Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2017

Gonçalo Fernando Sousa Cristino

Trefilagem de fio elétrodo para soldadura

Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2017

Gonçalo Fernando Sousa Cristino

Trefilagem de fio elétrodo para soldadura

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Dr. António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Luís Marques, Engenheiro Responsável da empresa Motomig soldadura do Grupo Motofil.

Apoio financeiro dos projetos UID/EMS/00481/2013-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER-022083

O júri

Presidente

Prof. Doutor Ricardo José Alves de Sousa
Professor Auxiliar c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (arguente)

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos

Ao Professor António Bastos pelo acompanhamento e disponibilidade ao longo do período de estágio.

Ao Engenheiro Luís Marques, pelo acompanhamento, apoio prestado e pela oportunidade de realização do estágio.

A toda a equipa do laboratório da Motomig, Engª Ana Ferreira, Engº João Teixeira e ao Telmo Alves. pelo acolhimento, integração, apoio e transmissão de experiência e conhecimentos.

Aos restantes colaboradores da Motomig pela constante boa disposição e amizade criada.

À Universidade de Aveiro e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo acompanhamento ao longo de todo o trajeto académico.

Aos meus amigos e colegas pela amizade, companheirismo, motivação e apoio. Um apreço especial à Maria que acompanhou bem de perto esta fase e me apoiou em todos os momentos.

E por último, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus pais, ao meu irmão e restantes familiares pelo incondicional apoio, carinho, motivação, educação, esforço e pela oportunidade concedida de ser mestre.

Palavras-chave Trefilagem de fio; fio elétrodo; fieira; diamante

Resumo

Na procura contínua de atender às exigências de um mercado cada vez mais competitivo, as empresas procuram diminuir as suas perdas ao máximo, reduzindo os custos de produção e aumentando a sua eficiência. Neste seguimento, a empresa Motomig soldadura propôs o estudo dos fenómenos ocorrentes no seu processo de fabrico e a idealização de pontos de melhoria. O estudo utilizou bibliografia documental, formulação de teorias e elaboração de testes na linha de produção e no laboratório, de onde se retiraram as conclusões para a viabilidade das suas implementações. As novas implementações, passaram pelo uso de fieiras de maior resistência ao desgaste, aumento da quantidade de material produzido, através de um ligeiro aumento no diâmetro final da última fieira e um aumento do número de passos, de forma a reduzir a variação de temperatura entre os passos. No final do período de estágio, o principal objetivo que motivou aquando me propus, o acompanhamento, participação e a vivência do dia a dia numa instalação fabril, foi cumprido, tendo representado o meu primeiro contacto com o mundo da indústria.

Keywords Wire drawing; wire electrode; Die; PCD

Abstract In the continuous aim to meet the demands of an increasingly competitive market, companies are looking to minimize their losses as much as possible, reducing production costs and improving their efficiency. In this sequence, the company "Motomig soldadura" proposed the study of the phenomena occurring in its manufacturing process and the idealization of improvement points. The study, used theories' formulation and elaboration of tests in the production line and in the laboratory from which the conclusions for the viability of its implementations were withdrawn. The new implementations, passed through the use of dies with greater resistance to wear, increase in the amount of material produced, through a slight increase in the diameter of the final die and an increment in the number of passes in order to reduce the temperature's oscillation between the passes. At the end of the internship period, the main objective that motivated me when I joined was accomplished, that was participating and living day-to-day in a factory, being that my first contact with the industry world.

Conteúdo

I Enquadramento **1**

1 Introdução **3**
1.1 Contextualização do trabalho 4
1.2 Estrutura do documento 4

2 A empresa Motomig **5**
2.1 Introdução 5
2.2 Processo produtivo da Motomig 6

3 Revisão do Estado da Arte **15**
3.1 Definição 15
3.2 Trefiladoras 15
3.2.1 Trefiladora a seco 15
3.2.2 Trefiladora a banho 16
3.3 Ferramenta - fieira 16
3.3.1 Ângulo de trabalho 19
3.3.2 Fator delta 20
3.4 Volume constante 20
3.5 Forças e energia na trefilagem 21
3.5.1 Cálculo da força de trefilagem 22
3.5.2 Aplicação de uma contra-força 23
3.5.3 A deformação redundante 23
3.5.4 Efeito da fricção 23
3.5.5 Efeito da temperatura 24
3.6 Lubrificante 24
3.7 Testes para regularizar o processo 24
3.7.1 Medição da quantidade de lubrificante aderido ao fio 25
3.7.2 Medição de temperatura 25
3.7.3 *Cast e Helix* 25
3.7.4 Testes de torção 26
3.7.5 Medição das concentrações das tinas 27
3.7.6 Medição da espessura da camada de cobre 28
3.8 Defeitos/quebras 28
3.8.1 Ruturas centrais 28
3.8.2 Fratura por inclusão de partícula dura 29
3.8.3 Quebra inclinada 29
3.8.4 Quebra por esforço 30

3.8.5 Quebra interna 30

4 Planeamento das atividades **31**
4.1 Calenderização das tarefas 31
4.1.1 Análise das fieiras 31
4.1.2 Utilização de uma fieira de maior resistência ao desgaste 31
4.1.3 Aumentar o diâmetro de saída da fieira 32
4.1.4 Aumentar o número de passos 32

II Testes em novas implementações **35**

5 Ensaios Experimentais **37**
5.1 Testes com fieiras de núcleo de diamante 37
5.1.1 Enquadramento 37
5.1.2 Conclusões 41
5.2 Testes de fieiras de Ø 1,18 mm 41
5.2.1 Enquadramento 41
5.2.2 Registo de resultados 42
5.2.3 Conclusões 44
5.3 Testes com o novo jogo de fieiras na trefiladora a seco e na a banho 44
5.3.1 Enquadramento 44
5.3.2 Teste na trefiladora a seco 45
5.3.3 Teste na trefiladora a banho 50
5.3.4 Conclusões 56

III Conclusões e trabalhos futuros **57**

6 Conclusões **59**

7 Trabalhos futuros **61**

IV Anexos **65**

A Fotos às amostras realizadas pelas fieiras testadas no capítulo 5.2 **67**

B Fotos às amostras realizadas pelas fieiras testadas no capítulo 5.3 **91**

Lista de Tabelas

2.1 Composição química da matéria-prima (obtido de certificados do fornecedor *Arcelormittal*) 7

4.1 Valores do diâmetro do fio 32

5.1 Registo das condições dos banhos da linha 1 37
5.2 Registo das condições dos banhos da linha 2 38
5.3 Registo das condições dos banhos da linha 3 38
5.4 Registo da produção 39
5.5 Medição da espessura da camada de cobre 39
5.6 Registo da análise às fieiras após produção indicada na tabela 5.4 40
5.7 Análise de custos de fieiras com núcleo em metal duro e em PCD 40
5.8 Produção perdida e custo com a mão de obra 41
5.9 Identificação da amostra 42
5.10 Registo das conclusões da observação à lupa 43
5.11 Registo da produção realizada por amostra e medição do diâmetro e espessura de cobre 43
5.12 Quantidades parciais de produção 44
5.13 Registo da produção 45
5.14 Caraterísticas do jogo de fieiras utilizado 46
5.15 Evolução das fieiras da trefiladora a seco 46
5.16 Observações ao microscópio ótico 47
5.17 Registo de lubrificante aderido ao fio 48
5.18 Registo das temperaturas nos cabrestantes 49
5.19 Registo de algumas variáveis relevantes aquando da medição das temperaturas nos cabrestantes 50
5.20 Registo das condições dos banhos 50
5.21 Registo da produção 51
5.22 Observações das fieiras após produção indicada na tabela 5.21 51
5.23 Caraterísticas do jogo de fieiras utilizado 54
5.24 Produção por fieira 55

Lista de Figuras

2.1 Esquema do sistema produtivo 6
2.2 Rolo fio-máquina 7
2.3 Colocação do fio-máquina 8
2.4 União dos rolos através de soldadura por resistência topo-a-topo 8
2.5 Roletes para quebrar a calamina 9
2.6 Calamina 9
2.7 Fieira de pressão 10
2.8 Foto ilustrativa de um cabrestante 10
2.9 Altura do enrolamento necessário 11
2.10 Esquema de uma fieira típica 11
2.11 Polias da trefiladora a banho 12
2.12 Exemplo de bandas de *Lüders* 13
2.13 Carretel 13
2.14 Ilustração dos tambores 14

3.1 Exemplo de uma trefiladora a seco 15
3.2 Esquema de atuação dos motores na trefilagem a seco 16
3.3 Pormenor do tanque da trefiladora a banho 16
3.4 Esquema de uma fieira 17
3.5 Célula de uma estrutura cristalina de diamante 19
3.6 Força de trefilagem em função do ângulo de trabalho 20
3.7 Diagrama de forças 21
3.8 Ilustração do trabalho homogéneo, trabalho de fricção e redundante 22
3.9 Componentes que realizam trabalho durante a trefilagem em função do ângulo de trabalho [2] 22
3.10 Medição de *cast* 26
3.11 Exemplo de fio com *helix* elevado 26
3.12 Exemplo de uma "torcida" 27
3.13 Esquema do funcionamento do equipamento de fluorescência de raios-x . . 27
3.14 Esquema do processo de formação das ruturas centrais 28
3.15 Exemplo de defeito de oco interior 29
3.16 Exemplo de quebra inclinada 29
3.17 Exemplo de quebra por esforço 30
3.18 Exemplo de quebra do tipo ponta de lápis 30

5.1 Ilustração da variação de temperatura 45

5.2 Comparação de uma fieira em bom estado com uma com um túnel de lubrificação . . . 47
5.3 Túnel de lubrificante retirado da fieira da figura 5.2b . . . 48
5.4 Ilustração gráfica da tabela 5.18 . . . 49
5.5 Esquema de enfiamento do fio antigo . . . 52
5.6 Esquema de enfiamento do fio durante o novo teste . . . 53
5.7 Amostra A.2.1. . . . 54
5.8 Amostra A.2.3. - Encontra-se escuro . . . 54
5.9 Amostra A.2.6. - falta de cobre . . . 55
5.10 Amostra A.2.10. - riscado-Não conforme . . . 56

A.1 Amostra F.1.1 . . . 67
A.2 Amostra F.1.3 . . . 67
A.3 Amostra F.1.3 . . . 68
A.4 Amostra F.1.3 . . . 68
A.5 Amostra F.1.4 . . . 68
A.6 Amostra F.1.4 . . . 69
A.7 Amostra F.1.4 . . . 69
A.8 Amostra F.1.4 . . . 69
A.9 Amostra F.1.4 . . . 69
A.10 Amostra F.2.1 . . . 70
A.11 Amostra F.2.1 . . . 70
A.12 Amostra F.2.1 . . . 70
A.13 Amostra F.2.1 . . . 71
A.14 Amostra F.2.1 . . . 71
A.15 Amostra F.2.1 . . . 71
A.16 Amostra F.2.1 . . . 72
A.17 Amostra F.5.1 . . . 72
A.18 Amostra F.5.1 . . . 72
A.19 Amostra F.5.1 . . . 73
A.20 Amostra F.5.1 . . . 73
A.21 Amostra F.5.1 . . . 73
A.22 Amostra F.5.1 . . . 74
A.23 Amostra F.5.1 . . . 74
A.24 Amostra F.3.1 . . . 74
A.25 Amostra F.3.1 . . . 75
A.26 Amostra F.3.1 . . . 75
A.27 Amostra F.3.1 . . . 75
A.28 Amostra F.3.1 . . . 76
A.29 Amostra F.3.1 . . . 76
A.30 Amostra F.3.2 . . . 76
A.31 Amostra F.3.2 . . . 77
A.32 Amostra F.3.2 . . . 77
A.33 Amostra F.3.2 . . . 77
A.34 Amostra F.3.2 . . . 78
A.35 Amostra F.3.2 . . . 78
A.36 Amostra F.3.2 . . . 78

A.37 Amostra F.3.3 . . . 79
A.38 Amostra F.3.3 . . . 79
A.39 Amostra F.3.3 . . . 79
A.40 Amostra F.3.3 . . . 80
A.41 Amostra F.3.3 . . . 80
A.42 Amostra F.3.3 . . . 80
A.43 Amostra F.5.2 . . . 81
A.44 Amostra F.5.2 . . . 81
A.45 Amostra F.5.2 . . . 81
A.46 Amostra F.5.2 . . . 82
A.47 Amostra F.3.4 . . . 82
A.48 Amostra F.3.4 . . . 82
A.49 Amostra F.3.4 . . . 83
A.50 Amostra F.3.4 . . . 83
A.51 Amostra F.3.4 . . . 83
A.52 Amostra F.5.3 . . . 84
A.53 Amostra F.5.3 . . . 84
A.54 Amostra F.5.3 . . . 84
A.55 Amostra F.5.3 . . . 85
A.56 Amostra F.5.3 . . . 85
A.57 Amostra F.5.3 . . . 85
A.58 Amostra F.5.4 . . . 86
A.59 Amostra F.5.4 . . . 86
A.60 Amostra F.5.4 . . . 86
A.61 Amostra F.5.4 . . . 87
A.62 Amostra F.4.1 . . . 87
A.63 Amostra F.4.1 . . . 87
A.64 Amostra F.4.1 . . . 88
A.65 Amostra F.4.1 . . . 88
A.66 Amostra F.4.1 . . . 88
A.67 Amostra F.5.4 . . . 89
A.68 Amostra F.4.2 . . . 89

B.1 Amostra A.2.1 . . . 91
B.2 Amostra A.2.1 . . . 91
B.3 Amostra A.2.1 . . . 92
B.4 Amostra A.2.2 . . . 92
B.5 Amostra A.2.2 . . . 92
B.6 Amostra A.2.2 . . . 93
B.7 Amostra A.2.2 . . . 93
B.8 Amostra A.2.3 . . . 93
B.9 Amostra A.2.3 . . . 94
B.10 Amostra A.2.3 . . . 94
B.11 Amostra A.2.3 . . . 94
B.12 Amostra A.2.4 . . . 95
B.13 Amostra A.2.4 . . . 95
B.14 Amostra A.2.4 . . . 95

B.15 Amostra A.2.4 . . . 96
B.16 Amostra A.2.4 . . . 96
B.17 Amostra A.2.4 . . . 96
B.18 Amostra A.2.4 . . . 96
B.19 Amostra A.2.5 . . . 97
B.20 Amostra A.2.5 . . . 97
B.21 Amostra A.2.5 . . . 97
B.22 Amostra A.2.5 . . . 98
B.23 Amostra A.2.6 . . . 98
B.24 Amostra A.2.6 . . . 98
B.25 Amostra A.2.6 . . . 99
B.26 Amostra A.2.6 . . . 99
B.27 Amostra A.2.6 . . . 99
B.28 Amostra A.2.6 . . . 100
B.29 Amostra A.2.7 . . . 100
B.30 Amostra A.2.7 . . . 100
B.31 Amostra A.2.7 . . . 101
B.32 Amostra A.2.7 . . . 101
B.33 Amostra A.2.7 . . . 101
B.34 Amostra A.2.7 . . . 102
B.35 Amostra A.2.8 . . . 102
B.36 Amostra A.2.8 . . . 102
B.37 Amostra A.2.8 . . . 103
B.38 Amostra A.2.8 . . . 103
B.39 Amostra A.2.8 . . . 103
B.40 Amostra A.2.9 . . . 104
B.41 Amostra A.2.9 . . . 104
B.42 Amostra A.2.9 . . . 104
B.43 Amostra A.2.9 . . . 105
B.44 Amostra A.2.10 . . . 105
B.45 Amostra A.2.10 . . . 105
B.46 Amostra A.2.10 . . . 106
B.47 Amostra A.2.10 . . . 106
B.48 Amostra A.2.10 . . . 106
B.49 Amostra A.2.11 . . . 106
B.50 Amostra A.2.11 . . . 107
B.51 Amostra A.2.11 . . . 107
B.52 Amostra A.2.11 . . . 108
B.53 Amostra A.2.11 . . . 108
B.54 Amostra A.2.11 . . . 109
B.55 Amostra A.2.12 . . . 109
B.56 Amostra A.2.12 . . . 109
B.57 Amostra A.2.12 . . . 110
B.58 Amostra A.2.12 . . . 110
B.59 Amostra A.2.12 . . . 110
B.60 Amostra A.2.12 . . . 111
B.61 Amostra A.2.12 . . . 111

B.62 Amostra A.2.13 111
B.63 Amostra A.2.13 112
B.64 Amostra A.2.13 112
B.65 Amostra A.2.13 112
B.66 Amostra A.2.14 113
B.67 Amostra A.2.14 113
B.68 Amostra A.2.14 113
B.69 Amostra A.2.14 114
B.70 Amostra A.2.15 114
B.71 Amostra A.2.15 114
B.72 Amostra A.2.15 115
B.73 Amostra A.2.15 115
B.74 Amostra A.2.15 115
B.75 Amostra A.2.15 116
B.76 Amostra A.2.15 116

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, a maior parte do fio metálico existente passou pelo processo de trefilagem. No dia-a-dia, são utilizados produtos trefilados nas mais diversas situações, tais como, parafusos, pregos, clipes para papel, cordas para instrumentos musicais, de entre outros. Na indústria da construção civil, estes estão presentes na fabricação de barras e arames lisos ou farpados, enquanto na indústria elétrica, podemos encontrá-los na produção de cabos e fios elétricos existentes nas bobinas dos transformadores e motores. Até na área da medicina se utilizam produtos trefilados, nomeadamente em implantes onde a exigência no rigor das suas propriedades e precisão dimensional é muito elevada. A obtenção destes produtos requer o conhecimento prévio, não apenas das características do produto que se deseja fabricar, mas também das características do processo de trefilagem, das cargas a que está sujeito, das ferramentas a serem utilizadas e das características do material a ser processado.

O processo de trefilagem consiste em tracionar um material por meio de uma matriz com dimensões conhecidas e controladas, denominada de fieira [1]. Esta é dividida em trefilagem a frio e quente, dependendo se durante o processo são atingidas, ou não, as temperaturas de cristalização do material.

O processo de trefilagem é caracterizado por ser um trabalho com vários passos em que, cada um corresponde a uma redução ao qual o material será submetido, até que no último passo, o diâmetro desejado seja alcançado [2].

A trefilagem a quente tem como vantagens a redução da deformação dos grãos e das tensões residuais, isto caso depois o arrefecimento seja uniforme, pois, caso contrário, as tensões residuais agravar-se-ão. É utilizado para a trefilagem de materiais pouco maleáveis a frio, reduzindo assim a força de trefilagem necessária, quando comparada com a trefilagem a frio.

Apesar da trefilagem a frio não ter custos de produção relacionados com a manutenção do processo a altas temperaturas como a trefilagem a quente, esta acaba por ser mais dispendiosa, uma vez que, necessita de maiores forças de trefilagem e de um maior número de passos.

Uma caraterística dos produtos trefilados a frio, é uma menor rugosidade da superfície, sendo mais fácil cumprir situações em que as tolerâncias são mais apertadas.

Durante o processo de trefilagem, as propriedades mecânicas do material irão alterar-se, devido à deformação plástica imposta com a inerente diminuição do alongamento. O material sofrerá encruamento, levando ao aumento da tensão limite elástico [3]. O fio trefilado, deve cumprir vários requisitos, tais como: tolerâncias dimensionais, boa

rugosidade superficial e boas propriedades mecânicas (dureza, resistência à tração e à dobragem, entre outras) [5].

Alguns dos parâmetros que mais influenciam as propriedades finais do fio são: a velocidade de trefilagem, o coeficiente de atrito (entre o fio e a fieira) e as propriedades mecânicas do material de entrada (fio-máquina).

Devido ao constante aumento da procura, existe uma maior necessidade de incremento da produção, levando à necessidade de tornar o processo cada vez mais eficiente. Para isso, a indústria investe cada vez mais em departamentos de qualidade e desenvolvimento, além das parcerias com institutos de pesquisa e universidades.

Este trabalho é um exemplo disso mesmo.

1.1 Contextualização do trabalho

Este documento descreve o projeto desenvolvido na empresa Motomig Soldadura Lda., situada na zona industrial de Ílhavo. A empresa mencionada anteriormente, propôs ao aluno que aplicasse os conhecimentos adquiridos ao longo do seu percurso académico, de forma a atingir os objetivos propostos, sendo eles, a identificação de falhas ao longo do processo de fabrico e desenvolvimento de soluções para combater as falhas detetadas.

Assim sendo, o projeto apresentado visa otimizar o processo produtivo, aumentando a qualidade do produto final e diminuir os desperdícios no decorrer do processo.

1.2 Estrutura do documento

O relatório apresentado encontra-se dividido em quatro partes. A primeira parte, é constituída por quatro capítulos, sendo no primeiro feito o enquadramento, onde se encontram informações relacionadas com os objetivos do trabalho, assim como informações sobre a estrutura do documento. No segundo capítulo, é feita uma pequena apresentação da empresa, onde se podem ler algumas informações sobre a sua história, visão e processo produtivo. O capítulo seguinte visa fazer a ponte de ligação entre os conhecimentos teóricos, assuntos já estudados anteriormente, com os conhecimentos práticos. No quarto capítulo, é exibido o cronograma utlizado ao longo do desenvolvimento do projeto.

A segunda parte, refere-se ao projeto desenvolvido, onde se apresentam todos os testes que foram efetuados e as conclusões que foi possível retirar.

A terceira parte, designada por conclusões e trabalhos futuros, encontra-se dividida em dois capítulos, sendo que no primeiro são apresentadas as principais conclusões em relação a todo o projeto e no segundo são apresentadas propostas para futuros trabalhos.

A última parte, designada como anexos, contém fotografias de algumas amostras desta experiência.

Capítulo 2

A empresa Motomig

2.1 Introdução

Em 2007 o Grupo Motofil assumiu o compromisso de construir um projeto de raiz em Portugal, para produção de fio sólido para soldadura.

A este projecto foi dada a designação de Motomig Soldadura, Lda. Esta ideia cresceu e é hoje um fabricante de excelência, líder no mercado do sul da Europa.

O ano de 2010 foi de forte crescimento nos planos da internacionalização, inovação e produtividade. Iniciou-se a entrada no mercado espanhol, francês, brasileiro e no norte de África.

Estrategicamente, em 2012 o Grupo Motofil avançou com uma produção diária de 72 toneladas, fruto da construção da mais recente e avançada unidade fabril da Europa.

A competência e a inovação dão frutos e a Motomig continua a crescer. No primeiro semestre de 2013, reforçou a equipa comercial, incluindo consumíveis na oferta dos seus produtos, e os resultados foram os melhores. Entretanto, conquistou 4 novos mercados (Benelux, Reino Unido, Alemanha e Angola) e ganhou a representação e distribuição da Binzel.

O passo seguinte, que marcou a segunda metade do ano de 2013, foi a construção de uma nova unidade industrial, com o início da produção do fio SG3 e o desenvolvimento de linha de arco submerso.

Missão e Visão da empresa

A sua aposta passa pelo desenvolvimento e melhoria constantes dos seus produtos, processos e serviços.

Devido à sua reduzida dimensão, possui uma grande flexibilidade, agilidade e proximidade para com o cliente, mantendo sempre os mais altos níveis de qualidade.

Excelência e rigor

O compromisso da Motomig é garantir a excelência e a inovação na procura de melhores soluções para os seus clientes, obedecendo a critérios de controlo de qualidade rigorosos e investindo permanentemente na formação dos seus colaboradores. Aposta na construção de um futuro sustentável, moderno e competente, com os melhores resultados na estabilidade dos processos, produtividade e rentabilidade de recursos, equipamentos tecnológicos e sistemas de apoio à produção e à gestão.

O seu fornecimento de produtos é muito vasto. É fornecedora da indústria automóvel, da aeronáutica, das energias alternativas, da indústria metalomecânica, da construção civil, do mobiliário metálico, do equipamento hospitalar, da indústria agrícola, alimentar, de bicicletas e motociclos e da indústria naval. Os elevados critérios das indústrias mencionadas, levou à necessidade de certificação. Desde 2009 que o processo produtivo é certificado pela TÜV Rheinland, que confere a marcação CE 0035-CPR-C613, e cumpre igualmente a AWS A/SFA 5.18:ER 70 S-6, TÜV Merkblatt 1153 e SGS ISO9001.

Os seus produtos encontram-se ainda homologados por algumas das marcas de referência da indústria automóvel e gases industriais.

2.2 Processo produtivo da Motomig

O processo é constituído essencialmente por três fases: a trefilagem a seco, a banho e a bobinagem. A figura 2.1 apresenta o esquema do processo produtivo. A secção da trefilagem a seco é constituída por 2 linhas de produção, sendo cada uma composta por um *pay-off* para desenrolar o fio-máquina, uma decapadora mecânica, uma trefiladora a seco de 8 passos e uma bobinadora. A secção da trefilagem a banho é constituída por 8 linhas de produção , sendo cada uma composto por uma trefiladora a banho, uma tina de decapagem, uma tina de cobreagem, uma tina de água, uma tina com lubrificante para reduzir o atrito da última fieira e uma bobinadora, de forma a transportar o fio para a secção da bobinagem.

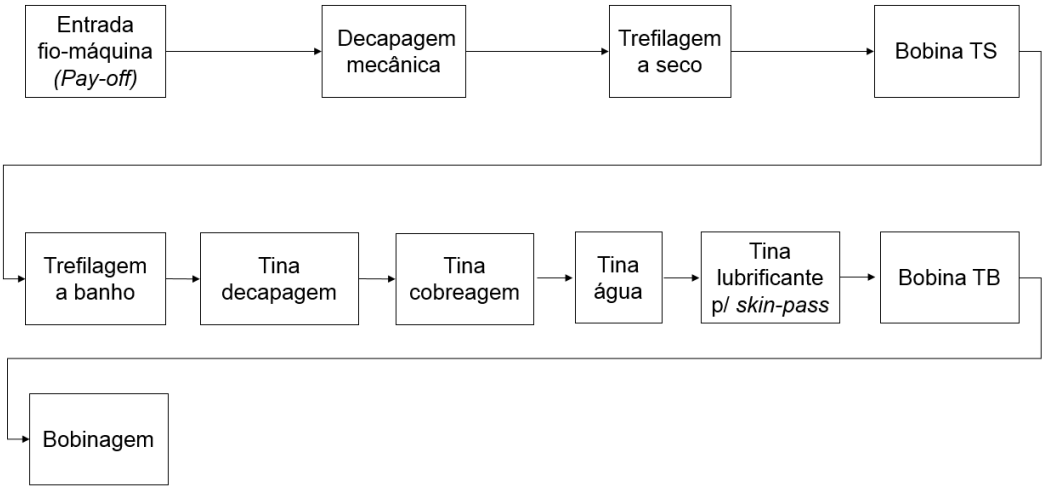


Figura 2.1: Esquema do sistema produtivo

A matéria-prima, cuja composição química é apresenta na tabela 2.1, chega em rolos com cerca de 2000 kg. Estes têm diâmetro externo (DE) de, sensivelmente, 1200 mm, um diâmetro interno (DI) de 850 mm e um comprimento (C) de 150 mm [figura 2.2] O diâmetro da secção do fio é de 5,5 mm.

