação altura/diâmetro faz a curva de caminho de deformação girar no sentido anti-horário, de forma a reduzir a inclinação da mesma, acentuando um maior valor de deformação axial e um menor valor de deformação circunferencial.

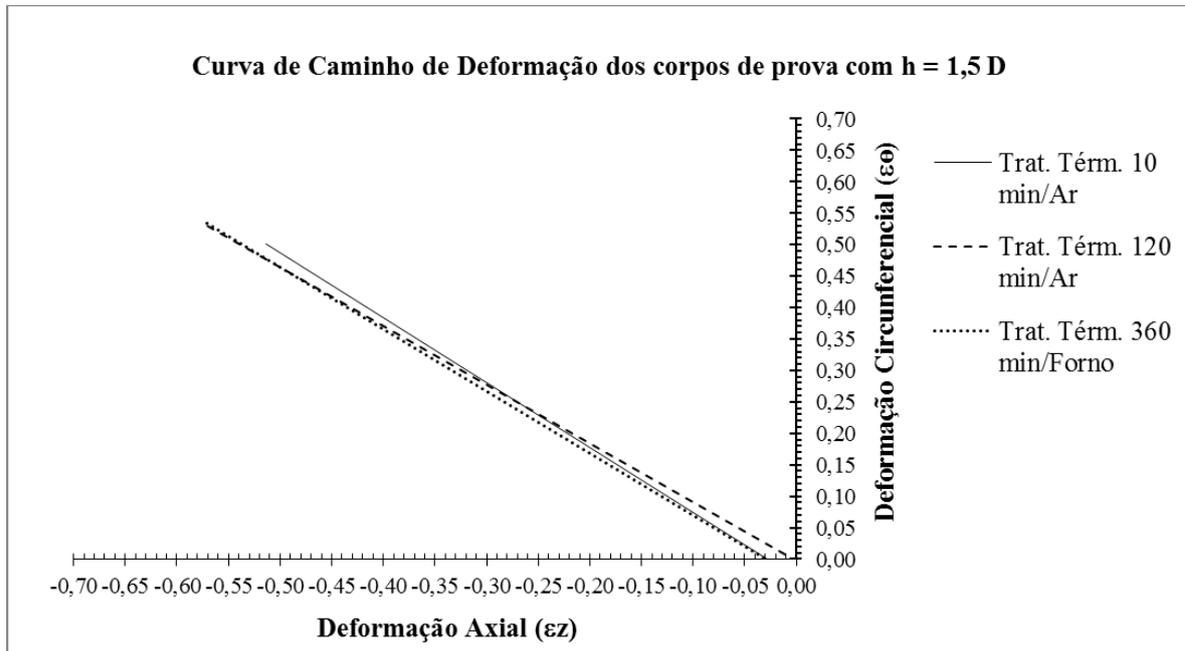
Além de analisar a influência da relação altura/diâmetro na deformação do cobre, também foi feito um estudo das curvas de caminho de deformação relacionado-as ao tamanho de grão das amostras. Os gráficos das figuras 46 à 48 foram plotados para facilitar essa análise.