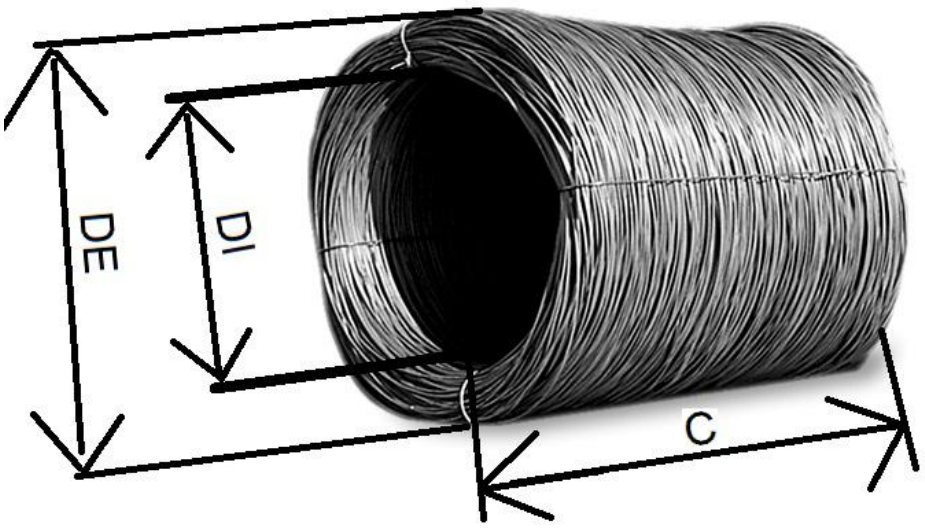


Figura 2.2: Rolo fio-máquina

Tabela 2.1: Composição química da matéria-prima (obtido de certificados do fornecedor *Arcelormittal*)

Designação	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Ti+Zr [%]
G3Si1 (SG2)	0.06 - 0.14	0.8 - 1.1	1.4 - 1.7	0.025	0.025	0.02	0.2	0.15	0.15	0.15	<0.15
G4Si1 (SG3)	0.07 - 0.14	0.9 - 1.2	1.7 - 1.9	0.025	0.025	0.02	0.2	0.15	0.15	0.15	<0.15

O rolo de fio-máquina é colocado num *pay-off*, que consiste no suporte no qual é colocado o rolo da matéria-prima. Tem formato cónico, para facilitar a sua colocação, que é realizada com a ajuda de uma ponte rolante. Assim que colocado, é preparada a superfície da ponta e é soldada à ponta do rolo anterior, através de soldadura por resistência topo-a-topo, podendo observar-se na figura 2.4 esta operação.

(a) Auxílio da ponte rolante

(b) Rolo no *pay-off*

Figura 2.3: Colocação do fio-máquina

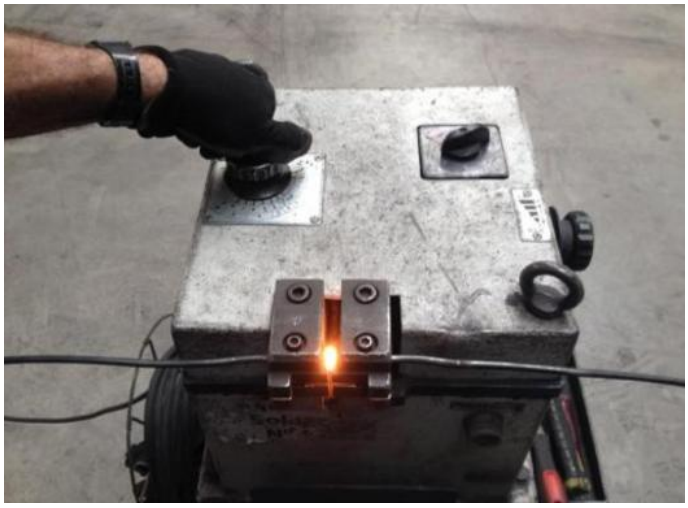
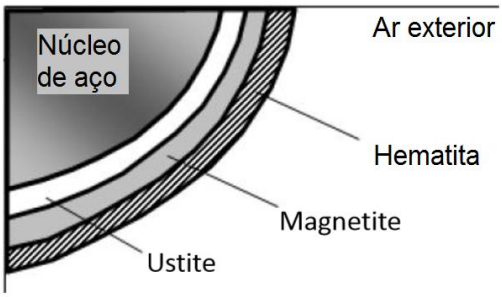


Figura 2.4: União dos rolos através de soldadura por resistência topo-a-topo

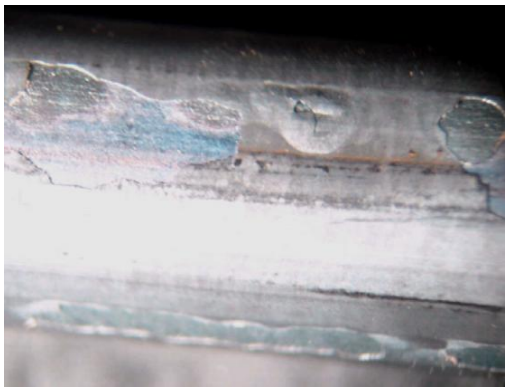
De seguida, o fio é passado por uns roletes em *zigue-zague* [figura 2.5] de forma a quebrar a camada dura e lisa, de cor cinzenta azulada, que se forma de imediato sobre os elementos de aço, que se tenham obtido pelo processo de laminação a quente, a calamina. A figura 2.6 apresenta as várias camadas da calamina e uma foto desta.

Figura 2.5: Roletes para quebrar a calamina

Na etapa seguinte, o fio passa num túnel de lã de aço, vulgarmente conhecida como palha de aço. Esta é constituída por um conjunto de linhas de aço muito finas e entrelaçadas, que devido à sua elevada rugosidade, em contacto com o fio, tornam-no livre dos óxidos que estavam à sua superfície.



(a) As camadas de calamina

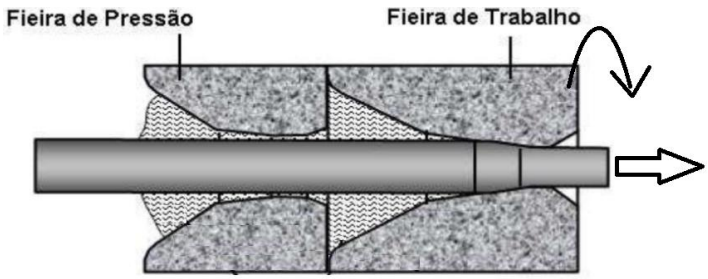


(b) Amostra com elevada quantidade de calamina

Figura 2.6: Calamina

Concluído este processo, o fio dá entrada na trefilagem a seco (TS). Uma vez que o fio se encontra sem qualquer tipo de lubrificante, é necessário providenciá-lo. Para tal, utiliza-se uma fieira suplementar, denominada de fieira de pressão, [figura 2.7a] que tem como objetivo criar uma cavidade suplementar, de forma ao fio estar em contacto com o lubrificante uma maior quantidade de tempo, levando a uma maior adesão deste. Na figura 2.7b, é apresentado um esquema em corte de uma fieira deste tipo.

(a) Sequência de montagem



(b) Fieira de pressão em corte

Figura 2.7: Fieira de pressão

O fio sai da primeira fieira, já com uma área de secção menor, e vai sendo enrolado num cabrestante [figura: 2.8], dando algumas voltas em torno deste.

Figura 2.8: Foto ilustrativa de um cabrestante

O cabrestante ou tambor, consiste num enrolador de geometria cilíndrica que, através do seu movimento de rotação, providencia a força para tracionar o fio, de forma a este atravessar a fieira. Para além desta finalidade, uma vez que tem um circuito de água no seu interior, tem a função de arrefecer o fio. O número de voltas está definido no processo de fabrico [ver figura 2.9] e está, essencialmente, dependente do coeficiente de atrito entre o fio e o tambor, bem como da força de tração necessária à deformação total (plástica e elástica) imposta na trefilagem.

Figura 2.9: Altura do enrolamento necessário

As fieiras [figura 2.10], encontram-se instaladas num bloco rotativo, uma vez que favorece a homogeneização da lubrificação, reduzindo assim o efeito de atrito provocado pelo contacto do fio com a fieira. Consequentemente, o calor gerado por fricção é menor, levando a um aumento da vida útil das fieiras. Outra grande vantagem da rotação destas é a promoção de um desgaste mais uniforme do núcleo da fieira, com a consequente diminuição da ovalidade do fio.

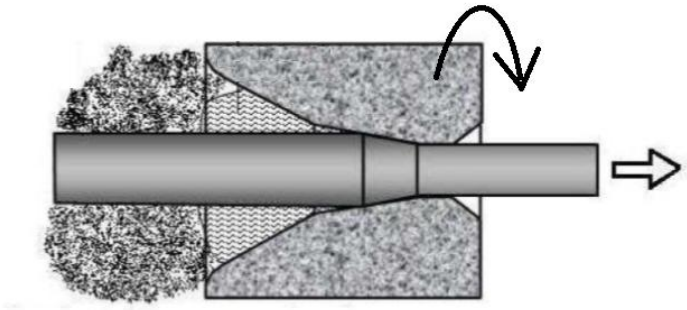


Figura 2.10: Esquema de uma fieira típica

De seguida, o fio irá sofrer novamente a ação de uma fieira, no entanto, estes passos seguintes já não contêm fieira de pressão, uma vez que, o fio ainda transporta algum lubrificante proveniente do passo anterior. À semelhança do passo anterior, o fio irá sofrer a ação da fieira, enrolamento no cabrestante e arrefecimento entre 6 a 8 vezes, mediante o diâmetro de saída desejado.

Quando se obtém o diâmetro desejado, o fio é enrolado em bobines de 1000 kg, passando à secção da trefilagem a banho (TB). Na figura 2.11, podemos ver o tanque de uma trefiladora a banho sem lubrificante, de forma a poder ver-se o interior, uma vez que as fieiras estão imersas em lubrificante no seu estado normal de funcionamento.

Figura 2.11: Polias da trefiladora a banho

Após esta etapa, o fio passa numa tina de ácido sulfúrico, de forma a favorecer a adesão do cobre quando o fio mergulhar na tina seguinte, de sulfato de cobre. Essa reacção tem o nome de cobreamento e é dada pela expressão:

$$Cu^{2+}\ (\text{aq}) + \text{Fe}\ (\text{s}) \text{ -> } \text{Cu}\ (\text{s}) + Fe^{2+}\ (\text{aq}) \qquad (2.1)$$

À saída de cada tina, existe uma esponja de forma a reduzir a contaminação da tina anterior para a seguinte. Tanto a tina de decapagem como a de cobreagem, são aquecidas antes do início do processo de trefilagem, através de uma resistência elétrica. Tal acontece para favorecer as reações químicas que aí se dão. O intervalo de temperaturas indicado pelo fabricante situa-se entre os 30 °C e os 60 °C.

Feito o cobreamento, o fio passa numa tina de água de forma a aumentar o pH para diminuir a contaminação da tina seguinte, que é composta por uma solução básica, um lubrificante. A necessidade da passagem do fio por esta solução, é o facto de existir uma fieira de retificação, também denominada de fieira de *skin-pass*, a seguir, e o fio estar desprovido de qualquer lubrificante, o que levaria à gripagem desta. O objetivo desta última fieira é produzir uma superfície menos rugosa, providenciar um acabamento polido e compactar a camada superficial de cobre do fio. Este processo reduz as distorções na superfície, reduzindo a probabilidade da formação de bandas de *Lüders* (pontos de deformação plástica, devido à não uniformidade do material), representadas na figura 2.12 .

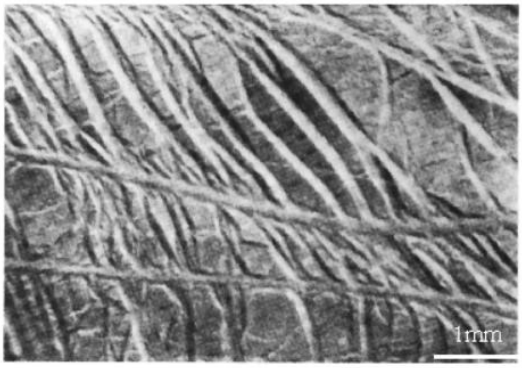


Figura 2.12: Exemplo de bandas de *Lüders*

A divisória entre a tina de água e a de lubrificante do *skin-pass* referidas anteriormente, é refrigerada. Tal acontece, uma vez que as propriedades do fluido da última tina se alteram com o aumento da temperatura, principalmente o pH, e esta era afetada pelo calor proveniente das tinas de cobreagem e decapagem, que se encontram a uma relativamente alta temperatura. Após este passo, o fio é enrolado em bobines de 1000 kg, novamente.

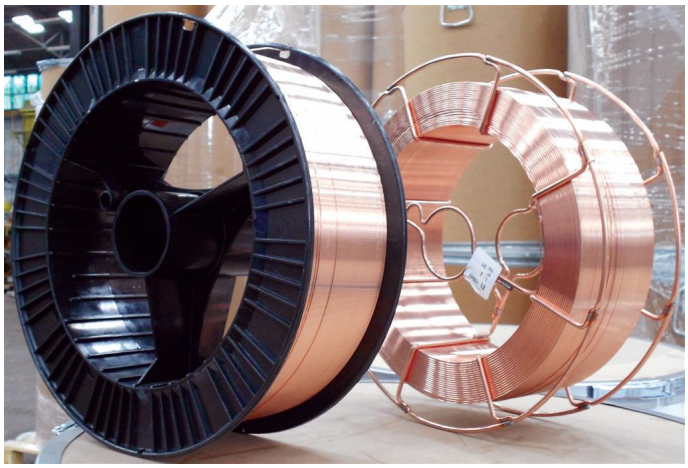


Figura 2.13: Carretel

O próximo passo é a bobinagem. Aqui enrola-se o fio nas embalagens para o cliente final, na forma de carretel [figura 2.13] de 15 kg e tambor (cilindro oco) de 250 ou 500 kg [figura 2.14].

Figura 2.14: Ilustração dos tambores

Capítulo 3

Revisão do Estado da Arte

3.1 Definição

A trefilagem é um processo de conformação, geralmente a frio, onde existe a redução da secção de uma barra ou de um fio, ao passar por um furo com um determinado perfil, denominado de fieira. Esta ferramenta (matriz), constituída habitualmente por metal duro (carbonetos de tungsténio), pode conter diversos perfis e geometrias, dependendo da aplicação e material do produto desejado.

3.2 Trefiladoras

3.2.1 Trefiladora a seco

A linha para a trefilagem a seco, existente na empresa, é caracterizada por ter 8 cabrestantes inclinados em que a sua rotação é obtida por motores de três fases de corrente alterna [figura 3.1].

Figura 3.1: Exemplo de uma trefiladora a seco

A velocidade de rotação destes é calculada com base na velocidade de saída do fio definida, e no valor da tensão aplicada pela bailarina, que é medida por uma célula de carga. A tensão exercida pela bailarina provém da atuação de um cilindro pneumático. A figura 3.2 é a ilustração do que foi descrito anteriormente.

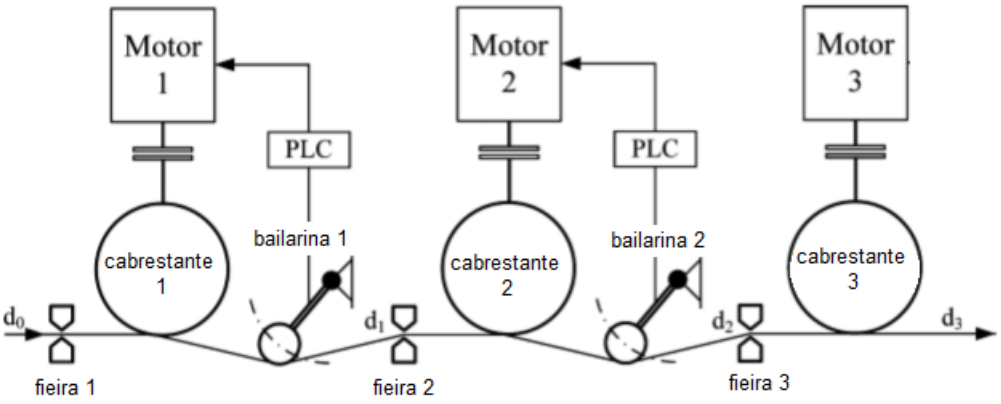


Figura 3.2: Esquema de atuação dos motores na trefilagem a seco

3.2.2 Trefiladora a banho

Na trefiladora a banho, o aumento da velocidade do fio não é dado pelos motores em si, mas sim pelo aumento do diâmetro das polias, como se pode ver pela figura 3.3.

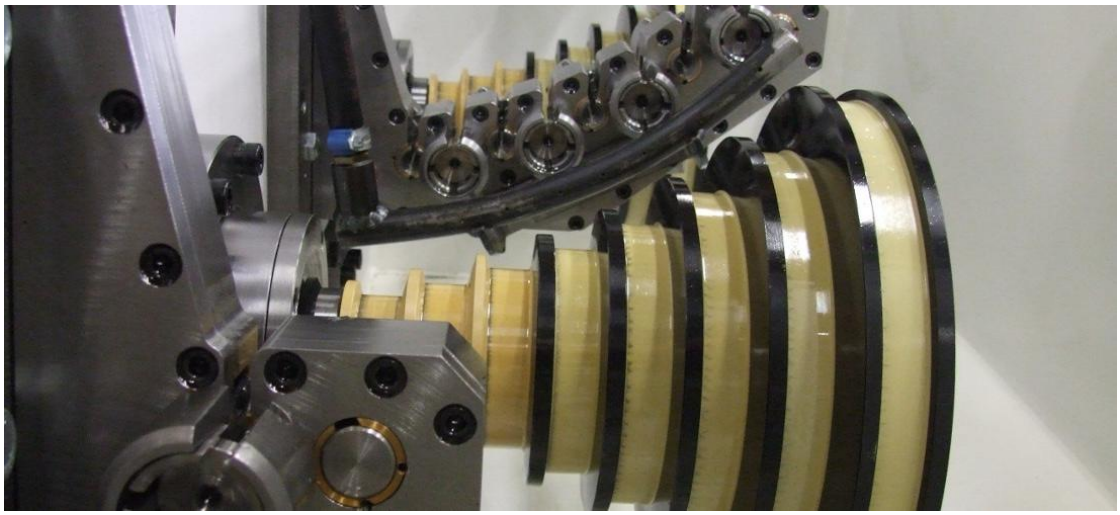


Figura 3.3: Pormenor do tanque da trefiladora a banho

3.3 Ferramenta - fieira

A fieira é um dos principais elementos que constitui uma trefiladora. É aqui que se passa a ação principal [Figura 3.4].

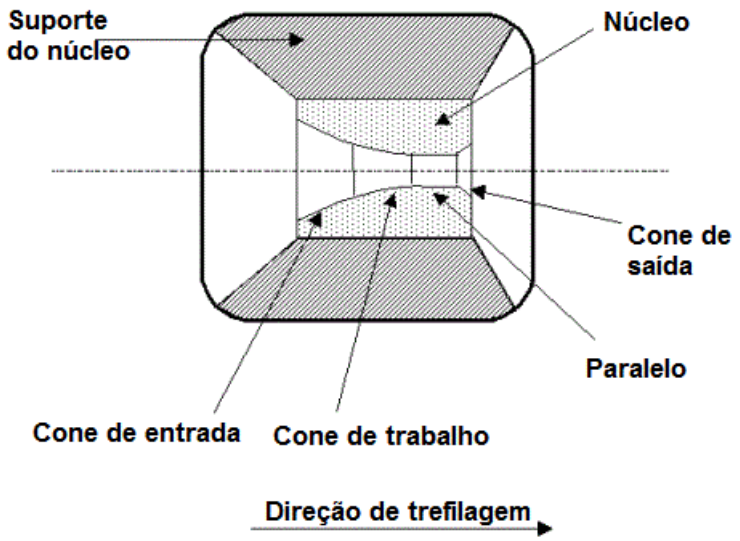


Figura 3.4: Esquema de uma fieira

A fieira tem como função reduzir a secção do material de entrada e favorecer o arrefecimento deste, devido a estar em contacto com um circuito de refrigeração de água na trefiladora a seco e estar imersa no tanque de lubrificante refrigerado, no caso da trefiladora a banho.

Em relação à sua geometria, podemos dividi-la em quatro zonas:

1-Zona de entrada - Região da fieira com ângulos que variam entre os 60 e os 80°. Tem como função providenciar lubrificação ao processo e o guiamento do fio.

2-Zona de trabalho - Esta região é onde ocorre a reação da fieira à força trativa, que impulsiona o fio a atravessar a fieira. Essa reação promove a deformação plástica do material.

O ângulo do cone de trabalho tem de ter um valor tal, que minimize a força de trefilagem, de forma a reduzir os custos com a energia, os valores de tensão envolvidos e o risco de rompimento do fio.

3-Zona de calibração - Também conhecida como zona do paralelo, é uma região cilíndrica, com ângulo zero. Tem como objetivo a estabilização dos parâmetros que foram modificados durante o processo. Aqui, removem-se danos na superfície, causados durante o escoamento plástico do material.

4-Zona de saída - Região com ângulo oposto ao ângulo de entrada e de trabalho. Esta região tem como finalidade facilitar a saída do produto final e permitir o retorno elástico do material antes da saída completa da fieira.

Materiais utilizados

Uma fieira tem ser dura o suficiente para ter uma baixa taxa de desgaste, ser resistente à fratura e às variações térmicas.

As fieiras com núcleo de carboneto de tungsténio e de diamante policristalino (PCD) são as mais comuns na indústria de trefilagem de fio elétrodo. O suporte do núcleo é habitualmente em aço SAE 1045 [4], pois não está em contacto com o produto a trefilar e acresce que é muito mais barato e resistente ao choque, quando comparado com os materias utilizados no núcleo.

- **Carboneto de tungsténio**

Este tipo de material, também conhecido como metal duro, tem uma dureza que vai desde os 600 aos 1000 *Vickers* e está cotado como nove na escala de *Mohs*. A escala de *Mohs* quantifica a dureza dos minerais, ou seja, a resistência que um determinado material oferece ao ser riscado, tendo um intervalo que vai de zero a dez [2].

O metal duro foi desenvolvido na Alemanha, no início do século *XX*. As suas principais características são a elevada dureza, a resistência ao desgaste e às variações de temperatura. A produção deste tipo de compósitos, envolve a compactação de carboneto de tungsténio, cobalto e um aglutinante, como a parafina. O compacto é aquecido para expulsar cuidadosamente o aglutinante e sinterizar o carboneto de tungsténio e o cobalto. Este processo acontece a uma temperatura a rondar os 1400 °C. Uma fase líquida rica em cobalto está presente durante a sinterização.

- **PCD**

O desgaste que ocorre na fieira pode ser reduzido com a utilização de diamante na constituição do núcleo, pois é o material mais duro que se conhece. A sua dureza ronda os 8000 *Vickers* e está no nível dez na escala *Mohs*, o mais alto. Naturalmente, não é usado diamante natural, mas sim sintético, no entanto, ainda assim, as fieiras de PCD são bastante dispendiosas, devido ao preço do material e à tecnologia que é necessária para a sua manufatura. Materiais à base de diamante são constituídos essencialmente por carbono que foi sujeito a altas temperaturas e pressões. Têm uma ligação química e uma estrutura cristalina muito forte [figura 3.5] [2].

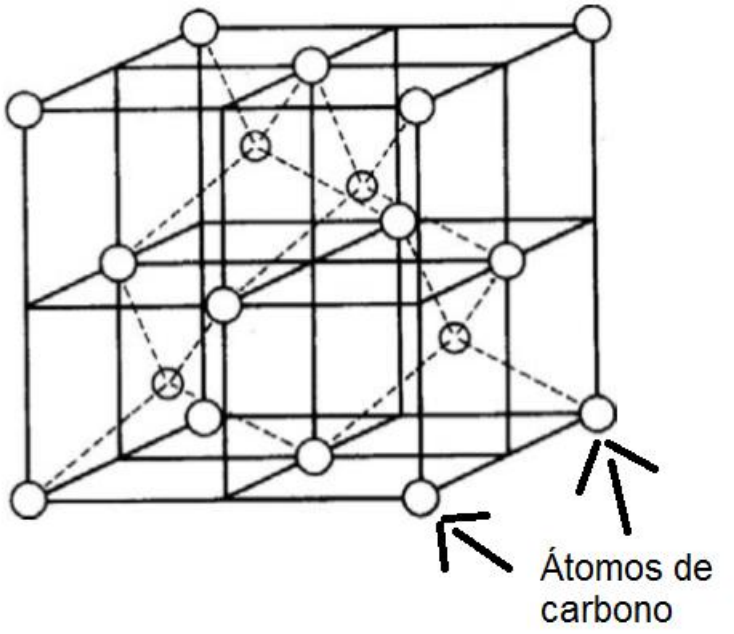
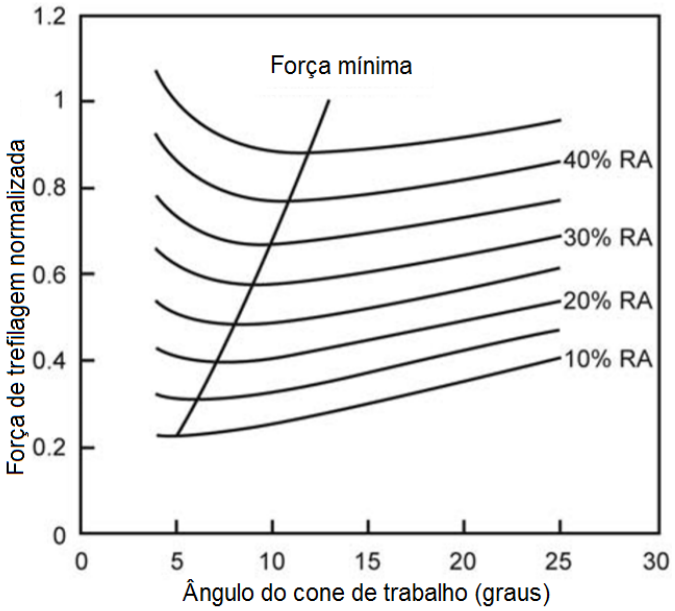


Figura 3.5: Célula de uma estrutura cristalina de diamante

3.3.1 Ângulo de trabalho

A escolha do ângulo de trabalho, é fundamental para o sucesso de uma operação de trefilagem. Anteriormente, já se verificou que pequenos ou grandes ângulos de trabalho têm desvantagens, pelo que o caminho passa por encontrar um meio termo. Fizeram-se algumas experiências [6] nesta área, levando à criação da ilustração presente na figura 3.6 .



*RA - redução de área

Figura 3.6: Força de trefilagem em função do ângulo de trabalho

3.3.2 Fator delta

Um importante dado na trefilagem é o parâmetro delta (Δ) , que consiste na equação 3.1[6], em que α é o ângulo de trabalho, d_{in} é o diâmetro entrada do fio e d_{out} é o diâmetro de saída do fio.

$$\Delta = \frac{d_{in} + d_{out}}{d_{in} - d_{out}} * sin\alpha \tag{3.1}$$

Uma vez que a razão de redução é dada por r = 1 - $(d_1/d_0)^2$ e podemos fazer a simplificação $cos(\alpha) = \alpha$, uma vez que o ângulo em causa é de relativa pequena dimensão, podemos obter:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} \times \left[1 + \sqrt{1 - r}\right]^2 \tag{3.2}$$

Quando este valor é baixo, aumenta a zona de contacto com a fieira, levando a uma elevada fricção, provocando aquecimento. Por outro lado, elevados valores do fator Δ provocarão um aumento da deformação redundante e um encruamento do material, devido à súbita mudança de direção. Além disso, também poderá levar a roturas centrais ou à criação de ocos interiores.

Valores de delta (Δ) a rondar 1,5 são os mais comuns, sendo de evitar valores superiores a 3 [6].

3.4 Volume constante

A trefilagem é um processo de conformação a volume constante, pelo que é possível estabelecer a relação 3.3.

$$volume\ na\ entrada = volume\ na\ saída <=> v_{in} \times \frac{\pi \times d_{in}^2}{4} = v_{out} \times \frac{\pi \times d_{out}^2}{4} \quad (3.3)$$

Sendo v_{in} , v_{out} , d_{in} e d_{out} as velocidades e os diâmetros do fio à entrada e à saída, respetivamente.

Através da expressão anterior, podemos concluir que, quando se trata de trefilagem com vários passos, a velocidade de saída terá de aumentar com a diminuição do diâmetro de saída do fio das fieiras.

3.5 Forças e energia na trefilagem

As condições de deformação na trefilagem são mais complexas que simples ações de compressão e tração. A figura 3.7 apresenta um esquema das forças impostas ao fio durante as operações de trefilagem. A força de trefilagem tem de vencer a força aplicada pela fieira em efeitos de compressão e atrito. Naturalmente, está limitada pela tensão de rotura do material, rondando na prática os 60% desta. A força de trefilagem está dependente da redução de área e do ângulo de trabalho da fieira [6].

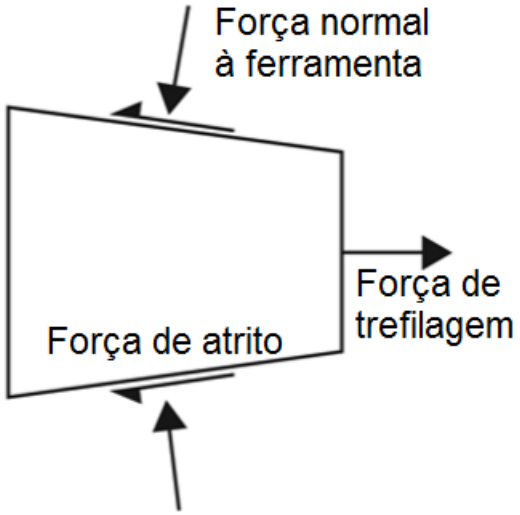


Figura 3.7: Diagrama de forças

A energia total necessária para efetuar a operação de trefilagem, pode ser dividida em três grandes componentes [Ver figura 3.8]: Útil (homogénea), que é aquela que é requerida para reduzir a área da secção do fio, a desperdiçada em fricção e a redundante (não-homogénea) que consiste na energia necessária para mudar a direção do fluxo do material na entrada da matriz [12].

Em condições usuais, as perdas rondam os 20% para o trabalho de fricção e os 12% para o trabalho redundante [6].

Um dos efeitos do trabalho redundante e de fricção é a não homogeneidade da secção, devido às forças serem apenas aplicadas na superfície do fio, levando a níveis elevados de encruamento e diminuição da ductilidade [7].

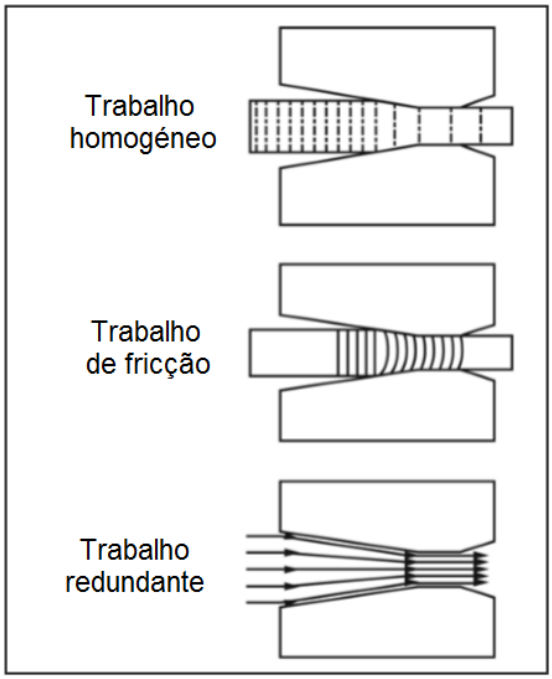


Figura 3.8: Ilustração do trabalho homogéneo, trabalho de fricção e redundante

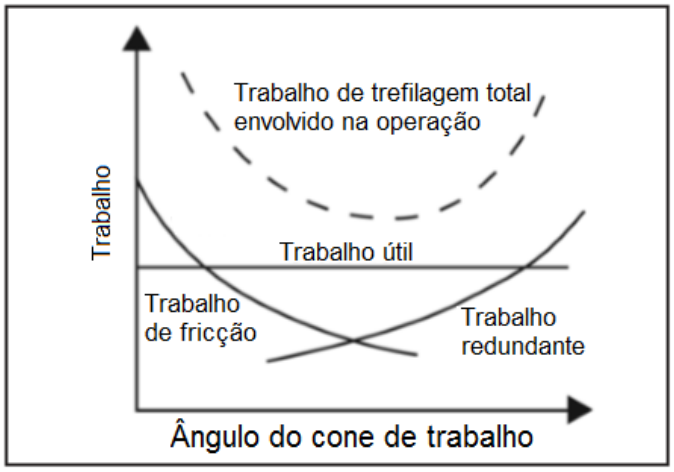


Figura 3.9: Componentes que realizam trabalho durante a trefilagem em função do ângulo de trabalho [2]

O gráfico da figura 3.9 foi obtido com base nas experiência empíricas de *Wright* [2]. Nele, podemos ver como se relacionam os diversos tipos de trabalhos referidos anteriormente, em função do ângulo do cone de trabalho.

3.5.1 Cálculo da força de trefilagem

Existem várias equações para prever a força de trefilagem, sendo que a maior parte delas utilizam constantes empíricas ou cálculos muitos extensos. No entanto, existem

simplificações para ajudar no seu cálculo, apesar de estas só levarem em linha de conta a deformação homogénea do material, pelo que a força calculada é inferior à necessária. A equação sugerida pelo *Ferrous Committee* [8] é a mais conservadora.

$$F_{draw} = 1,6 \times \sigma_{max} \times \frac{\pi \times d_{in}^2}{4} \times \ln\left(\frac{d_{in}}{d_{out}}\right) \tag{3.4}$$

em que σ_{max} é a tensão máxima suportada pelo fio e d_{in} e d_{out} são, respectivamente, os diâmetros de entrada e de saída.

3.5.2 Aplicação de uma contra-força

Após vários testes e estudos [9], chegou-se à conclusão que a aplicação de uma contra-força aumenta o tempo de vida útil da fieira, ao reduzir a carga que é aplicada nesta. *Lewis e Godfrey* estudaram este efeito atingindo melhorias até 30%.

Outro efeito desta contra-força é o aumento da componente axial, uma vez que irá aumentar a tensão na área de secção transversal ao fio e que poderá formar vazios internos e reduzir a ductilidade geral do fio.

Esta perda de ductilidade, em última instância, é prejudicial, uma vez que requer o uso de fieiras com menor redução de área, levando a um aumento do número de passos. No entanto, se for devidamente controlado, uma contra-força pode produzir uma distribuição de deformação mais homogénea no fio, devido a uma distribuição de tensão axial mais uniforme.

Contudo, quando se quer elevadas taxas de produção irá ter-se, consequentemente, elevadas velocidades de saída, o que por sua vez implica maiores forças trativas impostas ao fio e a utilização de uma contra-força deixa de ser possível de implementar, devido a se atingir a tensão de rotura do material, pelo que a contra-força que possa existir no processo é uma consequência e não um efeito.

3.5.3 A deformação redundante

Assim que o fio entra no cone de trabalho da fieira, o material exposto à superfície irá sofrer uma mudança de direção [figura 3.8].

Esta deformação não irá ter uma projeção uniforme sobre o fio e irá ser máxima à superfície, a par com o aumento do encruamento. Este tipo de deformação é mais notável para elevados ângulos de trabalho, uma vez que a mudança de direção é mais acentuada neste caso.

Através de estudos realizados com recurso à difração de raios-X [6], verificou-se que a deformação redundante influencia as tensões residuais do fio. À medida que o ângulo de trabalho aumenta, o gradiente de deformações também irá acompanhar este aumento proporcionalmente. Tal facto leva a elevadas tensões de tração à superfície e de compressão no centro.

3.5.4 Efeito da fricção

As camadas à superfície do fio irão sofrer efeito de corte provocado pelo contacto com as fieiras. Este efeito irá sempre acontecer, por muito polidas que estas sejam. Este torna-se ainda mais relevante para ângulos de entrada reduzidos, uma vez que, existe uma maior força de atrito devido à maior área de contacto entre o fio e a fieira.

Para quantificar a intensidade do efeito da força atrito, utiliza-se o coeficiente de *Couloumb*, representado pela letra grega μ. Este valor pode ser obtido através do método de *McClellan* [10].

Wistreich [11] fez algumas experiências e concluiu que o coeficiente de atrito é superior na trefilagem a banho, quando comparado com o da trefilagem a seco.

3.5.5 Efeito da temperatura

O controlo de temperatura é crítico na trefilagem e atua como fator limitador na produção. Quando a temperatura não é controlada, devido a, por exemplo, problemas na refrigeração, as altas temperaturas irão alterar as características do fio, do lubrificante e acelerará, consequentemente, o desgaste da fieira.

Os efeitos da temperatura vão variar ao longo da secção transversal do fio e são mais evidentes junto à superfície, devido ao trabalho de fricção e à deformação redundante.

Para além disso, uma temperatura não controlada e possível variação da mesma, pode provocar também tensões residuais desfavoráveis, resultando em expansão térmica não uniforme.

O aumento de temperatura do fio é gerado pelo trabalho de deformação e fricção. *Wilson* [13] propõe a fórmula seguinte [Eq. 3.5] para cálculo do valor aproximado da variação de temperatura [ΔT].

$$\Delta T = \frac{1,069 \times 10^4 \times F}{C \times A_f \times \rho} \tag{3.5}$$

em que F é a força aplicada ao fio, C é o calor especifico do material, A_f é a secção de área final do fio e ρ é a densidade do material a ser trefilado.

3.6 Lubrificante

Para minimização do atrito, são utilizados lubrificantes para separar a fieira do fio. O lubrificante tem como funções reduzir a carga de deformação, aumentar o limite de deformação que antecede a fratura, melhorar o acabamento da superfície e minimizar o desgaste da fieira. Na trefiladora a seco, foi utilizado um lubrificante em pó à base de sódio.

No trefiladora a banho, o lubrificante utilizado foi o PANLUBE L3019 da italiana PAN CHEMICALS. Este, é um produto sintético, solúvel em água e com emulsionadores, bio-ácidos e detergentes. A sua densidade é de 1030 $\pm$ 20 g/l e apresenta uma cor castanho-âmbar. Para um solução a 10 %, tal como a que foi utlizada durante os testes, este apresenta um pH de 9,5 $\pm$ 0,5 e um *Brix* de 3.7°. Já na tina de lubrificante de *skin-pass* foi utilizado o Lubriol V325. Este apresenta uma cor acastanhada e possui uma densidade de 0,98 $\pm$ 0,1 g/ml quando à temperatura de 25°C. Numa solução a 10% como a utilizada, este tem um pH superior a 12 e tem tendência a formar alguma espuma, principalmente nos primeiros tempos de utilização.

3.7 Testes para regularizar o processo

De forma a reduzir o número de não conformidades e aumentar a qualidade do produto final, existem variáveis de controlo ao longo da produção. Na trefiladora a seco, é medida

a quantidade de lubrificante aderido ao fio, o *cast* e o *helix*. Na trefiladora a banho, é medida a composição das tinas de lubrificante, de decapagem e de cobreagem. Também é medido o pH da tina lubrificante que antecede a fieira de *skin-pass*.

3.7.1 Medição da quantidade de lubrificante aderido ao fio

Para efetuar a medição da quantidade de lubrificante presente na superfície do fio, a empresa utiliza o seguinte procedimento: retira-se uma amostra com um comprimento (h) de cerca de 75 mm, cortando-se de seguida 7 a 8 pedaços de igual tamanho. Após esta passo, é necessário proceder à medição do diâmetro do fio (D). É importante manusear o fio com a ajuda de uma pinça, de forma a interferir o mínimo possível no resultado final.

$$\frac{P_i - P_f}{P_i} \times \pi \times D \times h \tag{3.6}$$

O passo seguinte é efetuar a pesagem da amostra, P_i.

De seguida, é necessário retirar o lubrificante. Para tal, utiliza-se um tanque de ultra-sons e uma solução aquosa com um produto desengordurante à base de amónia. O movimento de vibração das ondas ultra-sónicas cria bolhas de ar microscópicas na solução de limpeza e milhões de pequenas bolhas se agitam umas contra as outras, criando um processo subtil de limpeza.

Deixa-se a repousar por cerca de 45 minutos e volta-se a pesar as amostra, P_f.

O peso do resíduo lubrificante presente no fio é dado pela equação 3.6. Através das recomendações do fabricante e com base na experiência adquirida ao longo dos anos, os valores aceitáveis para o 1º passo situam-se entre os 6 e os 10 g/m^2, e para os restantes entre os 4 e os 6 g/m^2

3.7.2 Medição de temperatura

Todas os valores de temperatura indicados ao longo deste relatório, foram obtidos através dum termómetro de infra-vermelhos da marca RIGDID e modelo micro IR-200. Este tem uma faixa de medição de temperatura que vai desde os -50 °C aos 1200 °C.

Para temperaturas entre os -50 °C e os 20 °C tem uma precisão de 2,5 °C e para temperaturas superiores tem uma incerteza de 1,0 °C.

3.7.3 *Cast e Helix*

Ao longo do processo e na sua expedição, o fio encontra-se em carretéis e outros recipientes com um enrolamento de configuração helicoidal. Este facto impõe ao fio formas e torções que vão mais tarde dificultar o desenrolamento normal do fio. De forma a estabilizar o processo, existem as variáveis *cast* [figura 3.10] e *helix* [figura 3.11].

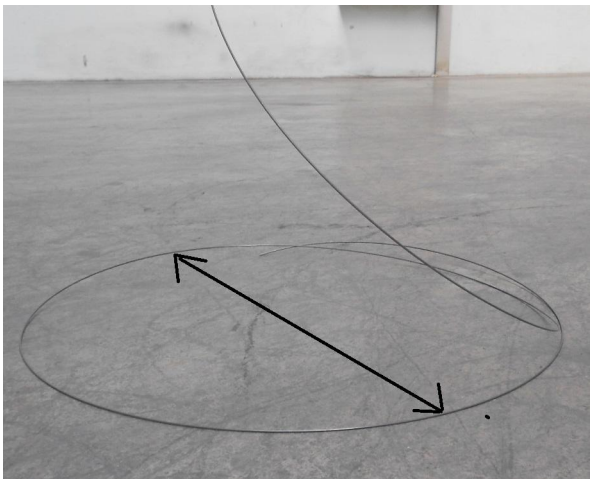


Figura 3.10: Medição de *cast*

Para proceder à sua medição, retira-se um pedaço de fio com comprimento necessário para fazer uma circunferência completa.

O *cast* consiste em medir o diâmetro da circunferência que é formada quando se coloca o fio numa superfície plana. Já o *helix* representa a altura existente entre a ponta de fio levantada e a superfície plana em que está apoiado.

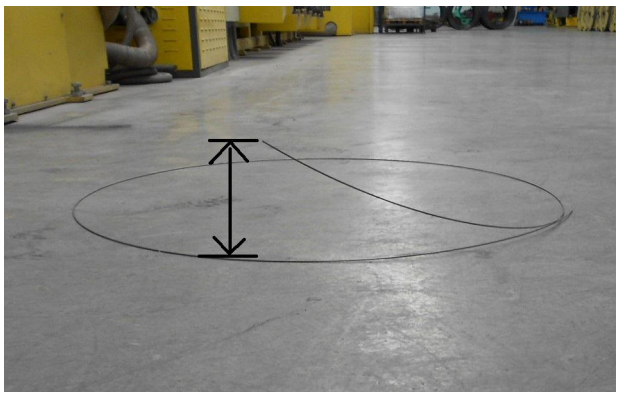


Figura 3.11: Exemplo de fio com *helix* elevado

Na trefilagem a seco, o *cast* deverá ser inferior a 1 m e o *helix* inferior a 25 mm.

Já na trefilagem a banho, o fio deverá ter um *cast* inferior a 2 m e *helix* inferior a 25 mm.

3.7.4 Testes de torção

De forma a avaliar a boa aderência do revestimento de cobre ao fio, realiza-se em todas as amostras um teste de torção, também denominado de "torcida". Este consiste em enrolar cerca de 4 a 6 voltas em torno de si próprio [figura 3.12]. De seguida, observa-se ao microscópio ótico e procura-se por fissuras e escamação.

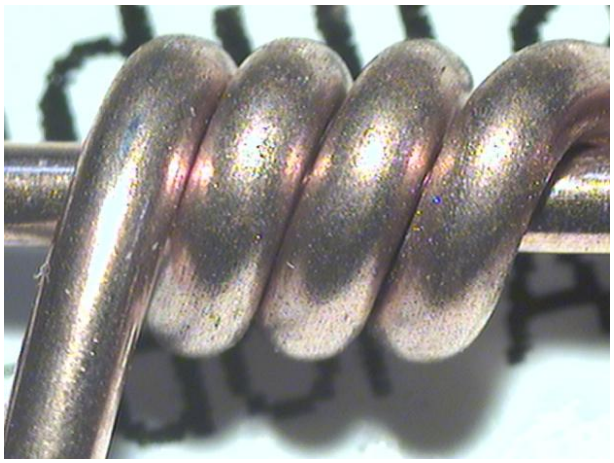


Figura 3.12: Exemplo de uma "torcida"

3.7.5 Medição das concentrações das tinas

Para regular as composições químicas, são retiradas 3 vezes ao dia amostras das tinas de decapagem e cobreagem.

Para determinar a concentração de elementos, é avaliada a densidade da amostra através dum densímetro. De seguida, com o auxilio dum espectrómetro de fluorescência de raios-X , é determinada a quantidade de ferro e cobre. Este aparelho tem como princípio irradiar a amostra por um feixe de raios-X. Os átomos na amostra geram raios-X característicos, os quais possuem um comprimento de onda e uma energia específica que é característica de cada elemento - a absorbância - como se pode ver pela figura 3.13. Introduz-se estes dados numa folha de cálculo, de onde se obtêm as concentrações de ferro e de cobre e a quantidade de cobre a adicionar à tina de cobreagem, no caso de estar abaixo do limite.

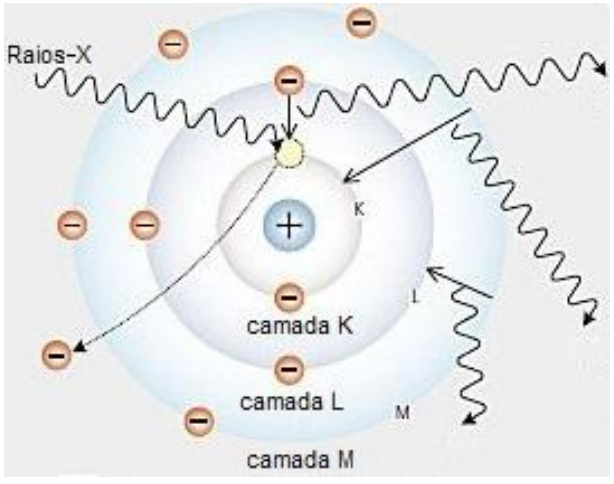


Figura 3.13: Esquema do funcionamento do equipamento de fluorescência de raios-x

A tina de decapagem deve ter uma concentração de ferro inferior a 50 g/l e a de ácido sulfúrico deve estar compreendida entre 100 e 300 g/l. Já na tina de cobreagem, a con-

centração de ácido sulfúrico deve estar compreendida entre 80 e 150 g/l, a concentração de sulfato de cobre deve situar-se no intervalo de 30 a 50 g/l e a concentração de ferro inferior a 50 g/l. Por último, a tina de lubrificante, antes da fieira de *skin-pass*, deve ter um pH superior 8 (a 25°C).

3.7.6 Medição da espessura da camada de cobre

Com recurso ao mesmo espectrómetro, é possível obter a dimensão da espessura da camada de cobre. Quanto maior a energia que é difratada, maior é a espessura da superfície de cobre. Esta relação está incorporada no *software* do aparelho, tendo como valores aceitáveis de espessura valores entre 0,150 μm e 0,450 μm. No entanto, é recomendado que este valor seja de 0,300 $\pm$ 0,1 μm.

3.8 Defeitos/quebras

Um dos maiores problemas na trefilagem é a quebra do fio, levando à paragem da máquina e a algum tempo despendido em novo enfiamento do fio.

3.8.1 Ruturas centrais

Este tipo de defeito, também conhecido como *central brusts*, consiste em ocos no interior do fio e, como tal, é bastante difícil de detetar. O mecanismo de ocorrência do defeito pode ser compreendido a partir da figura 3.14.

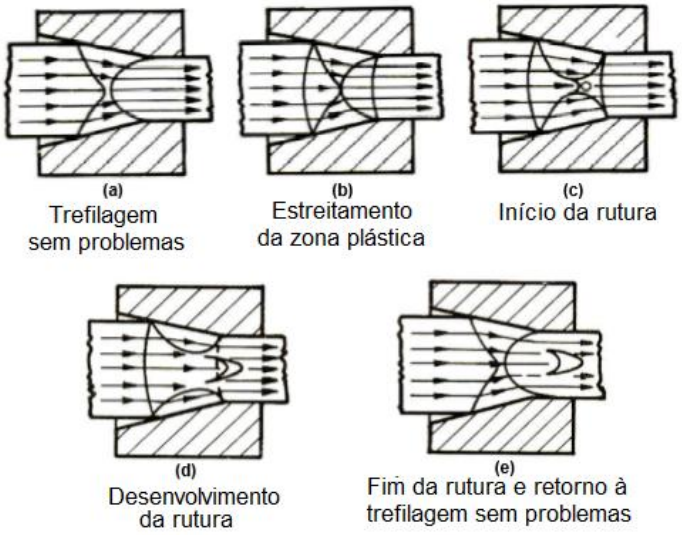


Figura 3.14: Esquema do processo de formação das ruturas centrais

Este fenómeno acontece quando o ângulo do cone de trabalho é demasiado reduzido para as condições do processo. Consequentemente, as zonas de deformação plástica intersetam-se e o fio fica preso, por instantes, no interior da fieira. Depois, uma vez que o fio está sujeito a tração, surge um oco interior [figura 3.15].

3.8.2 Fratura por inclusão de partícula dura

Este tipo de fratura, com marca de inclusão, é causada por partículas duras inclusas no fio inicial, tais como sílica, alumina, sulfetos, entre outras impurezas [14].