**Figura 46 – Curva de caminho de deformação dos corpos de prova com a relação de  $h = D$ .**



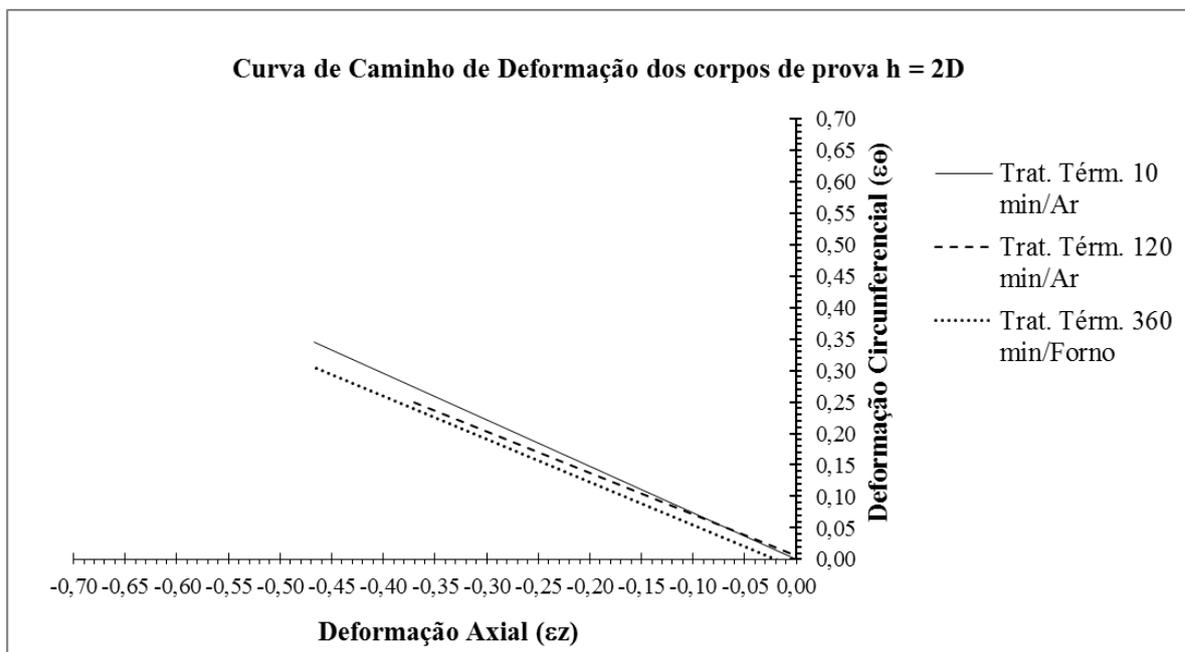
Fonte: Autor.

Figura 47 – Curva de caminho de deformação dos corpos de prova com  $h = 1,5D$ .



Fonte: Autor.

Figura 48 - Curva de caminho de deformação dos corpos de prova com  $h = 2D$ .



Fonte: Autor.

Fixando-se um mesmo tipo de corpo de prova, por exemplo  $h = D$ , percebeu-se que a variação do tamanho de grão, à medida que se aumentava o tempo de tratamento, não provocou variações significativas na inclinação da curva de caminho de deformação. Assim, pôde-se

concluir que o tamanho de grão não provocou variações na proporcionalidade das deformações axial e circunferencial para uma mesma relação de altura/diâmetro.

Para os corpos de prova com relação  $h = 1,5 D$  e  $h = 2D$ , o mesmo ocorreu. Assim, pôde-se concluir que a inclinação de todas as curvas de caminho de deformação, referente a uma mesma relação altura/diâmetro, foi similar, indicando que o tamanho de grão não afetou de maneira significativa a maneira como o material se deforma.

Com base em todos esses resultados comparativos, percebeu-se que o efeito provocado pela variação na proporção dimensional entre altura e o diâmetro, na relação entre as deformações axial e circunferencial, foi maior que o provocado pela mudança no tamanho de grão.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu a determinação das curvas de caminho de deformação, obtidas através dos ensaios de forjamento com corpos de prova de cobre eletrolítico, através das quais pode-se chegar a certas conclusões à respeito do modo como o material se deformava e como isso era influenciado pelo tamanho de grão e pela relação de altura/diâmetro das amostras.

No que diz respeito à relação altura/diâmetro das amostras, concluiu-se que o aumento dessa relação favorece a deformação axial, de forma que essa parece ocorrer de maneira mais pronunciada que a deformação circunferencial correspondente. Desse modo, quanto maior a relação altura/diâmetro, menor será a inclinação da curva de caminho de deformação, ou seja, essa curva tende a caminhar no sentido anti-horário quanto maior for altura em relação ao diâmetro de um corpo de prova cilíndrico.

Já em relação ao tamanho de grãos das amostras, concluiu-se que, mesmo com o aumento do tamanho de grão, a inclinação da curva de caminho de deformação continuou muito similar entre os corpos de prova com diferentes tamanhos de grão, mas com a mesma relação altura/diâmetro.