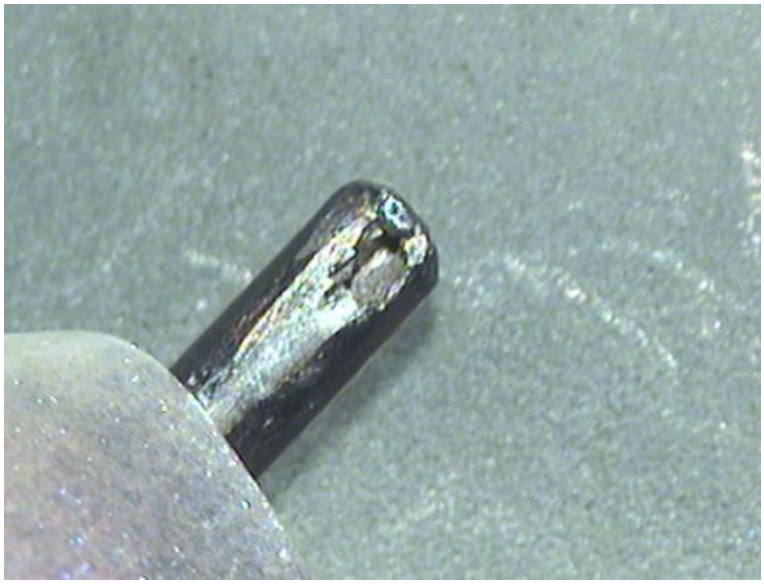


Figura 3.15: Exemplo de defeito de oco interior

3.8.3 Quebra inclinada

A fratura por um plano inclinado pode ser causada por abrasão, como por exemplo com a utilização cabrestantes gastos e que já se encontram rugosos, quebra do núcleo da fieira, lubrificação deficiente, entre outros [14].

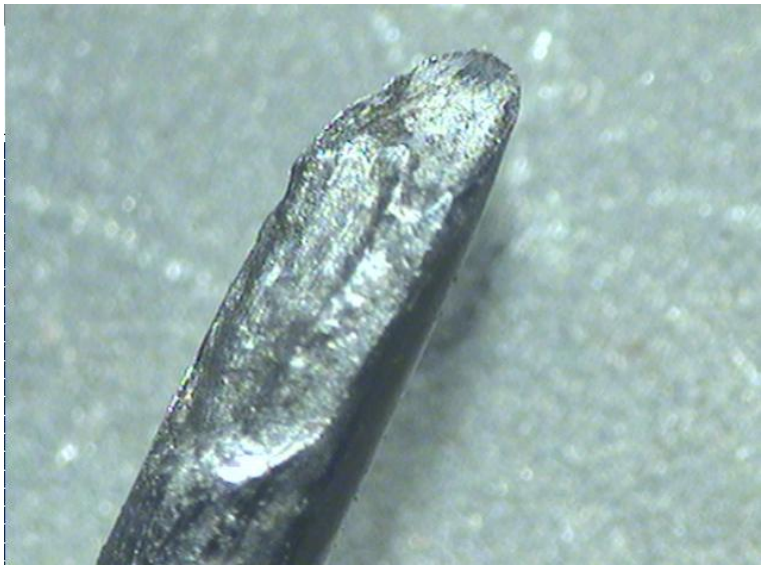


Figura 3.16: Exemplo de quebra inclinada

3.8.4 Quebra por esforço

É causada por elevada tensão de trefilagem proveniente de lubrificação deficiente [figura 5.2b], excesso ou carência de voltas do fio no cabrestante, este esteja danificado ou redução de área excessiva.

Figura 3.17: Exemplo de quebra por esforço

3.8.5 Quebra interna

Este tipo de quebra, também conhecido como ponta de lápis ou taça-cone, consiste em uma geometria cónica numa das pontas e o seu simétrico na outra [Figura 3.18].

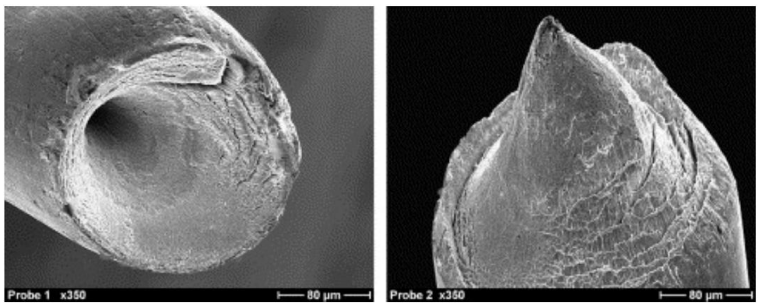


Figura 3.18: Exemplo de quebra do tipo ponta de lápis

As causas que provocam este tipo de quebra devem-se a uma redução de área pequena e ângulo de fieira muito grande, levando a uma acentuada deformação da parte central. Formam-se pequenas fissuras que se vão propagando na direcção de 45°, geralmente.

Capítulo 4

Planeamento das atividades

4.1 Calenderização das tarefas

Em qualquer tipo de projeto, o planeamento de tarefas revela-se essencial, pois permite ter um maior controlo e organização.

No primeiro mês, realizou-se uma familiarização com o sistema produtivo da empresa, conversando com os colaboradores. Realizou-se também a revisão de literatura, que possibilitou o enquadramento entre o projeto realizado e os conhecimento teóricos.

No segundo mês, procurou-se por pontos possíveis de melhoria e formulou-se sugestões.

No terceiro mês, procedeu-se à encomenda dos materiais necessários (fieiras) para a implementação das melhorias. De forma a validar as propostas realizadas, durante os meses seguintes, realizaram-se testes de validação, tendo-se depois realizado o tratamento dos dados obtidos e formulado as conclusões.

4.1.1 Análise das fieiras

As fieiras são o elemento mais importante da trefilagem pelo que foi apartir delas que se fez as primeiras observações, tendo se verificado a aparência (procurando por fissuras), a tonalidade destas e a quantidade de material consumido.

Realizou-se para fieiras de núcleo de carboneto de tungsténio e de diamante policristalino.

4.1.2 Utilização de uma fieira de maior resistência ao desgaste

As fieiras com núcleo em diamante policristalino, denominado geralmente por PCD (*Polycrystalline Diamond*), são conhecidas por serem as mais resistentes à abrasão. Esta característica permite que uma fieira deste material possa trefilar uma maior quantidade de fio com menos substituições. Desta forma, a trefiladora tem mais tempo de trabalho disponível.

Além disso, o diâmetro obtido é mais constante, levando a uma maior estabilidade do processo.

Outra vantagem é o facto da superfície do fio ser menos rugosa, levando a um melhor acabamento.

Posto isto, foi sugerido fazer uns testes e proceder ao seu registo para validar estas teorias. Foi feita também uma análise económica, visto a experiência ser feita em ambiente real. Para tal, ir-se-á realizar um teste com recurso a fieiras com núcleo em PCD.

4.1.3 Aumentar o diâmetro de saída da fieira

A tabela 4.1 compara os valores observados da produção na trefiladora a banho com aqueles permitidos pela norma ISO 544.

Tabela 4.1: Valores do diâmetro do fio

Diâmetro nominal [mm]	**Diâmetro tolerado [mm]**	**Diâmetro produzido [mm]**
0.8	0.76 - 0.81	0.78-0.79
1.0	0.96-1.01	0.97-0.98
1.2	1.16-1.21	1.16-1.17

Uma vez que o produto final é vendido a peso, é possível produzir uma maior quantidade de material em menor quantidade de tempo, adotando fieiras de maior dimensão, naturalmente dentro dos limites permitidos pela norma. Numa 1ª fase, a ideia é introduzir uma fieira de produção de fio com diâmetro de 1,18 mm, pois com apenas uma centésima de milímetro de diferença, não há necessidade de criar um jogo novo com diferentes fieiras e reduções de área.

Foi acompanhado o processo e registadas as seguintes variáveis:

- Quantidade de lubrificante;
- pH e temperatura da tina do *skin-pass*;
- Composição de cada tina do tanque de cobreagem.

4.1.4 Aumentar o número de passos

Ao aumentar o número de passos, é possível aumentar a velocidade de trefilagem, uma vez que é feita uma menor redução de área transversal do fio entre cada fieira, com uma consequente diminuição da força de tração necessária.

Na trefiladora a seco existente na empresa, já não é possível aumentar a velocidade, uma vez que está limitada a oito passos, estando estes já em utilização total. No entanto, na trefiladora a banho, nunca se utiliza, nos jogos atuais, todos os passos possíveis, pelo que a ideia seria alterar as reduções por passo e elaborar um novo jogo de fieiras.

Durante os testes, foram registadas as seguintes variáveis:

- Diâmetro do fio;

- Redução da área por passo;
- Temperatura (obtida por termómetro de infra-vermelhos);
- Velocidade de saída (observada no monitor do painel de controlo);
- Quantidade de lubrificante aderido ao fio.

Parte II

Testes em novas implementações

Capítulo 5

Ensaios Experimentais

5.1 Testes com fieiras de núcleo de diamante

5.1.1 Enquadramento

Para estudar a implementação desta nova variável - a implementação de fieiras com núcleo de diamante policristalino - é necessário estabilizar as restantes.

Tendo isto em conta, e até para futura referência, realizou-se o registo da data de mudança do lubrificante, da concentração de ferro e ácido sulfúrico na tina de decapagem, de ferro, ácido sulfúrico e sulfato de cobre na de cobreagem e o pH da tina de *skin-pass*, para cada uma das linhas.

Um dos principais fatores influenciadores na qualidade do fio são as concentrações dos banhos. Um nível de lubrificante abaixo do especificado, pode levar ao desgaste precoce das fieiras e até à quebra do fio, e as baixas concentrações de cobre darão origem ao fraco cobreamento, de entre outros. Tendo estes fatores em conta, é necessário proceder aos registos destas variáveis, para verificar se estão dentro dos padrões aceitáveis [tabelas 5.1 , 5.2 e 5.3]. Só assim, em caso de o produto final sair com má qualidade ou não conforme, se poderá inferir que se deveu à alteração implementada no processo (fieiras de núcleo de diamante).

Tabela 5.1: Registo das condições dos banhos da linha 1

Banho da trefilagem Panlube L3019	Tina da decapagem		Tina da cobreagem			*Skin-Pass* Lubriol V325
Novo a 22/03/2017 e	Fe [g/L]	H_2SO_4 [g/L]	Fe [g/L]	$CuSO_4$ [g/L]	H_2SO_4 [g/L]	pH
12/04/2017	3,57	118,4	28,21	45,52	173,95	10,53
Referência:	<50	200 ± 100	<50	40 ± 10	115 ± 35	>8

Tabela 5.2: Registo das condições dos banhos da linha 2

Banho da trefilagem Panlube L3019	Tina da decapagem		Tina da cobreagem			*Skin-Pass* Lubriol V325
Novo a 22/03/2017	Fe [g/L]	H_2SO_4 [g/L]	Fe [g/L]	$CuSO_4$ [g/L]	H_2SO_4 [g/L]	pH
	1,85	154	27,32	44,86	167,27	12,24
Referência:	<50	200±100	<50	40±10	115±35	>8

Tabela 5.3: Registo das condições dos banhos da linha 3

Banho trefilagem Panlube L3019	Tina decapagem		Tina cobreagem			Skin-Pass Lubriol V325
Novo a 22/03/2017 e	Fe [g/L]	H_2SO_4 [g/L]	Fe [g/L]	$CuSO_4$ [g/L]	H_2SO_4 [g/L]	pH
05/04/2017	11,81	177	28,60	35,92	133,64	11,10
Referência:	<50	200±100	<50	40±10	115±35	>8

A tabela 5.4, apresenta o registo da produção feita com as fieiras com núcleo em PCD no último passo (fieira de retificação ou fieira de *skin-pass*). Na primeira coluna, é indicada a referência da fieira, assim como o número de série desta. Na segunda, encontra-se a indicação da linha de trefilagem que foi utilizada. Nas terceira e quarta, a data de início e fim de teste, respetivamente. Na quinta, a quantidade que foi produzida. Na sexta, estão os diâmetros mínimo e máximo obtidos no fio, e na última coluna, encontra-se a velocidade de saída média. A velocidade de saída também é relevante, uma vez que, quanto maior esta for, menor tempo o fio estará nas tinas de cobreagem, e menor será a quantidade de cobre aderido.

Tabela 5.4: Registo da produção

Fieira	Linha	Início do teste	Fim do teste	Quantidade produzida [kg]	Variação diâmetro [mm]	Velocidade saída [m/s]
WD815F 2033524	TB 1	21-03-2017	11-04-2017	17 911	de 1,160	15
					a 1,160	
WD815F 2033526	TB 2	21-03-2017	28-03-2017	8 751	de 1,161	
					a 1,163	
WD815F 2033519	TB 3	21-03-2017	26-04-2017	31 284	de 0,972	14
					a 0,977	
WD815F 2033521	TB 4	21-03-2017	26-04-2017	32 966	de 0,969	
					a 0,971	
D15-N5 2469418	TB 6	04-04-2017	17-04-2017	5 460	de 0,777	13
					a 0,777	
D15-N5 2469421	TB 7	31-03-2017	13-04-2017	4 200	de 0,773	
					a 0,778	

A tabela 5.5 regista a espessura de cobre no início, no meio e no fim da vida útil da fieira.

Tabela 5.5: Medição da espessura da camada de cobre

Fieira	Linha	Espessura de cobre [μm]		
		No início da produção	No meio da produção	No fim da produção
D15-N5 2469418	TB 6	0,197	0,388	0,214
D15-N5 2469421	TB 7	0,159	0,284	0,302
WD815F 2033521	TB 4	0,300	0,283	0,218
WD815F 2033519	TB 3	0,288	0,209	0,186
WD815F 2033524	TB 1	0,313	0,315	0,329
WD815F 2033526	TB 2	0,277	0,305	0,293

De seguida, submeteu-se as fieiras a análise no microscópio ótico, tendo-se registado as observações na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Registo da análise às fieiras após produção indicada na tabela 5.4

*devido à necessidade de dar resposta a um elevado número de encomendas de fio de diâmetro de 1 mm. **De modo a verificar se o problema seria da fieira estar danificada, trocou-se para fieira de metal duro e o fio saiu com bom aspeto; Suspeita-se que a fieira tenha sido usada indevidamente; talvez fosse para fio não cobreado (não adequada ao processo)

Fieira	Linha	Motivo de fim de teste	Outras observações
WD815F 2033524	TB 1	Mudança para fieiras de metal duro de diâmetro de 1 mm*	Bom aspecto; Fieira sem danos visíveis
WD815F 2033526	TB 2	Mudança para fieiras de metal duro de diâmetro de 1 mm*	Bom aspecto; Fieira sem danos visíveis
WD815F 2033519	TB 3	Fio riscado	Zona do cone de trabalho um pouco rugosa
WD815F 2033521	TB 4	Fio riscado	Zona do cone de trabalho um pouco rugosa
D15-N5 2469418	TB 6	Fio escuro; Fio pouco cobreado	Bom aspecto; Fieira sem danos visíveis; **
D15-N5 2469421	TB 7	Fio escuro; Fio pouco cobreado	Bom aspecto; Fieira sem danos visíveis; **

Uma vez retirados todos os dados necessários para compreender o problema, é necessário fazer uma análise de custo para verificar se a medida é economicamente viável. A tabela 5.7 apresenta essa análise, em que, na primeira coluna é indicado o diâmetro nominal da fieira em análise, na segunda o preço desta para núcleo em metal duro, na terceira uma média da produção feita pela empresa em 2015 e 2016 e na quarta é indicado o rácio entre o custo de uma fieira sobre a quantidade produzida por esta, de acordo com a coluna anterior. Depois, nas três colunas colunas seguintes, é análogo, mas é tida em conta a quantidade produzida na experiência, ao invés dos registos de produção dos anos anteriores. Na penúltima coluna, é indicada a diferença de custo de produzir com fieira de núcleo PCD em vez de núcleo de metal duro e na última coluna, essa diferença é indicada em termos percentuais.

Tabela 5.7: Análise de custos de fieiras com núcleo em metal duro e em PCD

	Fieira de metal duro			Fieira de PCD				
Diâmetro nominal [mm]	Preço de uma fieira [€]	Produção média p/ fieira (2015-2016) [kg]	Preço p/ quantidade produzida [€/ton]	Preço de uma fieira [€]	Quantidade produzida na experiência [kg]	Preço p/ quantidade produzida [€/ton]	Diferença p/quantidade produzida [€/ton]	Var [%]
0,8	6,30	700,180	9,00	104,00	5 460	19,05	10,05	52,76
					4 200	24,76	15,76	63,66
1,0		1719,084	3,66	105,00	32 966	3,19	-0,48	-15,06
					31 284	3,36	-0,31	-9,19
1,2		1814,503	3,47	108,00	8 751	12,34	8,87	71,87
					17 911	6,03	2,56	42,42

Na tabela 5.8, pode-se verificar o número de trocas que são feitas a mais por se utilizar

fieiras com núcleo de metal duro em vez de PCD, para os 3 diâmetros utilizados. Este número foi obtido através do rácio da média da produção feita na experiência sobre a produção média feita nos anos anteriores, obtida na tabela 5.7. Na terceira coluna, é indicado o tempo que é perdido nessas trocas atendendo a que é necessário substituir o conjunto total do jogo de fieiras sempre que a fieira final se encontre em fim de vida e que a troca de um jogo de fieiras demora cerca de 10 minutos. Na quarta coluna, é indicado a quantidade de fio que se poderia ter trefilado neste intervalo de tempo em que a máquina esteve parada [eq. 5.1] e na última o preço de mão-de-obra atendo a um preço hora-homem de 30 € (salário de 1000 € onde estão incluídos todos os custos de amortização e despesas com o operário)

$$massa\,produzida = \rho \times \pi \times \frac{d^2}{4} \times v_{out} \times \Delta t \tag{5.1}$$

Em que ρ é a densidade, d_{out} é o diâmetro de saída do fio trefilado, v_{out} é a velocidade e Δt o tempo proveniente da duração da paragem da linha.

Tabela 5.8: Produção perdida e custo com a mão de obra

Diâmetro nominal [mm]	Nº trocas poupadas	Tempo perdido na troca de fieiras [horas]	Produção que se poderia fazer durante os tempos de troca [kg]	Preço da mão de obra necessária [€]
0,8	6,90	1,15	201,83	34,5
1,0	18,69	3,11	929,47	93,3
1,2	7,35	1,22	558,06	36,6

5.1.2 Conclusões

O ensaio das fieiras de Ø 1,17 mm foi interrompido devido à necessidade de mudança de diâmetro na produção, pelo que não se pode tirar conclusões, ficando para trabalho futuro. Quanto às fieiras de Ø 0,78 mm, estas retiram cobre ao fio, pelo que a sua implementação produz fio não conforme, impossibilitando a sua implementação.

Em relação às de Ø 0,98 mm, estas tiveram um custo por tonelada produzida inferior, chegando aos 15% de redução de custos. Devido à sua maior durabilidade face às de carboneto de tungsténio, o diâmetro é mais constante, reduzindo assim o tempo de afinações nas bobinadoras, deixando em aberto uma possível implementação para este tipo de fieiras.

5.2 Testes de fieiras de Ø 1,18 mm

5.2.1 Enquadramento

Uma vez que o produto final é vendido ao peso, é possível produzir uma maior quantidade de material em menor quantidade de tempo adotando fieiras de maior dimensão, dentro dos limites da ISO 544, a norma que define as tolerâncias para o fio elétrodo. Visto isto, o objetivo deste teste é verificar a viabilidade da troca das fieiras finais, também conhecidas como fieiras de *skin-pass* de Ø1,17 mm para Ø1,18 mm.

5.2.2 Registo de resultados

Foi produzida uma quantidade de 12 161 kg de fio, repartida por 15 amostras a uma velocidade de saída nas trefiladoras a banho que variou entre os 13 e os 15 m/s.

A tabela 5.9 apresenta a linha em que foi produzida, a data e algumas observações relativas à fieira que trefilou a amostra. Utilizaram-se 4 fieiras na linha 5 (atribuindo-se as referências F1, F2, F3 e F4) e uma fieira na linha 1 (com a referência F5) ao longo desta experiência

Tabela 5.9: Identificação da amostra

Amostra	Linha	Data	Observações
F1.1	TB5	10-05-2017	1ª Fieira (F1)
F1.2	TB5	10-05-2017	F1
F1.3	TB5	11-05-2017	F1
F1.4	TB5	11-05-2017	F1. Procedeu-se à sua troca
F2.1	TB5	12-05-2017	Colocação de uma 2ª fieira (F2). Partiu a fieira intermédia Ø 1,24 mm e Ø 1,32 mm, pelo que se procedeu à substituição de todo o conjunto.
F5.1	TB1	12-05-2017	Colocação da fieira F5. Devido ao fio estar a sair riscado e uma vez que a fieira é relativamente nova procedeu-se à colocação da bobine de TS noutra linha de forma a verificar que o problema não é efectivamente da fieira. Tal se confirmou.
F3.1	TB5	12-05-2017	Colocação de uma 3ª fieira (F3)
F3.2	TB5	12-05-2017	F3
F3.3	TB5	15-05-2017	F3.
F5.2	TB1	15-05-2017	F5
F3.4	TB5	15-05-2017	F3. Procedeu-se à troca da fieira.
F5.3	TB1	15-05-2017	F5
F5.4	TB1	15-05-2017	F5
F4.1	TB5	15-05-2017	Colocação de uma 4ª fieira (F4)
F4.2	TB5	15-05-2017	F4

As conclusões da análise das amostras ao microscópico ótico, podem ser vistas na tabela 5.10 .

Tabela 5.10: Registo das conclusões da observação à lupa

Amostra	Observações
F1.1	Perdeu-se a amostra
F1.2	Perdeu-se a amostra
F1.3	Riscado de um lado
F1.4	Riscado de um lado; Escuro
F2.1	Riscado de um lado - pouco; Escuro
F5.1	Bom aspecto
F3.1	Riscado de um lado - pouco; falta de cobre
F3.2	Riscado de um lado
F3.3	Muito riscado de um lado
F5.2	Riscado de um lado - pouco
F3.4	Muito riscado de um lado
F5.3	Riscado de um lado - pouco; Escuro
F5.4	Riscado de um lado - pouco
F4.1	Falta de cobre
F4.2	Ligeiramente riscado

O registo da quantidade de fio trefilado, diâmetro do fio de saída e espessura de cobre encontram-se registados na tabela 5.11 .

Tabela 5.11: Registo da produção realizada por amostra e medição do diâmetro e espessura de cobre

Amostra	Peso bobina [kg]	Diâmetro [mm]	Espessura de Cobre [μm]
F1.1	535	1,180	0,225
F1.2	1050	1,178	0,336
F1.3	1050	1,177	0,306
F1.4	295	1,177	0,192
F2.1	1050	1,167	0,153
F5.1	623	1,183	0,340
F3.1	1050	1,171	0,223
F3.2	1050	1,169	0,220
F3.3	1050	1,179	0,238
F5.2	1050	1,183	0,241
F3.4	525	1,188	0,349
F5.3	1050	1,182	0,285
F5.4	463	1,182	0,206
F4.1	1050	1,181	0,176
F4.2	270	1,178	0,165

A tabela 5.12 indica a quantidade de fio produzido em cada uma das cinco fieiras.

Tabela 5.12: Quantidades parciais de produção

*houve problemas na refrigeração durante a trefilagem a seco, pelo que o fio tinha um elevado encruamento.

Fieiras	Quantidade produzida [kg]	Fieira/ton	Motivo de fim
F1	2930	0,341	partiu fieira
F2	1050	0,952	quebra do fio por defeito*
F3	3675	0,272	desgaste
F4	1320	0,758	acabou o fio
F5	3186	0,314	acabou o fio
Média		0,527	

5.2.3 Conclusões

Os dados do tanque de cobreagem dizem respeito aos valores médios, pelo que, se poderá explicar a baixa espessura de cobre em algumas amostras devido à concentração de cobre do banho de cobreagem estar abaixo do mínimo estipulado por alguns momentos. De uma maneira geral, o fio apresenta-se ligeiramente riscado de um lado havendo 3 casos em que é mais acentuado e 3 em que é quase impercetível. Não houveram não conformidades.

Outro aspeto a salientar é o facto de a maior parte das amostras estarem um pouco sujas. Mesmo após a colocação de banhos novos, estes ficaram sujos rapidamente não se encontrando uma justificação para esta causa. É um aspeto a analisar mais tarde.

5.3 Testes com o novo jogo de fieiras na trefiladora a seco e na a banho

5.3.1 Enquadramento

O fio é submetido a um aumento de temperatura ao passar na fieira, sendo depois arrefecido quando enrolado no cabrestante e assim sucessivamente ao longo das várias etapas de redução de diâmetro [figura 5.1]. Esta variação de temperatura é proporcional à redução de área (RA), pelo que, o objetivo deste teste é aumentar o número de passos com uma menor redução de área em cada passo.

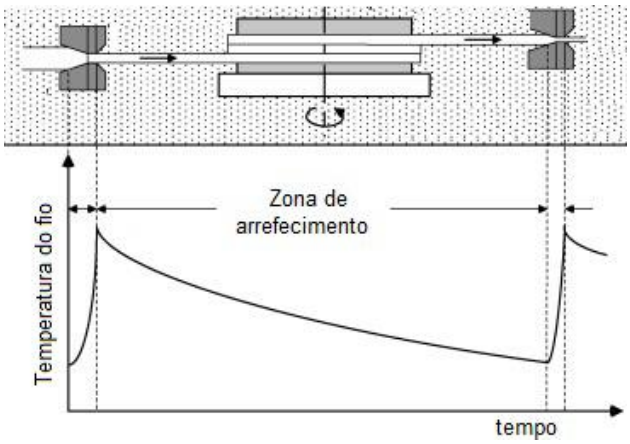


Figura 5.1: Ilustração da variação de temperatura

No entanto, a trefiladora a seco está limitada a oito passos, pelo que, a solução passou por um aumento no diâmetro de saída do fio trefilado. Na trefilagem a banho foi experimentado um aumento de número de passos, de 7 para 8 [Figura 5.6].

5.3.2 Teste na trefiladora a seco

Foi produzida uma quantidade de 12 000 kg, a uma velocidade de saída da trefiladora a seco de, aproximadamente, 12 m/s.

A tabela 5.13 apresenta a linha em que foi produzido, a data, o diâmetro de saída do fio trefilado e algumas observações relativas ao aspeto da amostra.

Tabela 5.13: Registo da produção

Amostra	Linha	Data	Observações	Diâmetro medido [mm]
F1.1	TS2	02-05-2017	Fio com bom aspeto	2,202
F1.2				2,205
F1.3		08-05-2017		2,211
F1.4				2,219
F1.5				2,227
F1.6				2,236
F1.7				2,246
F1.8		09-05-2017		2,251
F1.9				2,258
F1.10				2,256

Na tabela 5.14, encontram-se as características geométricas das fieiras utilizadas. Na primeira coluna, é indicado o passo, sendo que o passo zero corresponde à entrada do material, não correspondendo a uma passagem numa fieira. Na segunda coluna, é indicado o diâmetro nominal de saída após cada passo, sendo que, este vai aumentando com o desgaste da fieira (à exceção do passo zero). Na terceira coluna, é indicada a área da secção e na quarta a redução de área que é obtida pela fórmula 5.2 .

$$RA = \frac{A_{anterior} - A_{seguinte}}{A_{anterior}} \times 100 \tag{5.2}$$

Na quinta coluna, é indicada a redução de área total em que a diferença para a anterior é que a área de referência não é a do o passo anterior, mas sim, a do passo zero. E por fim, na última coluna, é indicado o ângulo do cone de trabalho.

Tabela 5.14: Caraterísticas do jogo de fieiras utilizado

Passo	Ø nominal	Área	RA	RA total	Ângulo cone trabalho
	[mm]	[mm^2]	[%]	[%]	°
0	5,50	23,76	-	-	-
1	4,67	17,13	27,90	27,90	16
2	4,08	13,07	23,67	44,97	16
3	3,63	10,35	20,84	56,44	14
4	3,25	8,30	19,84	65,08	14
5	2,92	6,70	19,28	71,81	14
6	2,64	5,47	18,26	76,96	12
7	2,40	4,52	17,36	80,96	12
8	2,20	3,80	15,97	84,00	12

De forma a ter um maior controlo sobre o desenvolvimento do desgaste da fieira, o diâmetro do fio à saída de cada fieira foi medido a cada 1000 kg produzidos e registado na tabela 5.15. Na última coluna, $\Delta Ø$ é a variação máxima do diâmetro do fio, ou seja, é a diferença entre o diâmetro maior e o diâmetro menor. A penúltima coluna, indica o diâmetro medido com um micrómetro de maior precisão e resulta da média de três medições da amostra retirada, daí a razão de ter mais uma casa decimal. Teoricamente, os valores desta coluna deveriam ser iguais às indicadas no 8º passo, que resulta da medição do diâmetro do fio à saída da oitava fieira .

Tabela 5.15: Evolução das fieiras da trefiladora a seco

Amostra	1º passo [mm]	2º passo [mm]	3º passo [mm]	4º passo [mm]	5º passo [mm]	6º passo [mm]	7º passo [mm]	8º passo [mm]	Ø medido (amostra) [mm]	Quant. [kg]
A1.1								2,19	2,202	1000
A1.2								2,20	2,200	1000
A1.3	4,65	4,09	3,63	3,25	2,93	2,65	2,41	2,20	2,211	1000
A1.4	4,65	4,09	3,63	3,25	2,93	2,65	2,41	2,21	2,219	1000
A1.5	4,66	4,09	3,64	3,26	2,94	2,66	2,42	2,22	2,227	1000
A1.6	4,66	4,09	3,64	3,25	2,94	2,66	2,43	2,23	2,236	1000
A1.7	4,66	4,10	3,65	3,26	2,95	2,67	2,44	2,24	2,246	1000
A1.8	4,66	4,10	3,65	3,26	2,95	2,67	2,45	2,25	2,251	1000
A1.9									2,258	1000
A.10									2,256	1000
$\Delta Ø$	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,06	0,07	0,054	

Após a produção de cerca de 10 000 kg de fio, as fieiras foram retiradas e visualizadas ao microscópio ótico [tabela 5.16].

(a) Fieira em bom estado (b) Fieira com obstrução

Figura 5.2: Comparação de uma fieira em bom estado com uma com um túnel de lubrificação

Tabela 5.16: Observações ao microscópio ótico

Ø fieira	Descrição
4,67	Observou-se bastantes riscos no cone de entrada e de trabalho; Verificou-se, também, uma fissura no cone de entrada; Paralelo e cone de saída com bom aspeto e bastante polidos; Apresenta sinais de ter trabalhado a temperatura elevada, pois verificou-se uma cor alaranjada.
4,08	Observou-se alguns riscos com geometria espiral no cone de entrada e riscos paralelos no cone de trabalho. (suspeita-se que seja falta lubrificante no cone de trabalho, pois observou-se um túnel de lubrificante [fig. 5.2b])
3,63	Observou-se bastastes riscos no cone de entrada e de trabalho; Verificou-se, também, uma rachadela no cone de entrada; Paralelo e cone de saída com bom aspeto e bastante polido; Apresenta sinais de ter trabalhado a temperatura elevada, pois verificou-se uma cor alaranjada.
3,25	Bom aspeto, apenas ligeiramente riscada em alguns pontos;
2,92	Bom aspeto, apenas ligeiramente riscada em alguns pontos;
2,64	Bom aspeto, apenas ligeiramente riscada em alguns pontos;
2,40	Apresenta alguns riscos de profundidade superior à anterior;
2,20	Bom aspeto, apenas ligeiramente riscada em alguns pontos;

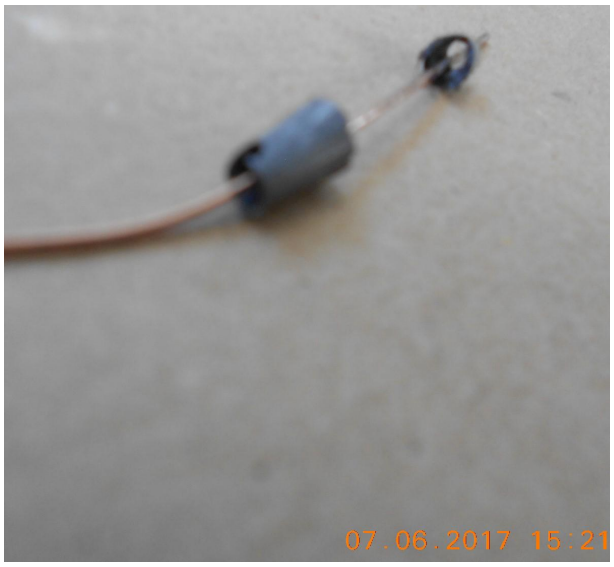


Figura 5.3: Túnel de lubrificante retirado da fieira da figura 5.2b

Lubrificante

A maior quantidade de lubrificante providenciada ao fio é realizada no primeiro passo, devido à presença de uma fieira de pressão. Caso não haja lubrificação suficiente, o restante processo será comprometido, pelo que importa retirar uma amostra após o primeiro passo (A1). Nos restantes passos não se utiliza fieiras de pressão devido ao fio trazer algum lubrificante proveniente do passo anterior pelo apenas se retirou depois uma segunda amostra (A2) à saída do endireitador, antes do fio ser enrolado na bobine, pois caso este tenha um valor aceitável, pode-se concluir que os restantes passos também estão.

Tabela 5.17: Registo de lubrificante aderido ao fio

Amostra	Ensaio	Ø Fio [mm]	P_i [g]	P_f [g]	Resíduo lubrificante [g/m^2]	Resíduo lubrificante médio [g/m^2]
A1	E1	4,6477	6,2553	6,2507	6,7159	6,1910
	E2	4,6477	7,3931	7,3896	4,3235	
	E3	4,6477	6,4250	6,4197	7,5336	
A2	E1	2,1813	3,9971	3,9930	4,3967	4,4913
	E2	2,1813	4,0272	4,0232	4,2574	
	E3	2,1813	4,0019	3,9974	4,8198	

De forma a uma maior precisão nos resultados, efetuou-se a medição do diâmetro do fio por 3 vezes, fazendo-se a média no final, daí o aparecimento de 4 casas decimais.

Verifica-se uma baixa concentração de lubrificante tanto no 1º passo como à saída, mas ainda assim dentro dos parâmetros internamente estabelecidos. No entanto, uma vez que não existe uma redução significativa de resíduo de lubrificante entre os passos, conclui-se que tal não se deve à utilização do novo jogo de fieiras [tabela 5.17].

Medição da temperatura dos cabrestantes

Tal como referido anteriormente, as diferenças de temperaturas influenciam fortemente as características do fio trefilado. Com recurso a um termómetro de infra-vermelhos, retirou-se 4 pontos de medida ao longo da superfície do fio enrolado no cabrestante, tentando que estes fossem equidistantes, tendo-se registado os dados obtidos na tabela 5.18 . De forma a ter como referência uma temperatura base, também se retirou a temperatura da superfície do cabrestante, indicado na último coluna da mesma tabela. Estes valores estão sujeitos a alguma margem de erro, uma vez que, devido às proteções de segurança da máquina, o aparelho de medição estava sujeito a inclinações que poderão ter afetado a medição.

Tabela 5.18: Registo das temperaturas nos cabrestantes

Etapa	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	$T_{cabrestante}$ [°C]
1	85	78	70	60	27
2	106	103	89	73	33
3	111	108	95	72	32
4	111	105	96	73	32
5	102	101	84	78	34
6	98	93	78	76	33
7	91	88	88	76	29
8	91	88	88	76	29

De forma a ter uma melhor perceção da evolução da temperatura, realizou-se o gráfico da figura 5.4.

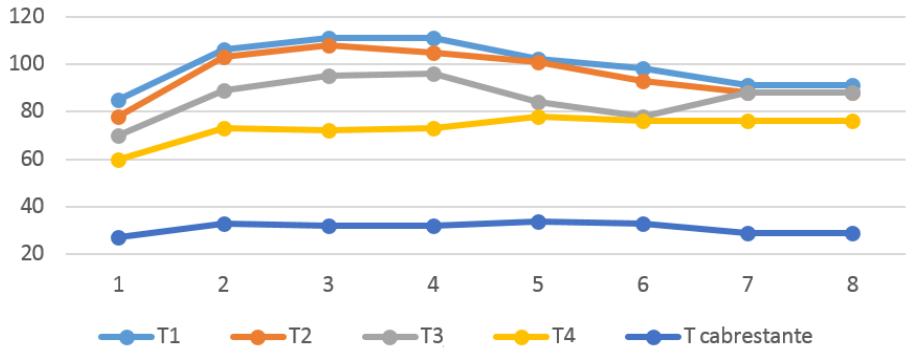


Figura 5.4: Ilustração gráfica da tabela 5.18

Apesar da medição ser pouco precisa, nota-se claramente que existe uma maior geração de calor entre o segundo e o quarto passo. Registou-se ainda a temperatura ambiente, a temperatura de entrada do fio, o diâmetro deste à saída assim com a sua velocidade [tabela 5.19].

Tabela 5.19: Registo de algumas variáveis relevantes aquando da medição das temperaturas nos cabrestantes

Temperatura ambiente [°C]	Temperatura do fio à entrada [°C]	Diâmetro do fio à saída [mm]	Velocidade de saída [m/s]
25	27	1,96	14,5

Conclusões após teste das fieiras da trefiladora a seco

O fio trefilado saiu com as caraterísticas desejadas, no entanto, nesta fase, é difícil de avaliar, só na trefilagem a banho é que se conseguirá tirar uma conclusão pois aqui o fio tem um menor diâmetro e as suas fraquezas são notadas mais claramente. Em relação às fieiras, as três primeiras apresentaram um desgaste prematuro, pelo que, talvez se deva fazer um ajuste ao jogo, alterando as reduções de área deste e consequente os ângulos do cone de trabalho.

5.3.3 Teste na trefiladora a banho

Foi analisado o comportamento das fieiras a banho, pela medição do diâmetro do fio, espessura de cobre e visualização à lupa do fio trefilado. Todo o fio foi trefilado pela trefiladora a banho nº1. A quantidade produzida foi de 12 655 kg. A velocidade de saída observada no painel de controlo situou-se entre os 13 e os 15 m/s.

Tal como na experiência anterior, aqui também se procedeu ao registo das características das tinas de lubrificante e tanque de cobreagem. [tabela 5.20].

Tabela 5.20: Registo das condições dos banhos

	Banho da decapagem Novo a 15/05		Banho da Cobreagem Novo a 15/05			*skin-pass*
	Fe (g/L)	H_2SO_4 (g/L)	Fe (g/L)	$CuSO_4$ (g/l)	H_2SO_4 (g/L)	pH
	4,81	137,96	39,53	34,33	125,15	11,14
Refª:	<50	200±100	<50	40±10	115±35	>8

A tabela 5.21 indica a data do ensaio, a massa de fio bobinado, o diâmetro de saída do fio trefilado e a espessura de cobre para cada amostra.

Tabela 5.21: Registo da produção

Amostra	Data	Massa fio bobinado [kg]	Diâmetro [mm]	Espessura de Cobre [μm]
A2.1	02/05/2017	676	1,164	0,221
A2.2	02/05/2017	1050	1,165	0,212
A2.3	02/05/2017	428	1,166	0,267
A2.4	08/05/2017	1050	1,171	0,336
A2.5	09/05/2017	1050	1,177	0,336
A2.6	09/05/2017	1050	1,176	0,218
A2.7	09/05/2017	1050	1,176	0,161
A2.8	10/05/2017	1050	1,168	0,202
A2.9	10/05/2017	1050	1,168	0,276
A2.10	10/05/2017	525	1,165	0,394
A2.11	11/05/2017	525	1,180	0,311
A2.12	11/05/2017	1050	1,163	0,325
A2.13	11/05/2017	693	1,161	0,235
A2.14	12/05/2017	1050	1,166	0,283
A2.15	12/05/2017	358	1,164	0,190

De forma a testar o novo jogo de fieiras, o esquema de enfiamento antigo, figura 5.5, foi substituído pelo da figura 5.6 , utilizando fieiras novas.

As fieiras utilizadas foram observadas ao microscópio ótico tendo-se registado o observado na tabela 5.22 .

Tabela 5.22: Observações das fieiras após produção indicada na tabela 5.21

Amostra	Observações durante a produção	Observação ao microcópio das amostras
A2.1		Um pouco riscado de um lado
A2.2	Fieiras Ø1,24 e Ø1,17 mm novas	Um pouco riscado de um lado
A2.3		Bastante riscado
A2.4		Riscado de um lado
A2.5		Um pouco riscado de um lado
A2.6		Riscado de um lado
A2.7	Jogo novo	Riscado de um lado
A2.8		Riscado
A2.9		Riscado
A2.10		Bastante riscado, picado e escuro Originou não conformidade
A2.11	Fieira nova Ø1,17 mm	Vibrado; Ø não uniforme (1,174 a 1,194 mm) Originou não conformidade
A2.12		Bom aspeto
A2.13		Um pouco riscado de um lado
A2.14		Um pouco riscado de um lado
A2.15		Um pouco riscado de um lado

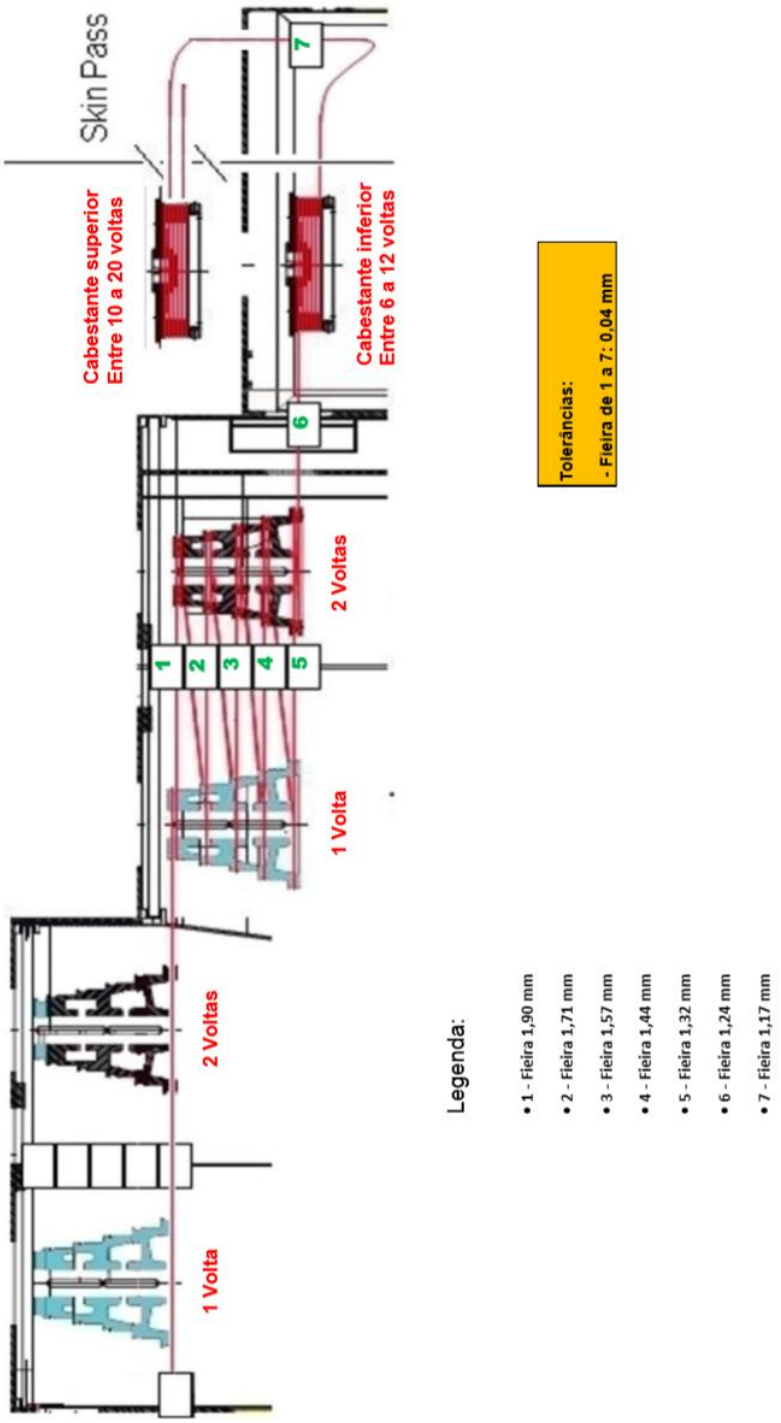


Figura 5.5: Esquema de enfiamento do fio antigo

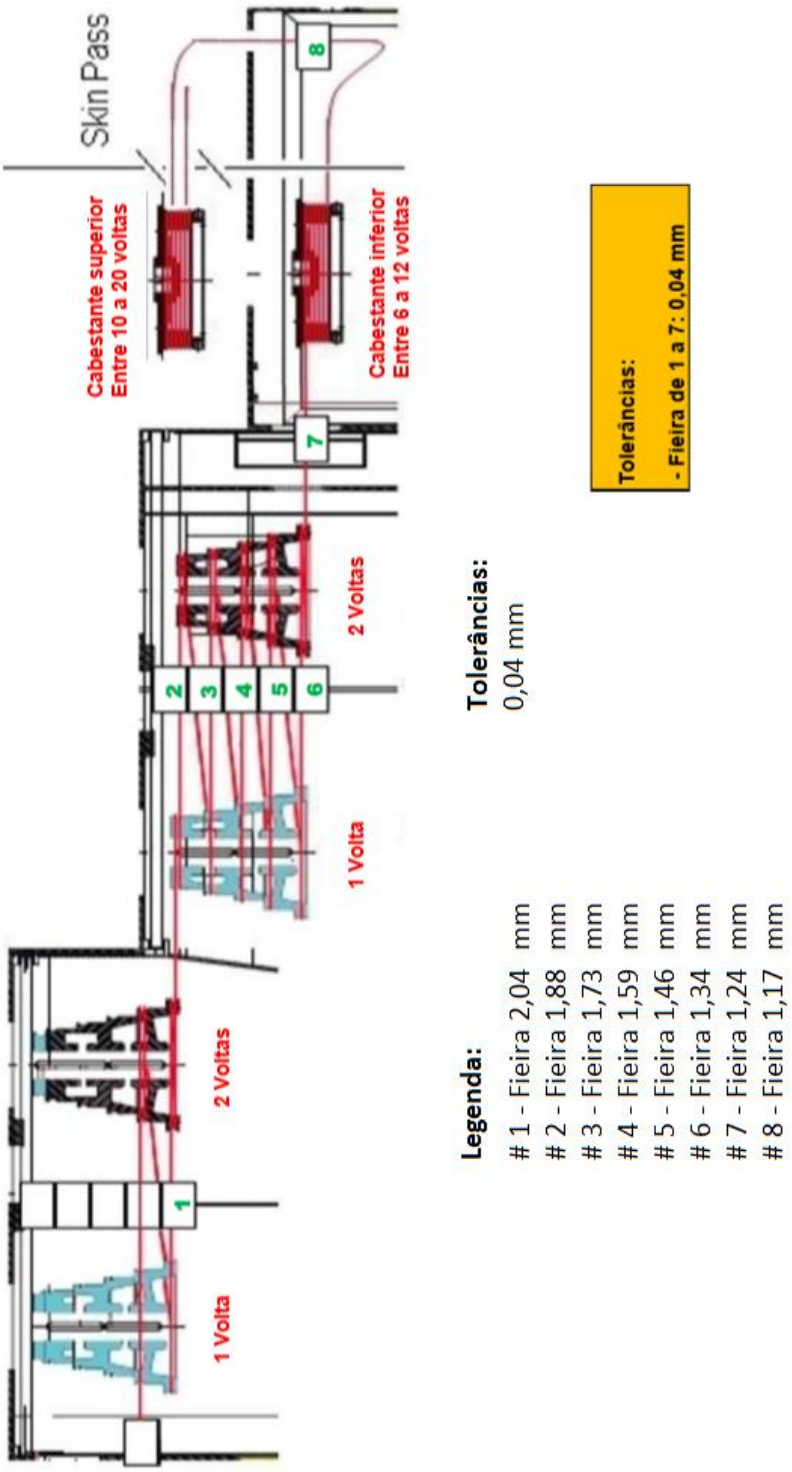


Figura 5.6: Esquema de enfiamento do fio durante o novo teste

As figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 são fotografias de algumas amostras desta experiência, podendo se consultar as restantes no apêndice que segue em anexo.

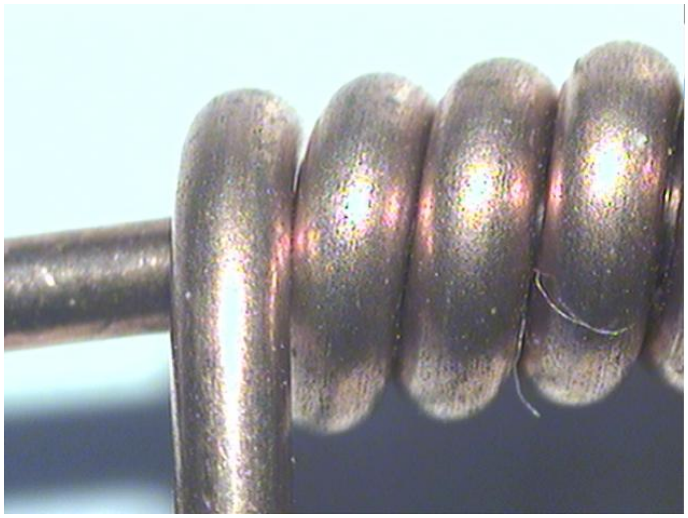


Figura 5.7: Amostra A.2.1.

As características geométricas são apresentadas na tabela 5.23 .

Tabela 5.23: Caraterísticas do jogo de fieiras utilizado

	ø Nominal	Área	RA	RA total	Ângulo do cone trabalho
Passo	[mm]	[mm^2]	[%]	[%]	°
0	2,20	3,80			10
1	2,04	3,27	14,02	14,02	
2	1,88	2,78	15,07	26,98	
3	1,73	2,35	15,32	38,16	
4	1,59	1,99	15,53	47,77	
5	1,46	1,67	15,68	55,96	
6	1,34	1,41	15,76	62,90	
7	1,24	1,21	14,37	68,23	
8	1,17	1,08	10,97	71,72	

Figura 5.8: Amostra A.2.3. - Encontra-se escuro

Na tabela 5.24 , indicam-se as quantidades produzidas por fieira, a sua média de produção e a média de fieiras necessárias para trefilar uma tonelada de fio, ao longo do projeto deste teste.

Tabela 5.24: Produção por fieira

Diâmetro	1ª Fieira [kg]	2ª Fieira [kg]	3ª Fieira [kg]	4ª Fieira [kg]	Média [kg]	Média [fieira/tonelada]
2,20	5304	5251			5277,50	0,189
2,04	5304	5251			5277,50	0,189
1,88	5304	5251			5277,50	0,189
1,73	5304	5251			5277,50	0,189
1,59	5304	5251			5277,50	0,189
1,46	5304	5251			5277,50	0,189
1,34	5304	5251			5277,50	0,189
1,24	1726	3578	5251		3518,33	0,284
1,17	1726	3578	1575	3151	2507,50	0,399
				Global	4774,26	0,209

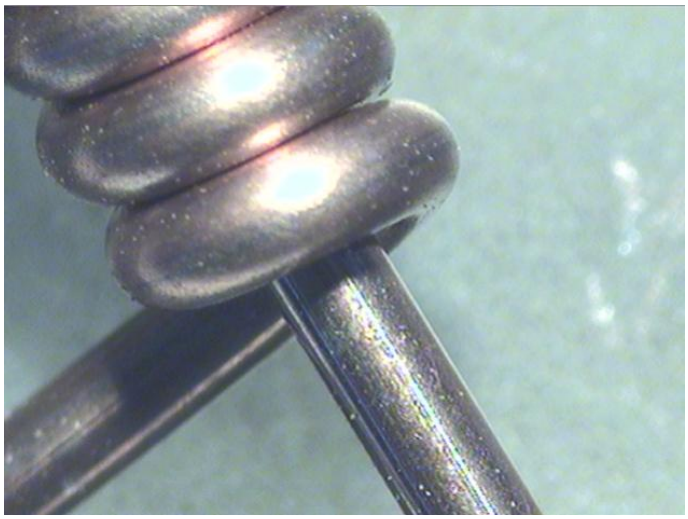


Figura 5.9: Amostra A.2.6. - falta de cobre

Conclusões após teste das fieiras da trefiladora a banho

Findo o teste, há a salientar as duas não conformidades que se poderão explicar pela utilização da fieira após o fim da sua vida útil. De uma maneira geral, o fio apresenta-se ligeiramente riscado. Uma vez que não foi possível fazer a observação das fieiras ao microscópico ótico, não se pôde concluir que os riscos observados nas amostras se devam à degradação das fieiras, apesar de ser a causa mais provável. O número de fieiras utilizadas por fio produzido, está na média dos jogos antigos.