Portanto, o objetivo do trabalho foi atingido de forma que pode-se concluir que o efeito da relação altura/diâmetro dos corpos de prova, na deformação do cobre, é mais significativo que o efeito provocado pelo tamanho de grão. Enquanto a variação do tamanho de grão não provoca alteração significativa na inclinação da curva de caminho de deformação, a relação altura/diâmetro provoca, de forma que quanto maior essa relação menor a inclinação e mais pronunciada a deformação axial em relação à circunferencial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM (Brasil). **Metalurgia e desenvolvimento: a corrida dos metais no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1989. 107 p.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 594 p.

BARCELOS, S.. **Influência da temperatura e corrente de trabalho, nas características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

CARDOSO, Kelly Araldi. **Forjamento de metais características do processo e maquinário**. Santa Catarina: UFSC. Ilustração: Kelly Cardoso. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAooIAK/forjamento-metais-caracteristicas-processo-maquinario>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horacio. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 260 p.

CETLIN, Paulo Roberto; PERTENCE, Antônio Eustáquio de Melo. Similarity of ductility between model and real materials. **Journal Of Materials Processing Technology**. v 103, p. 434-438. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com.ez107.periodicos.capes.gov.br/S0924013600005136/1-s2.0-S0924013600005136-main.pdf?\\_tid=75f4afd8-363a-11e6-9f73-00000aab0f6b&acdnat=1466353719\\_a618a3694\\_062c1ef01fb146f597f297b](http://ac.els-cdn.com.ez107.periodicos.capes.gov.br/S0924013600005136/1-s2.0-S0924013600005136-main.pdf?_tid=75f4afd8-363a-11e6-9f73-00000aab0f6b&acdnat=1466353719_a618a3694_062c1ef01fb146f597f297b)>. Acesso em: 19 de jun. 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 1986. 388 p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p.

COUTINHO, Telmo Azevedo. **Metalografia de não-ferrosos: Análise e prática**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1980. 128 p.

DIETER, George E.. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1989. 653 p.

ERTURK, T.; KUHN, H. A.; LEE, P. W.. A fracture criterion for cold forming. **Journal of engineering materials and technology**. v.73 p 213 - 218, 1973.

KUHN, H. A.. **Workability Testing and Analysis for Bulk Forming Process** In: Symposium on Formability Topics – Metallic Materials. ASTM STP 647, 1977, Toronto: American Society for Testing and Materials, 1978, p. 206 - 219.

LEBEN, Hugo. **Tecnología fundamental para el trabajo de los metales**. Barcelona: Gustavo Gilli, 1967. 144p.

LEIS, Marcos Paulo Pereira. **Estabilidade microestrutural do cobre trefilado em baixas temperaturas**. 2003. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <[http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/dissert\\_marcospereira Leis.pdf](http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/dissert_marcospereira%20Leis.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 16.

MACHADO, Izabel. Tratamento Térmico e de superfície. In: MACHADO, Izabel. **Introdução à manufatura Mecânica**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: < [http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/Tratamento\\_termico\\_e\\_superficial.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/Tratamento_termico_e_superficial.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2014.

MALISHEV, A.; NIKOLAIEV, G.; SHUVALOV, Y.. **Tecnologia dos Metais**. São Paulo: Mestre Jou, 1970. 444 p.

NOGUEIRA, Rejane Aparecida. **Estudo da Segregação e da Homogeneização na Liga Cu-50%Ni: Influência da Deformação e da Recristalização na Homogeneização**. 1995. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutor em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1995. Disponível em < [http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Rejane%20Aparecida%20Nogueira\\_D.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Rejane%20Aparecida%20Nogueira_D.pdf)>. Acesso em: 16 de jun. 2016.

SHACKELFORD, James F.. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

SILVA, Abel Garcia Gonçalves da. **Cadeia Produtiva do Cobre**. 2011. 89 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Ufmg, Belo Horizonte, 2011.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 664 p.

SILVA, Iris Bento da et al. **Conformação Plástica dos Metais**. 6 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 254 p.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais metálicos**. 5.ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1999. 239p.