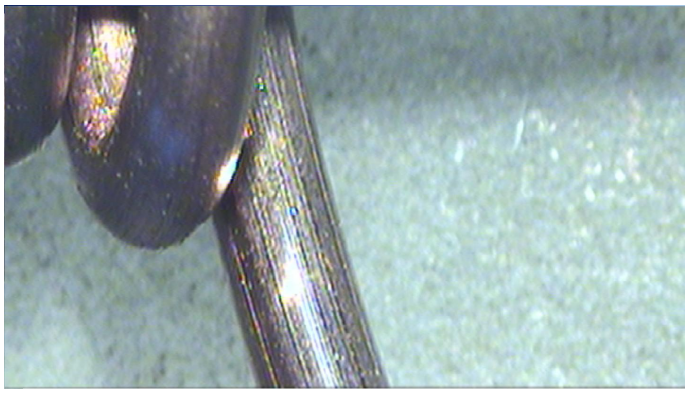


Figura 5.10: Amostra A.2.10. - riscado-Não conforme

5.3.4 Conclusões

A alteração efetuada, de aumentar o número de passos e diminuir a redução de área em cada um, do ponto de vista das variáveis analisadas, não trouxe melhorias significativas ao produto final. No entanto, após uma discussão com os operadores, estes disseram-me que o fio tinha tendência a partir menos e que tinha tendência a oscilar um pouco menos entre o cabrestante e a bobinadora.

Parte III

Conclusões e trabalhos futuros

Capítulo 6

Conclusões

A incerteza das concentrações de cada produto nos banhos e tinas em tempo real é um problema, pois, com apenas 3 análises por dia, não foi possível identificar falhas nas amostras como a baixa espessura da camada de cobre ou a sua elevada sujidade.

A alteração do processo de trefilagem, através da substituição das fieiras de núcleo de metal duro para diamante policristalino (PCD), revelou-se como uma alteração bastante positiva, no que toca ao fabrico do fio de diâmetro de 1 mm. Quanto aos restantes diâmetros, com a utilização das fieiras adequadas e sem alterações da produção programada, ir-se-á validar que a utilização de fieiras deste tipo são uma mais valia, a meu ver.

A utilização de fieiras com diâmetro nominal de 1,18 mm para a produção de fio de 1,20 mm, revelou-se também como uma mais valia, tendo até recebido alguns elogios da parte dos clientes, no que toca à estabilidade do desenrolamento do fio. Esta medida foi implementada na empresa.

Já o último teste efetuado, alterando o jogo de fieiras, não trouxe melhorias significativas, uma vez que o fio aparecia riscado constantemente.

Para melhorar a deteção de defeitos provocados pela máquina, deveria ser aplicado um sistema de anti-erro no final de cada máquina, para perceber qual foi a sua causa, e agir de imediato, para resolver o problema na raiz e não no produto acabado

Capítulo 7

Trabalhos futuros

Apesar de o objetivo principal ter sido cumprido, seria interessante explorar alguns aspetos no sentido de melhor compreender a influência de algumas variáveis e promover uma melhoria da produção. Sugere-se, então,o seguinte trabalho futuro:

- Testar a viabilidade da utilização de outros lubrificantes, tanto na trefiladora a seco como na a banho.
- Realizar um sistema de monitorização de dados em tempo real das características das tinas (temperatura, nível pH, concentrações dos componentes químicos, de entre outros).
- Desenvolver um sistema de medição das temperaturas da superfície dos cabrestantes.
- Realizar os mesmos testes realizados nesta dissertação, mas alterando os jogos de fieiras e consequentemente as reduções de área, ângulo de trabalho e todas a várias inerentes a esta alteração.

Bibliografia

[1] BUTTON, S. T. Trefilação: Programa de educação continuada. São Paulo, ABM, 2001.

[2] WRIGHT, R. Tips from Wiredrawing 101SM. Wire and Cable Technology International, 2002.

[3] EDER, A. E. Influência do teor de nitrogênio na trefilação de aço equivalente ao ABNT 1013. Dissertação de mestrado, UFRGS, 2006.

[4] BRUSIUS, Jr. William. Análise da Lubrificação Seca para Trefilação e Proposta de Padronização de Lubrificantes para Arame de Médio Carbono. Porto Alegre. 2009. 33 folhas. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

[5] SANTOS, C.; METZ, M.; AZEVEDO, J. A.; ROCHA, A., Influência dos Parâmetros do Processo de Trefilação no Empenamento de Barras do Aço SAE 9254. Cusco, 2007

[6] http://antaac.org.mx/assets/10.-theory-of-wiredrawing.pdf, consultado a 30/10/2017

[7] Caddell, R. M. and A. G. Atkins. The Influence of Redundant Work When Drawing Rods through Conical Dies, Journal of Engineering for Industry, Vol. 90, pp. 411-419, 1968.

[8] Pocket Guide for Ferrous Drawing Practice, Ferrous Drawing Committee: The Wire Association International, Inc., Guilford, Connecticut, 1988.

[9] Lewis, D. and H. J. Godfrey. Back Pull in Wire Drawing, Wire and Wire Products, Vol. 24, pp. 873-885, October 1949.

[10] McClellan, G. D. S. Some Friction Effects in Wire Drawing, Journal of the Institute of Metals, Vol. 81, No. , pp. 1-13, September 1952

[11] Wistreich, J. G. The Fundamentals of Wire Drawing, Metallurgical Reviews, Vol. 3, No. 10, 1958

[12] SCHEY, J. A. Metal deformation processes. 2.ed. New York: Marcel Dreckker Inc., 1972

[13] Wilson, N. A. Cooling of Steel Wire During Continuous Drawing, Wire and Wire Products, Vol. 29, October 1954

[14] L. Lihua, S. Jie, and W. Huan, Failure analysis procedure of steel wire drawing fracture, in Proc. 13th ICF, 2013

[15] Shinohara, T., Yoshida, K., 2005a. Deformation analysis of surface crack in rolling and wire drawing. JSME Int. 48, 335-340.

Parte IV

Anexos

Apêndice A

Fotos às amostras realizadas pelas fieiras testadas no capítulo 5.2

Figura A.1: Amostra F.1.1

Figura A.2: Amostra F.1.3

Figura A.3: Amostra F.1.3

Figura A.4: Amostra F.1.3

Figura A.5: Amostra F.1.4

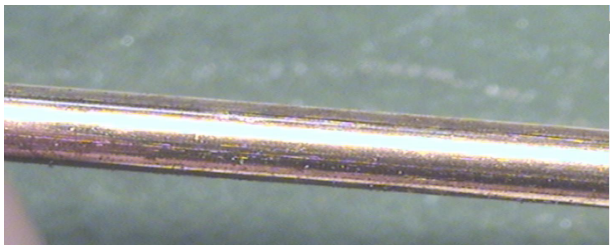


Figura A.6: Amostra F.1.4

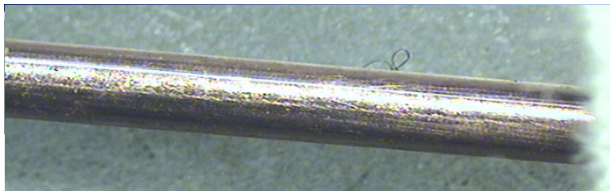


Figura A.7: Amostra F.1.4

Figura A.8: Amostra F.1.4

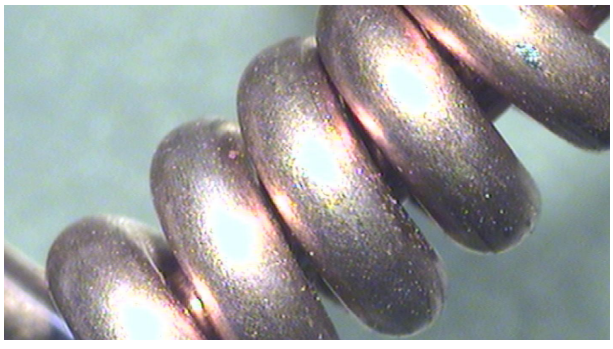


Figura A.9: Amostra F.1.4

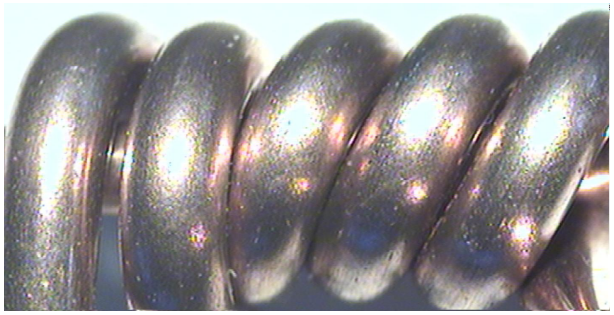


Figura A.10: Amostra F.2.1

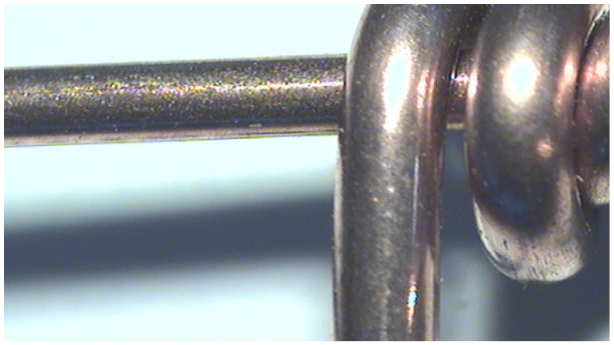


Figura A.11: Amostra F.2.1

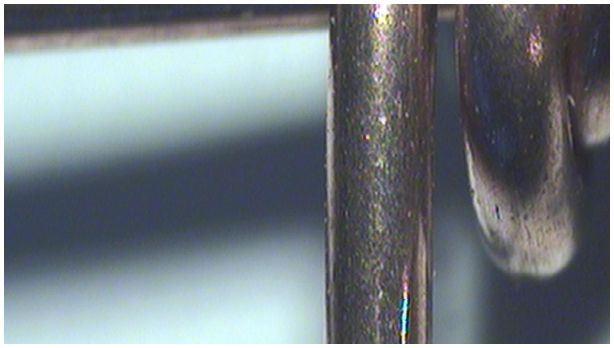


Figura A.12: Amostra F.2.1

Figura A.13: Amostra F.2.1

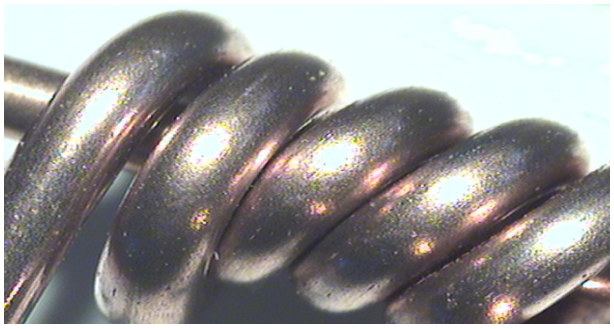


Figura A.14: Amostra F.2.1

Figura A.15: Amostra F.2.1

Figura A.16: Amostra F.2.1

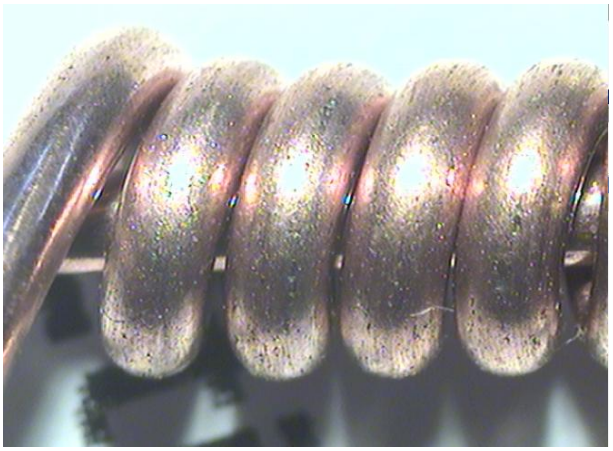


Figura A.17: Amostra F.5.1

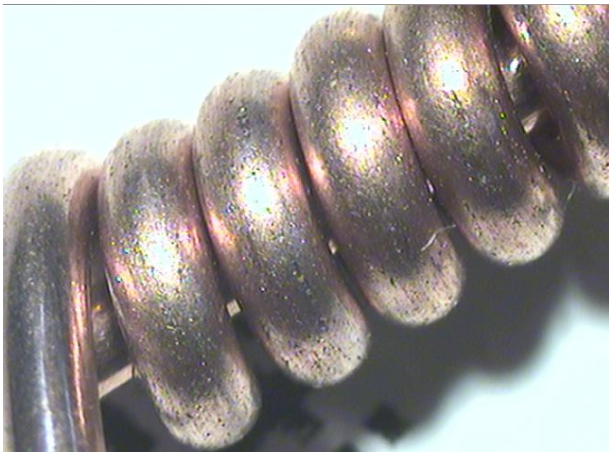


Figura A.18: Amostra F.5.1

Figura A.19: Amostra F.5.1

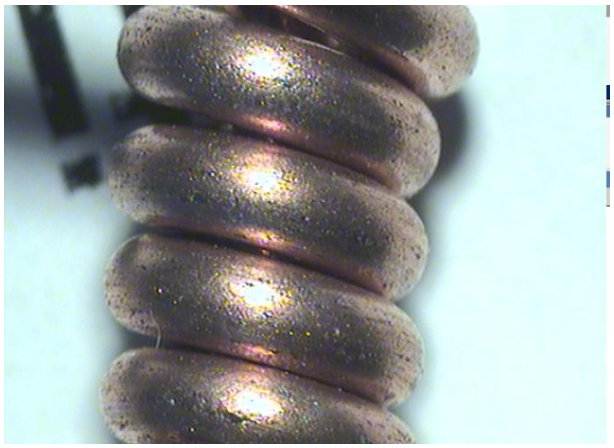


Figura A.20: Amostra F.5.1

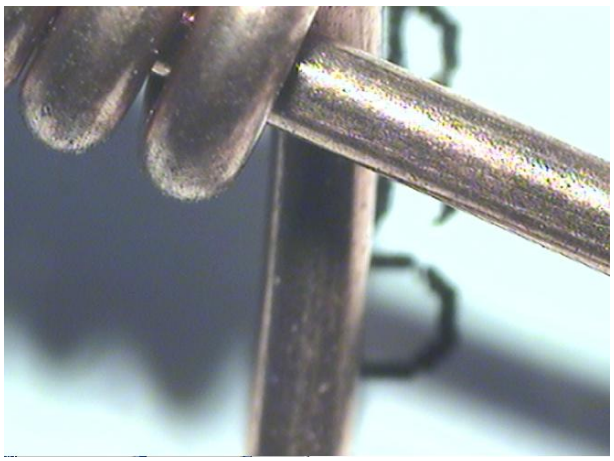


Figura A.21: Amostra F.5.1

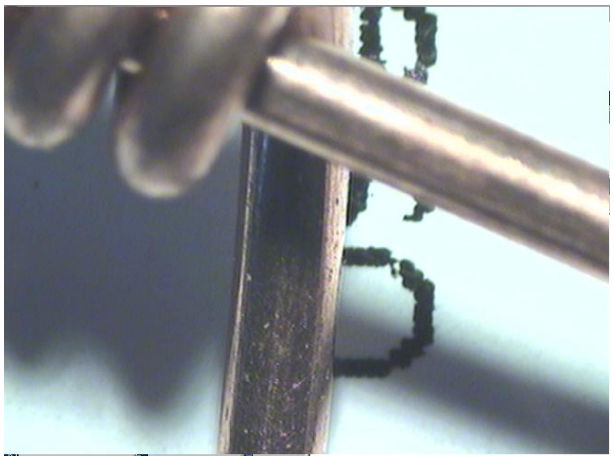


Figura A.22: Amostra F.5.1

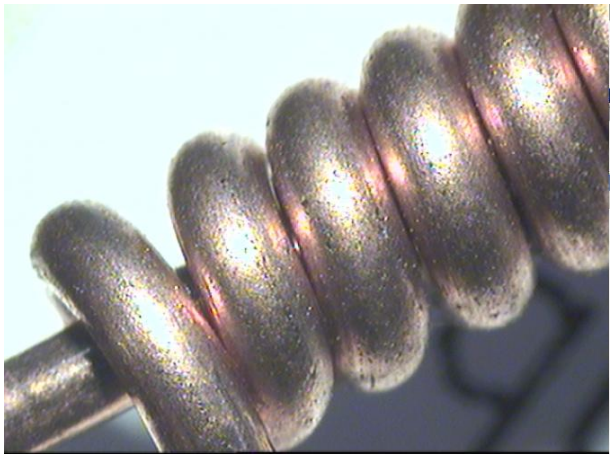


Figura A.23: Amostra F.5.1

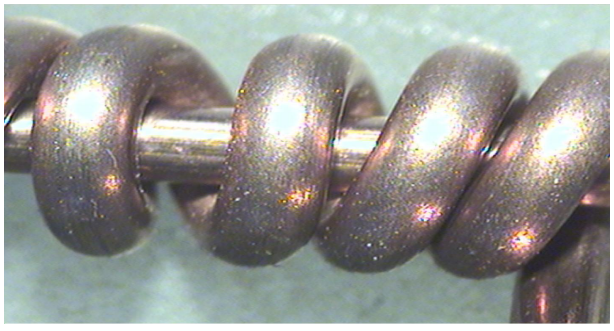


Figura A.24: Amostra F.3.1

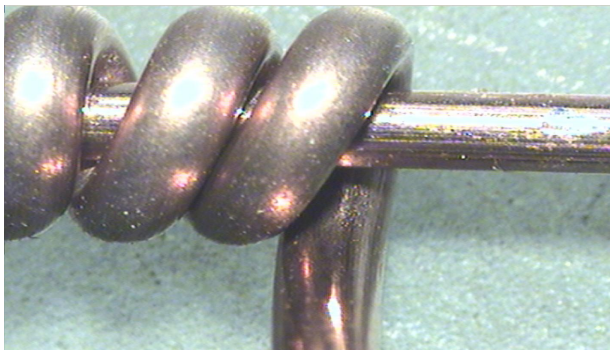


Figura A.25: Amostra F.3.1

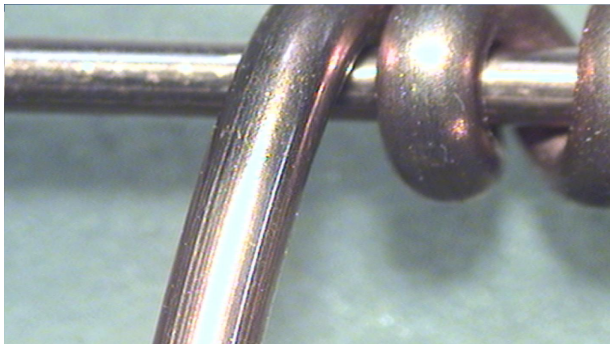


Figura A.26: Amostra F.3.1

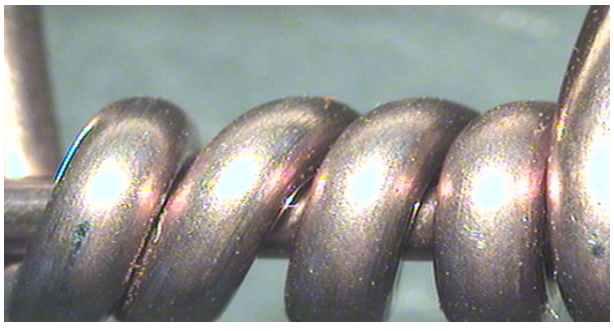


Figura A.27: Amostra F.3.1

Figura A.28: Amostra F.3.1

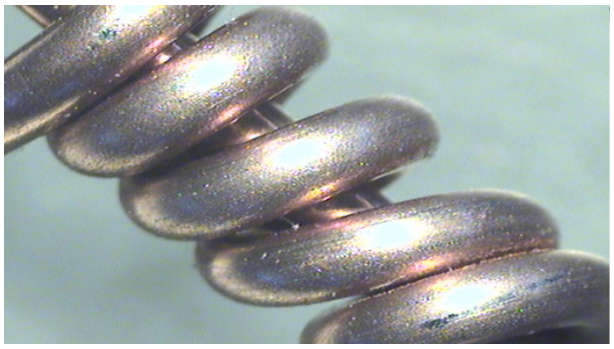


Figura A.29: Amostra F.3.1

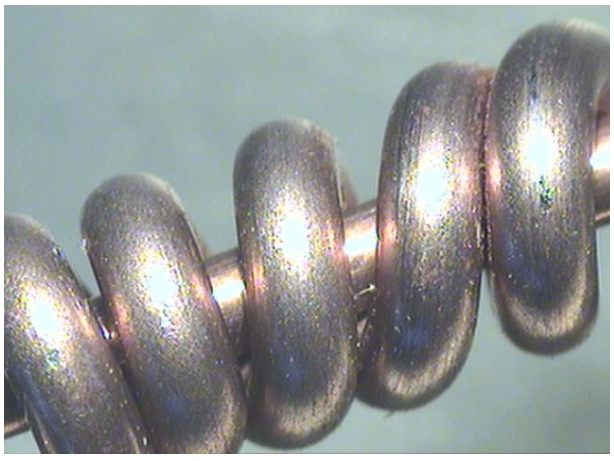


Figura A.30: Amostra F.3.2

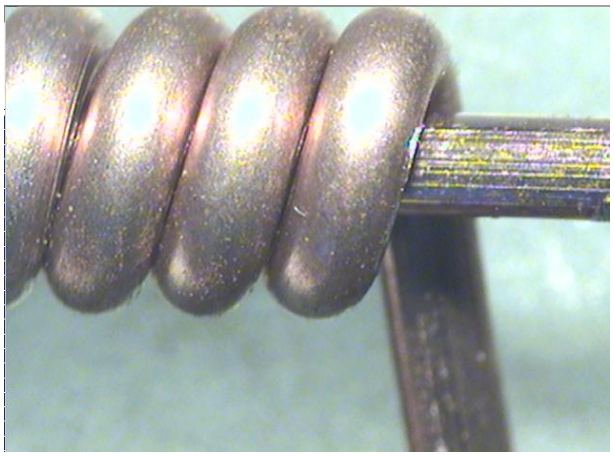


Figura A.31: Amostra F.3.2

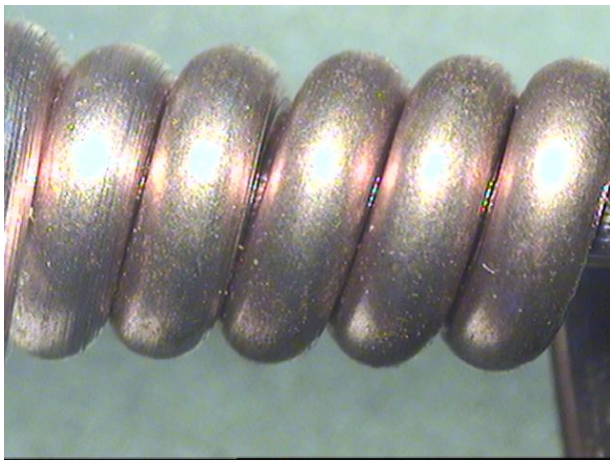


Figura A.32: Amostra F.3.2

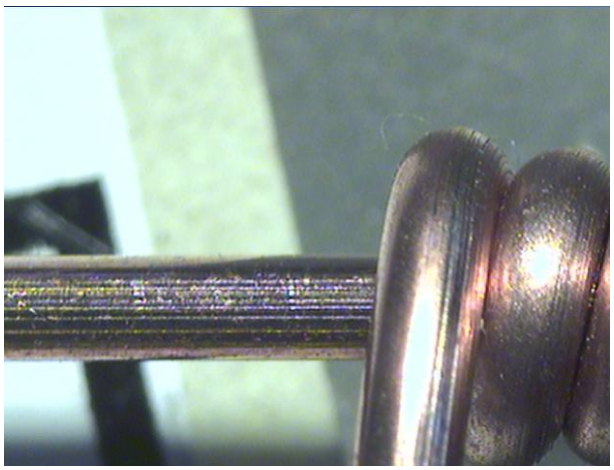


Figura A.33: Amostra F.3.2

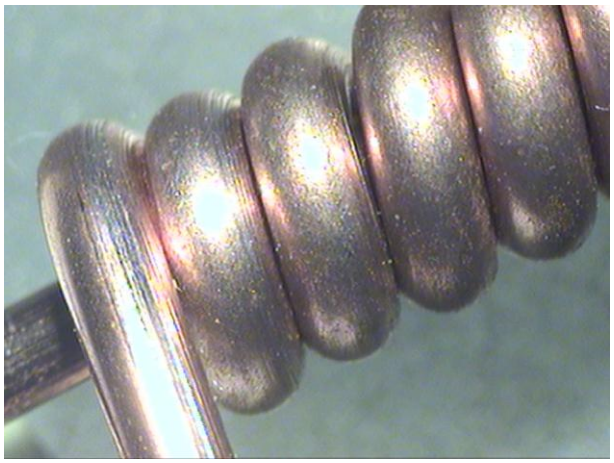


Figura A.34: Amostra F.3.2

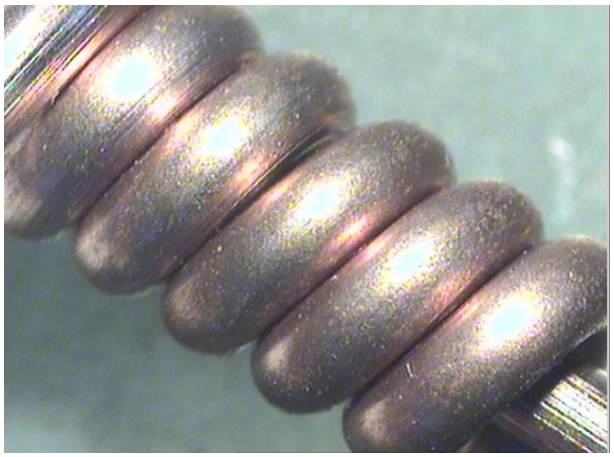


Figura A.35: Amostra F.3.2

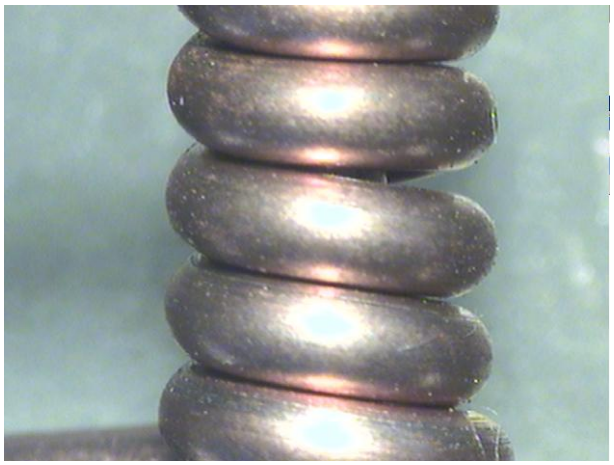


Figura A.36: Amostra F.3.2

Figura A.37: Amostra F.3.3

Figura A.38: Amostra F.3.3

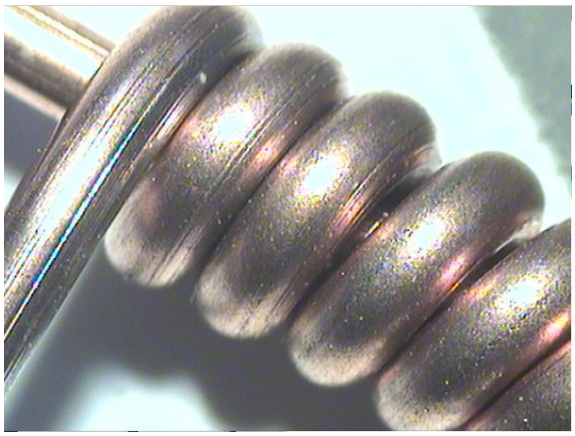


Figura A.39: Amostra F.3.3

Figura A.40: Amostra F.3.3

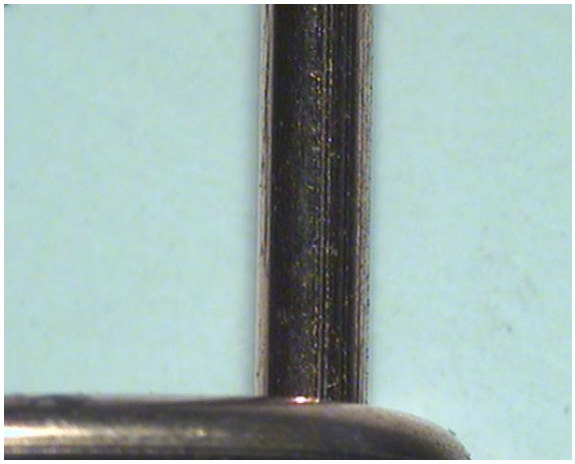


Figura A.41: Amostra F.3.3

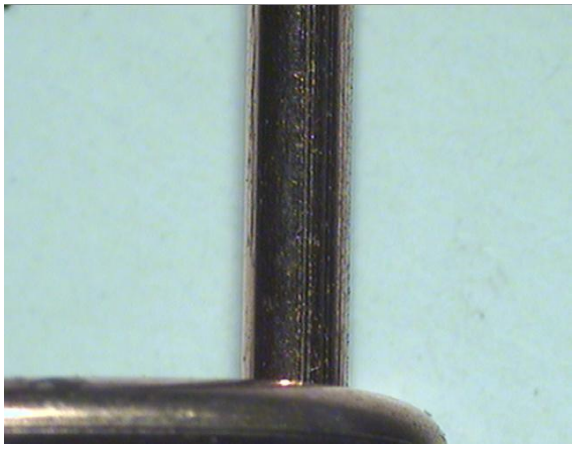


Figura A.42: Amostra F.3.3

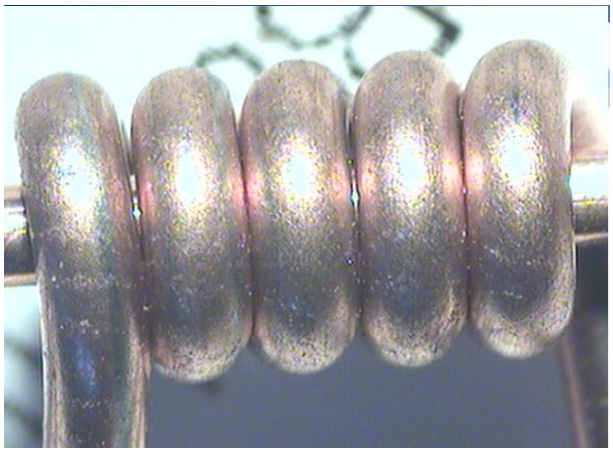


Figura A.43: Amostra F.5.2

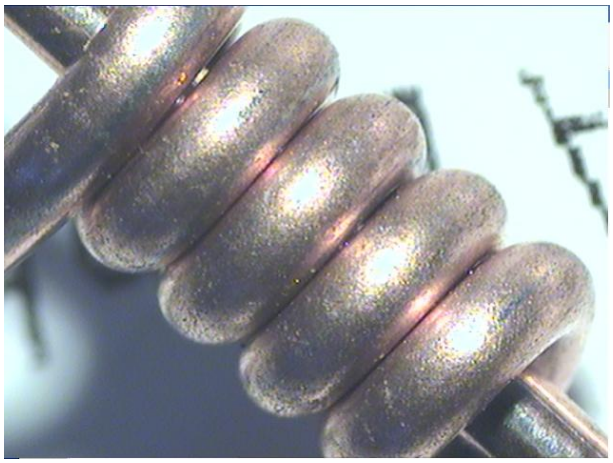


Figura A.44: Amostra F.5.2

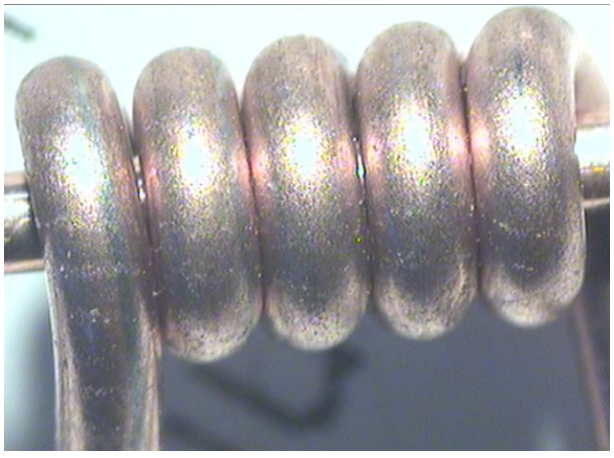


Figura A.45: Amostra F.5.2

Figura A.46: Amostra F.5.2

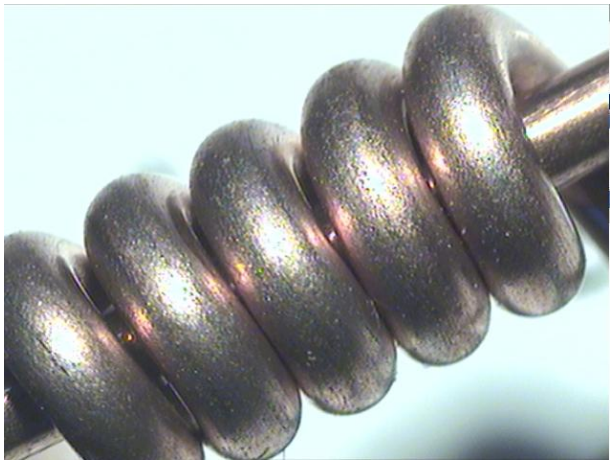


Figura A.47: Amostra F.3.4

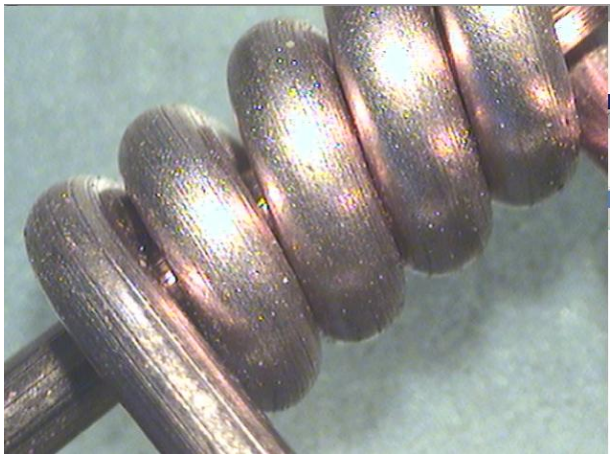


Figura A.48: Amostra F.3.4

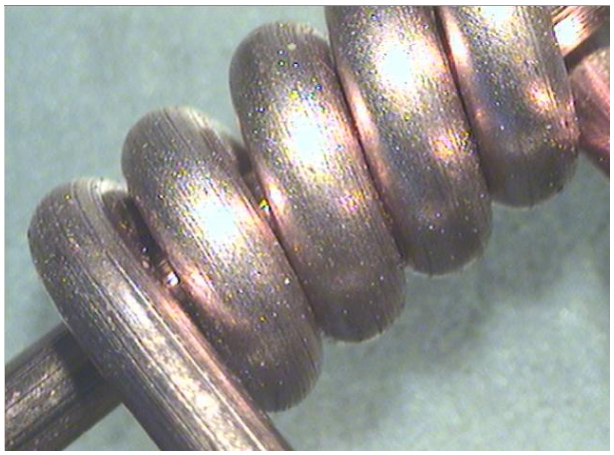


Figura A.49: Amostra F.3.4

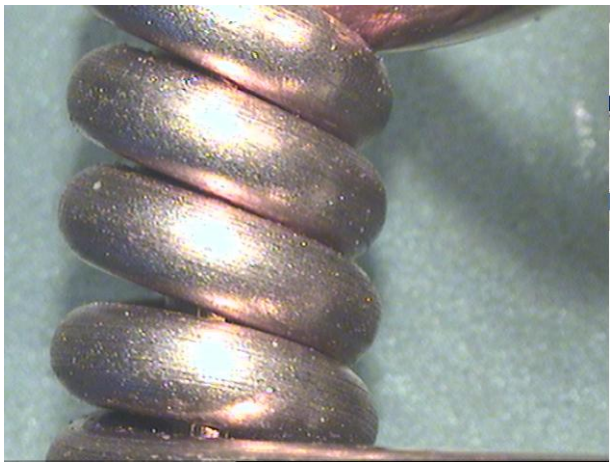


Figura A.50: Amostra F.3.4

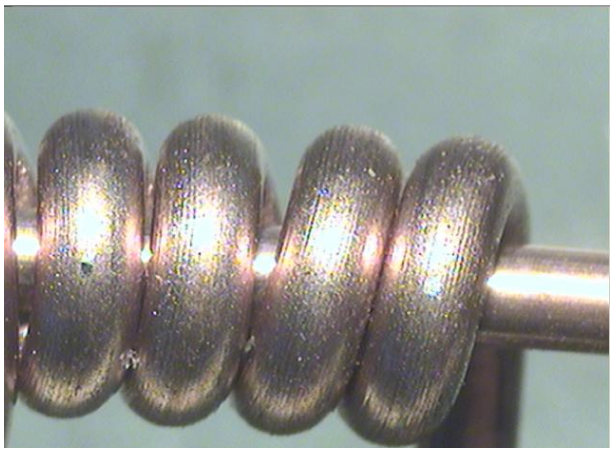


Figura A.51: Amostra F.3.4

Figura A.52: Amostra F.5.3

Figura A.53: Amostra F.5.3

Figura A.54: Amostra F.5.3

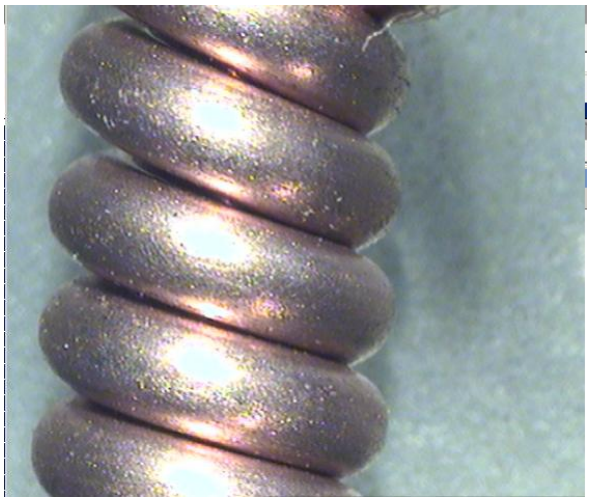


Figura A.55: Amostra F.5.3

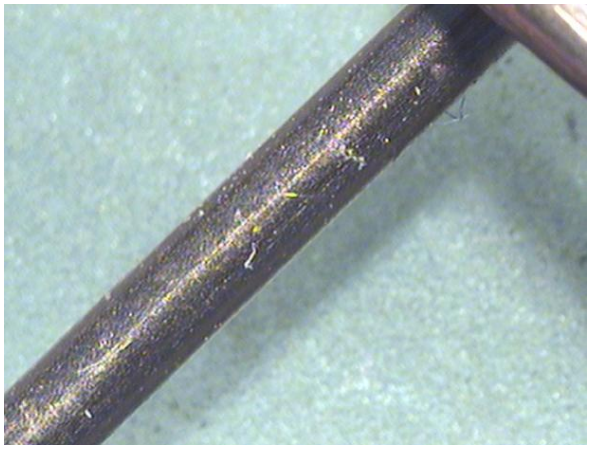


Figura A.56: Amostra F.5.3

Figura A.57: Amostra F.5.3

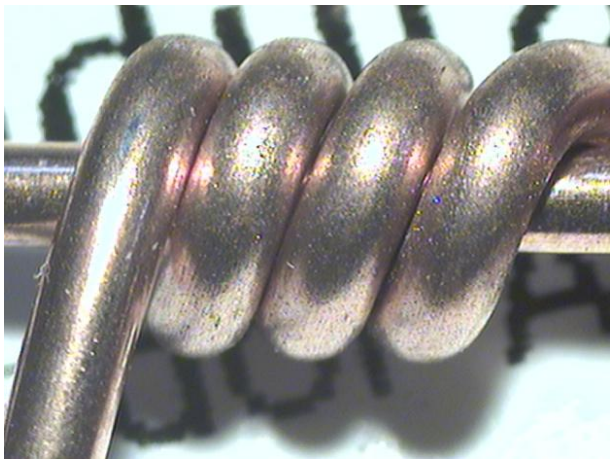


Figura A.58: Amostra F.5.4

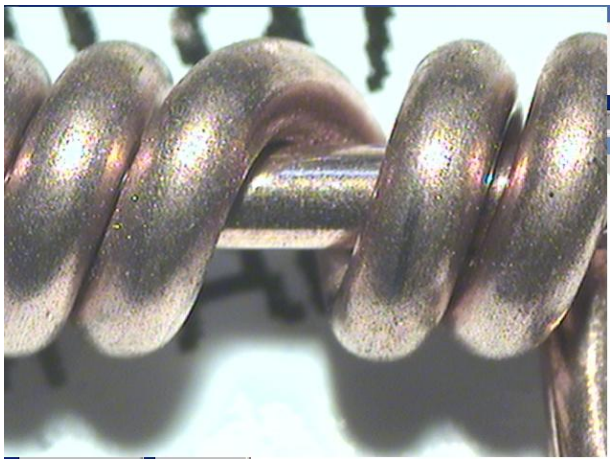


Figura A.59: Amostra F.5.4

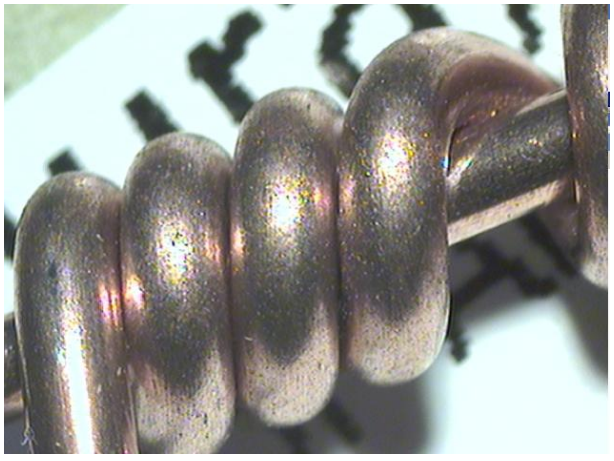


Figura A.60: Amostra F.5.4

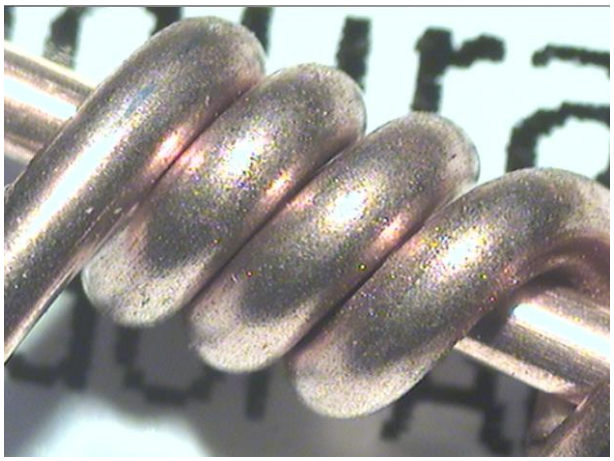


Figura A.61: Amostra F.5.4

Figura A.62: Amostra F.4.1

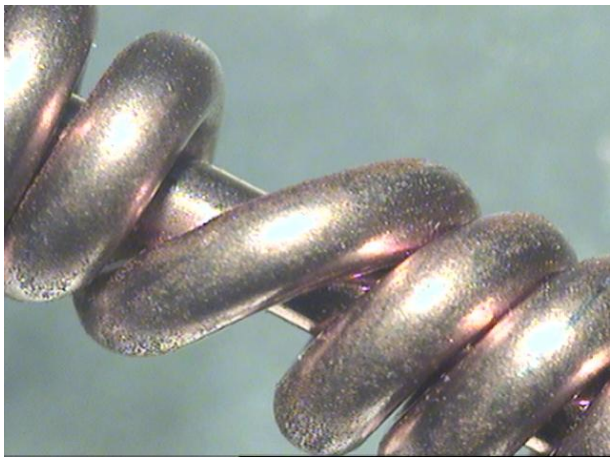


Figura A.63: Amostra F.4.1

Figura A.64: Amostra F.4.1

Figura A.65: Amostra F.4.1

Figura A.66: Amostra F.4.1

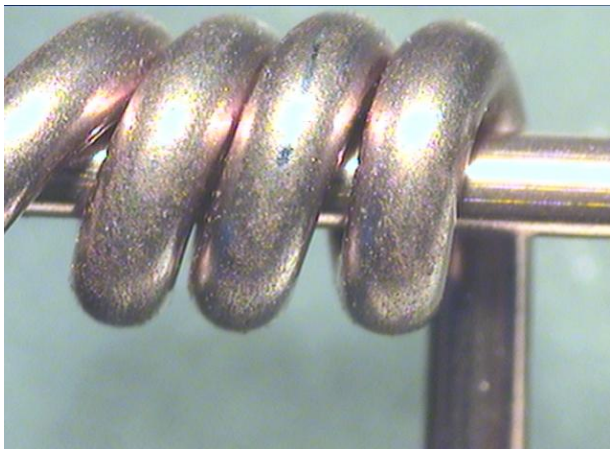


Figura A.67: Amostra F.5.4

Figura A.68: Amostra F.4.2

Apêndice B

Fotos às amostras realizadas pelas fieiras testadas no capítulo 5.3

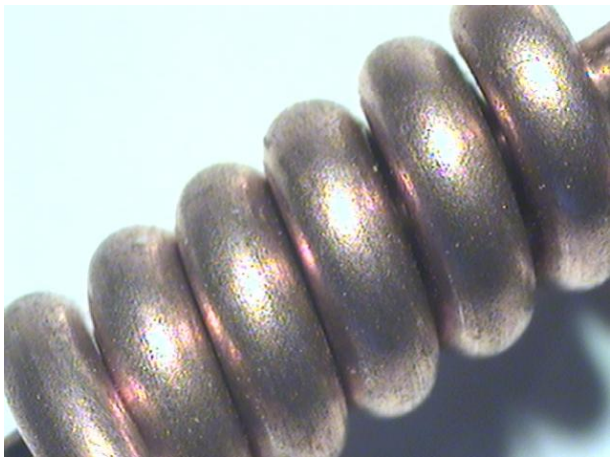


Figura B.1: Amostra A.2.1

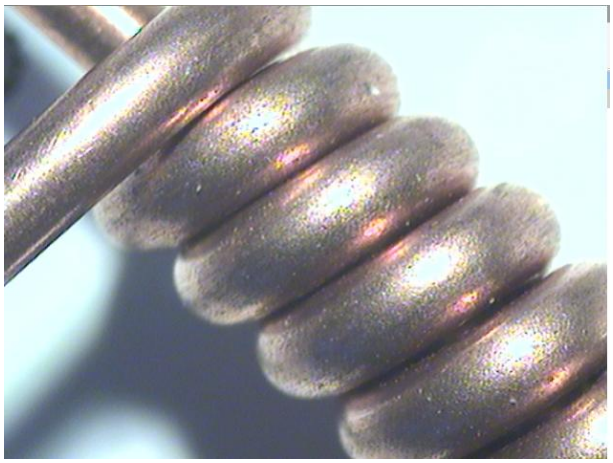


Figura B.2: Amostra A.2.1

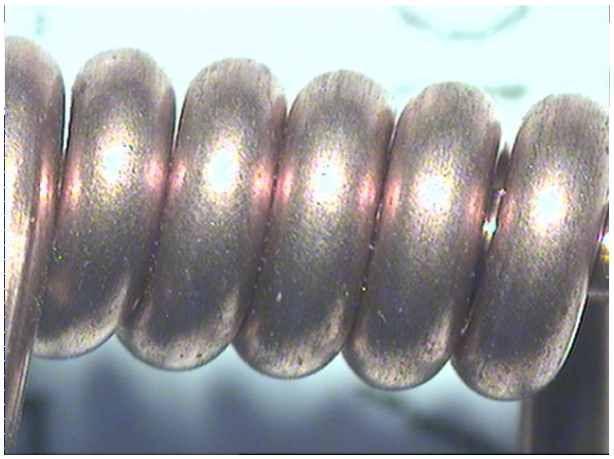


Figura B.3: Amostra A.2.1

Figura B.4: Amostra A.2.2

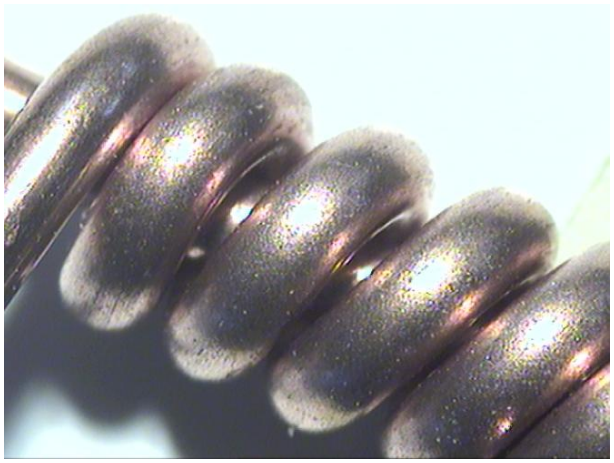


Figura B.5: Amostra A.2.2

Figura B.6: Amostra A.2.2

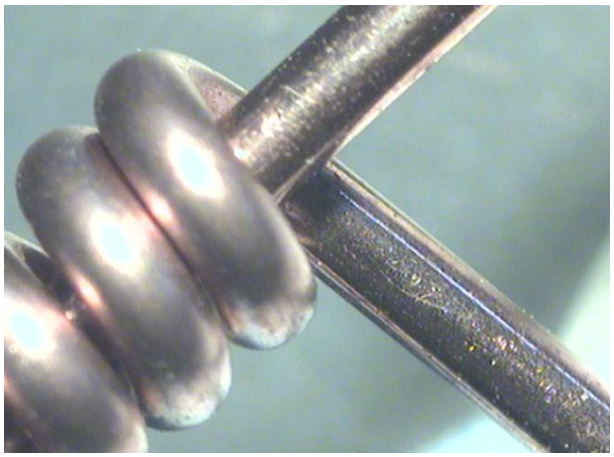


Figura B.7: Amostra A.2.2

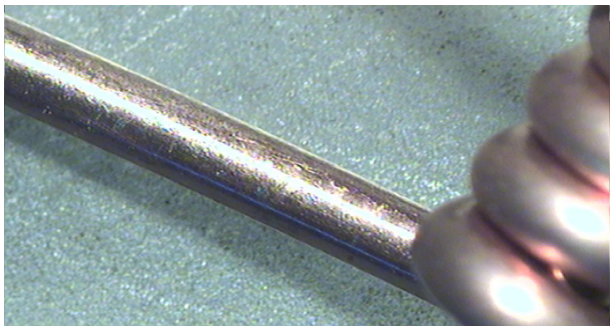


Figura B.8: Amostra A.2.3

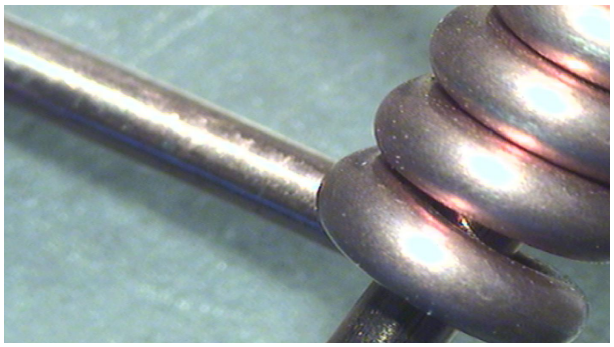


Figura B.9: Amostra A.2.3

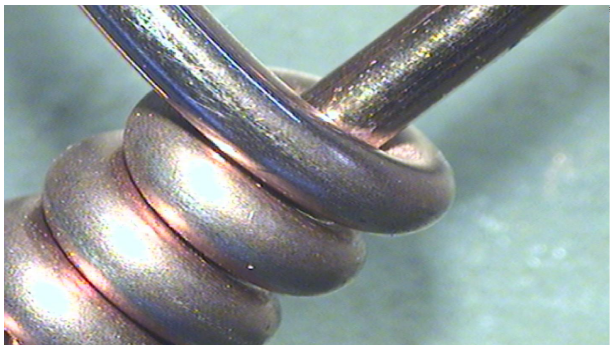


Figura B.10: Amostra A.2.3

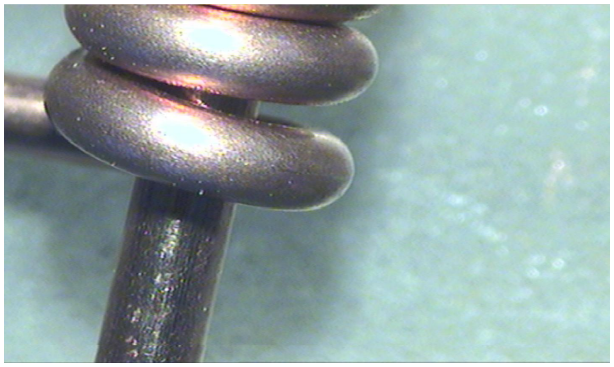


Figura B.11: Amostra A.2.3

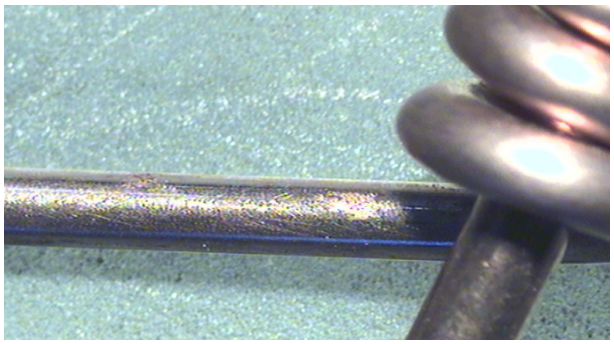


Figura B.12: Amostra A.2.4

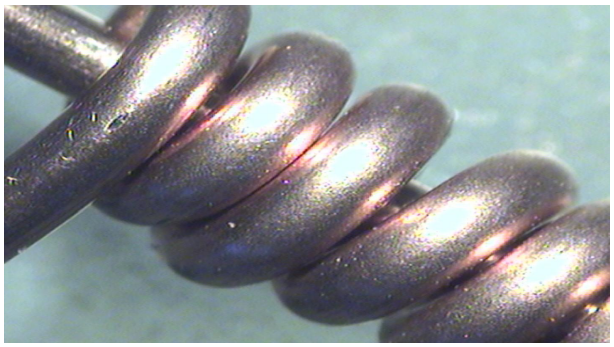


Figura B.13: Amostra A.2.4

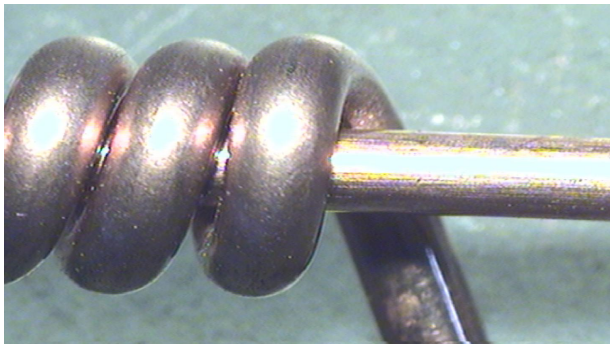


Figura B.14: Amostra A.2.4

Figura B.15: Amostra A.2.4

Figura B.16: Amostra A.2.4

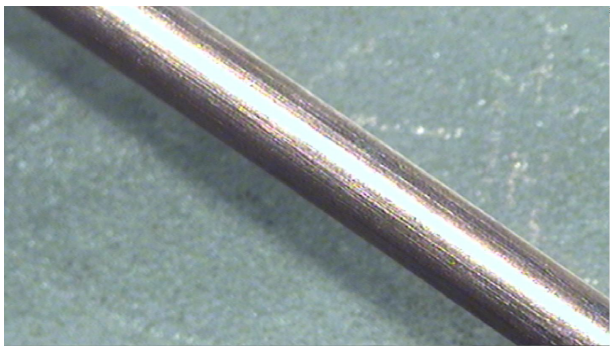


Figura B.17: Amostra A.2.4

Figura B.18: Amostra A.2.4

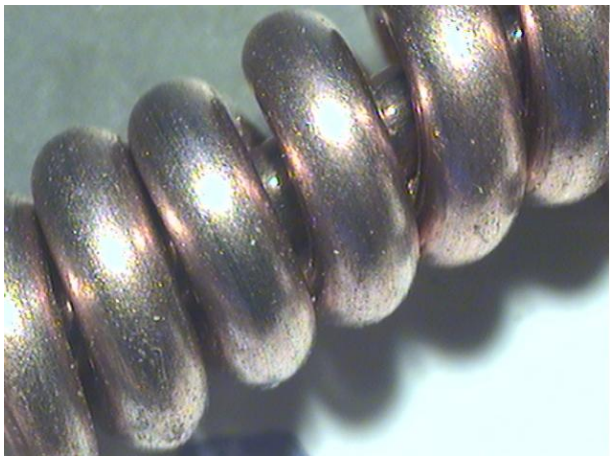


Figura B.19: Amostra A.2.5

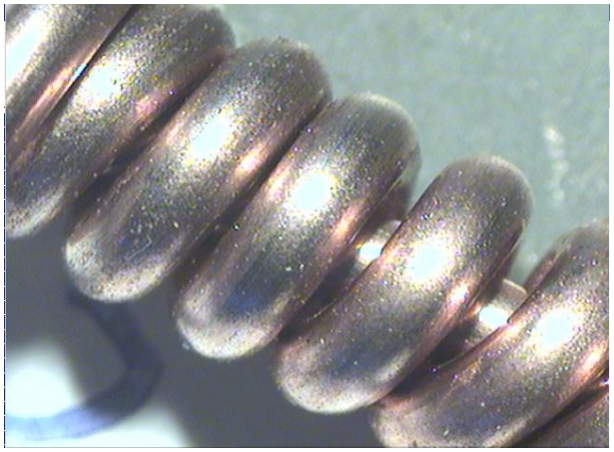


Figura B.20: Amostra A.2.5

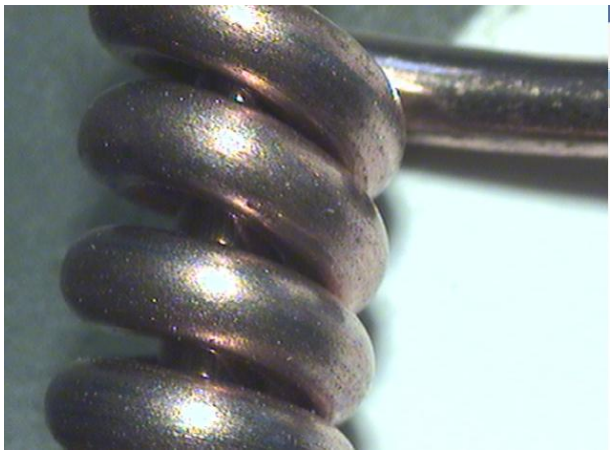


Figura B.21: Amostra A.2.5

Figura B.22: Amostra A.2.5

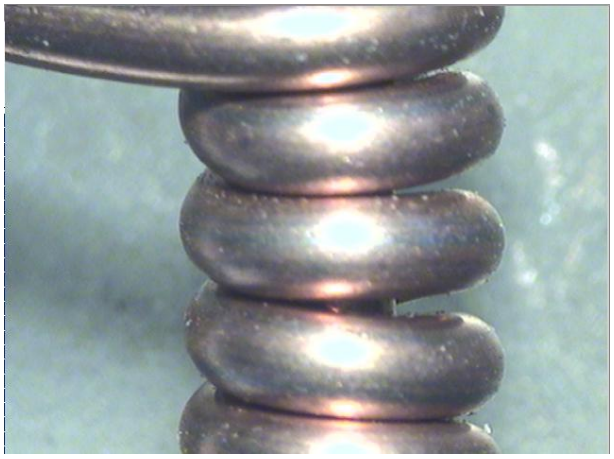


Figura B.23: Amostra A.2.6

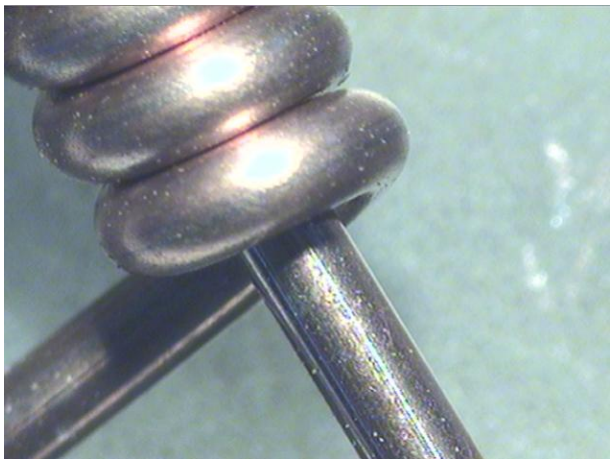


Figura B.24: Amostra A.2.6

Figura B.25: Amostra A.2.6

Figura B.26: Amostra A.2.6

Figura B.27: Amostra A.2.6

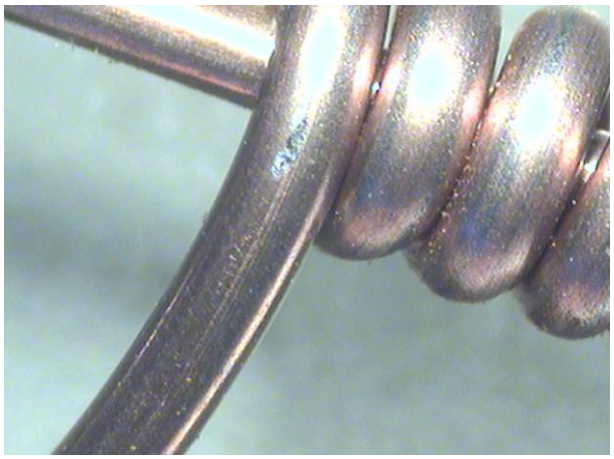


Figura B.28: Amostra A.2.6

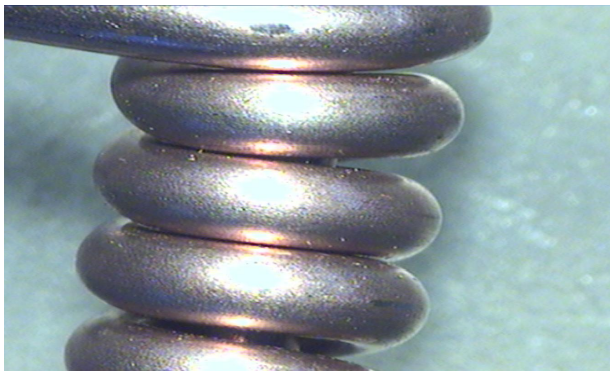


Figura B.29: Amostra A.2.7

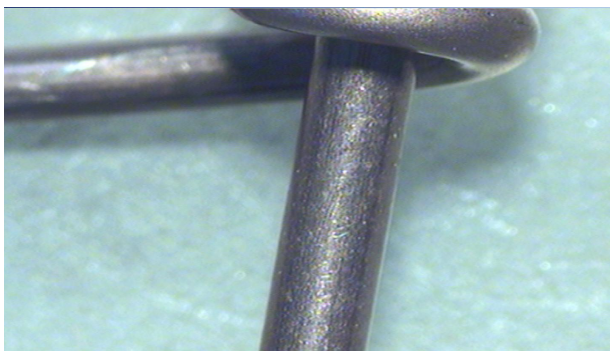


Figura B.30: Amostra A.2.7

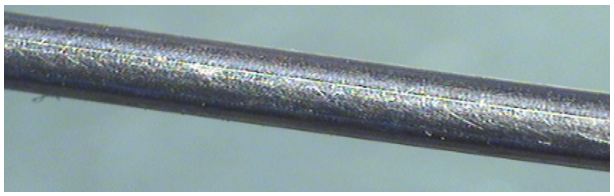


Figura B.31: Amostra A.2.7

Figura B.32: Amostra A.2.7

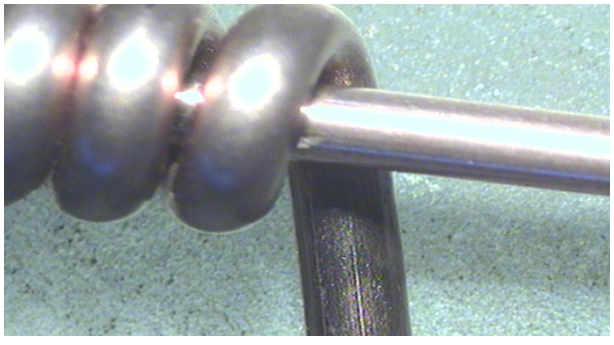


Figura B.33: Amostra A.2.7

Figura B.34: Amostra A.2.7

Figura B.35: Amostra A.2.8

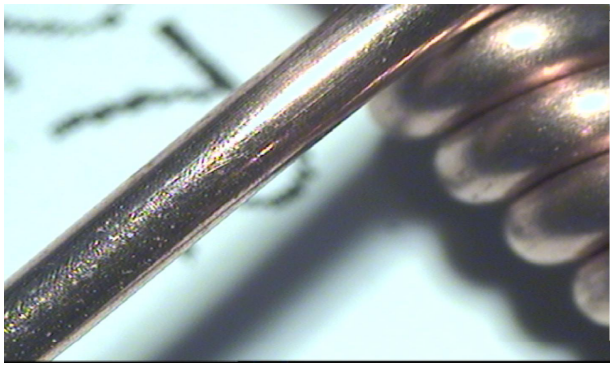


Figura B.36: Amostra A.2.8

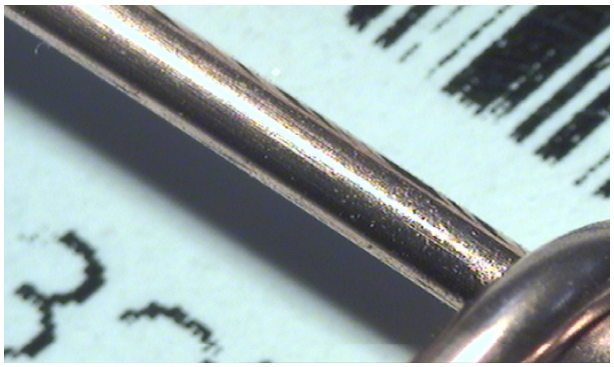


Figura B.37: Amostra A.2.8

Figura B.38: Amostra A.2.8

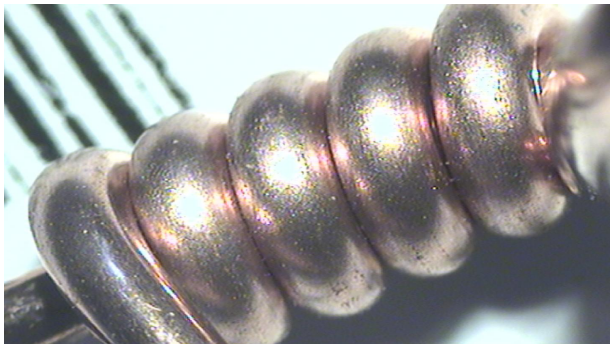


Figura B.39: Amostra A.2.8

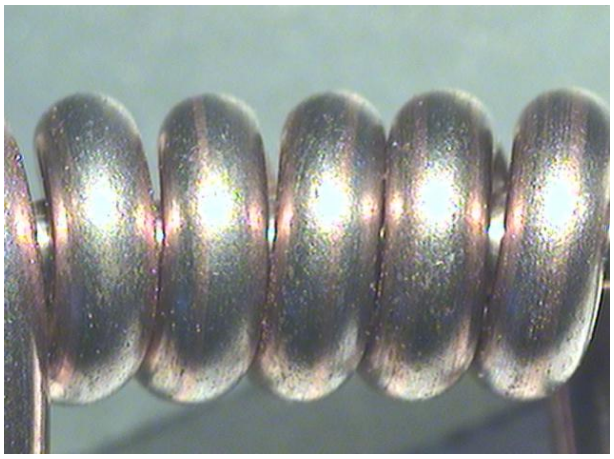


Figura B.40: Amostra A.2.9

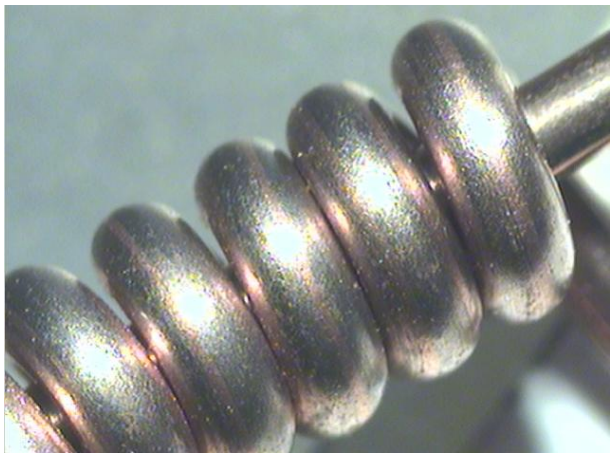


Figura B.41: Amostra A.2.9

Figura B.42: Amostra A.2.9

Figura B.43: Amostra A.2.9

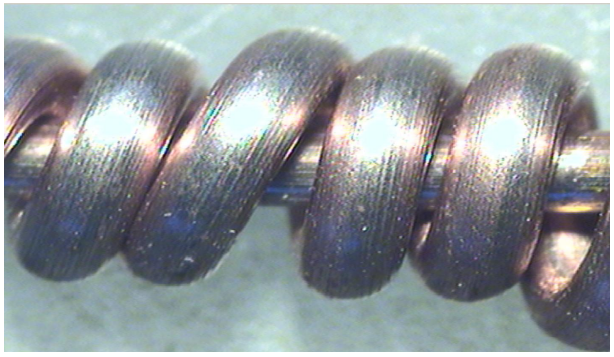


Figura B.44: Amostra A.2.10

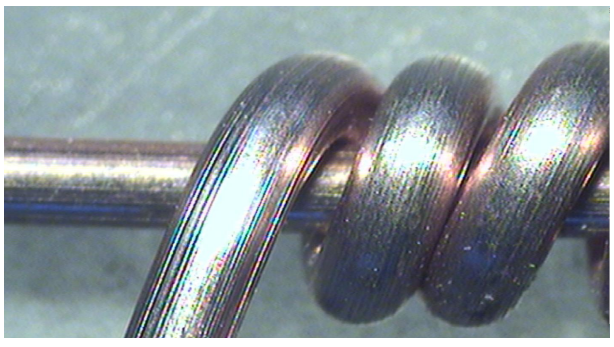


Figura B.45: Amostra A.2.10

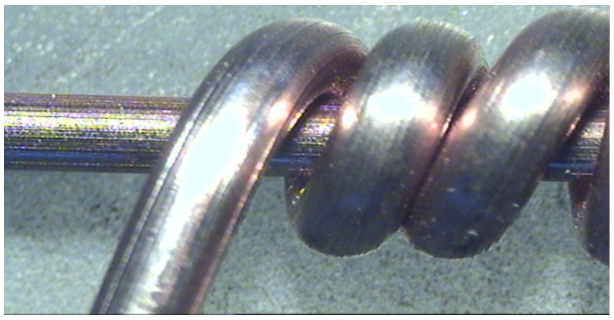


Figura B.46: Amostra A.2.10

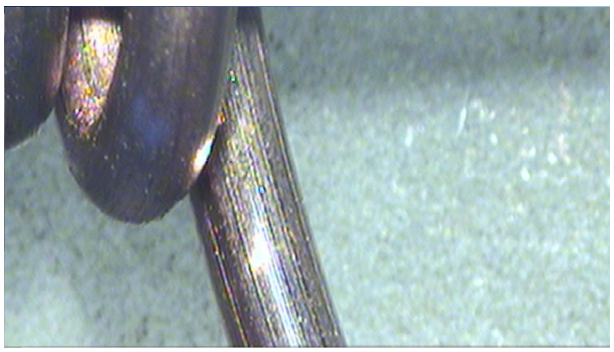


Figura B.47: Amostra A.2.10

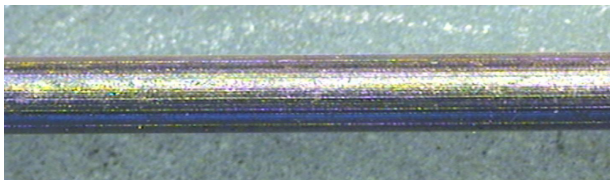


Figura B.48: Amostra A.2.10

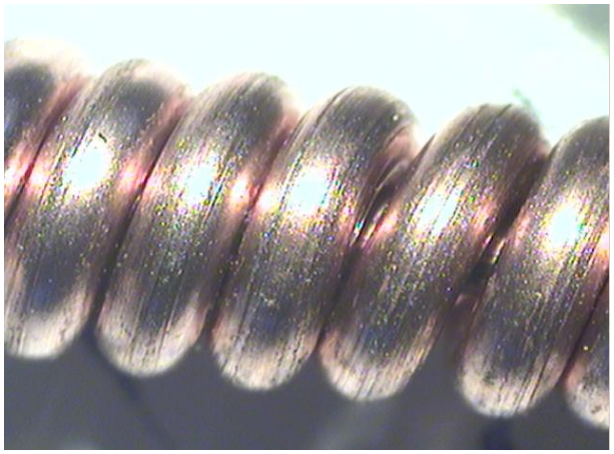


Figura B.49: Amostra A.2.11

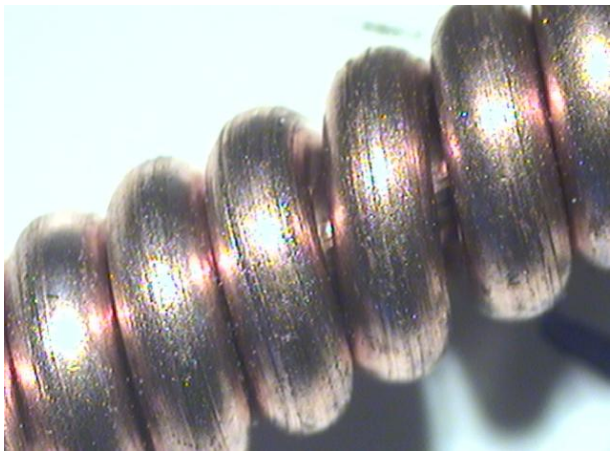


Figura B.50: Amostra A.2.11

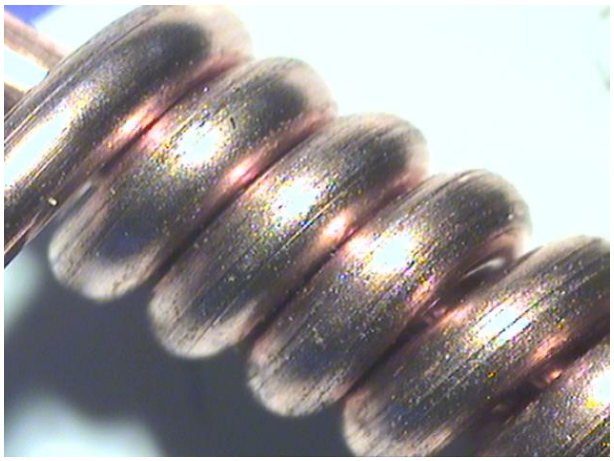


Figura B.51: Amostra A.2.11

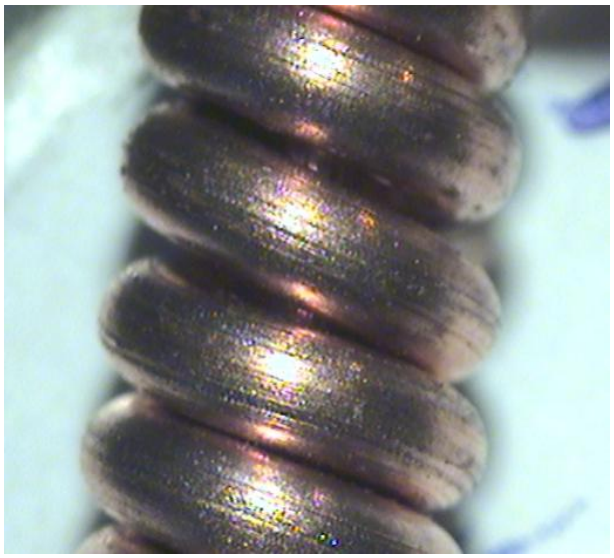


Figura B.52: Amostra A.2.11

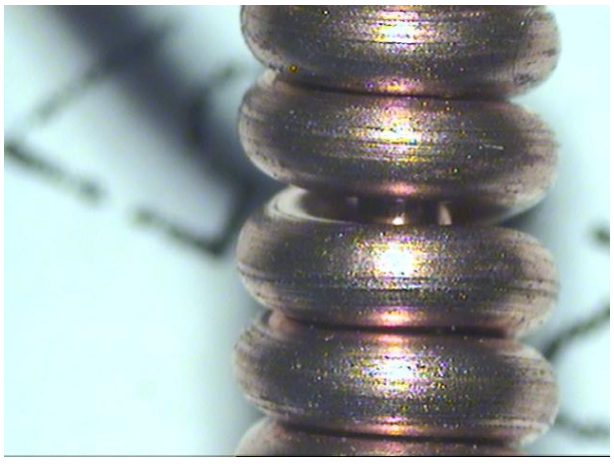


Figura B.53: Amostra A.2.11

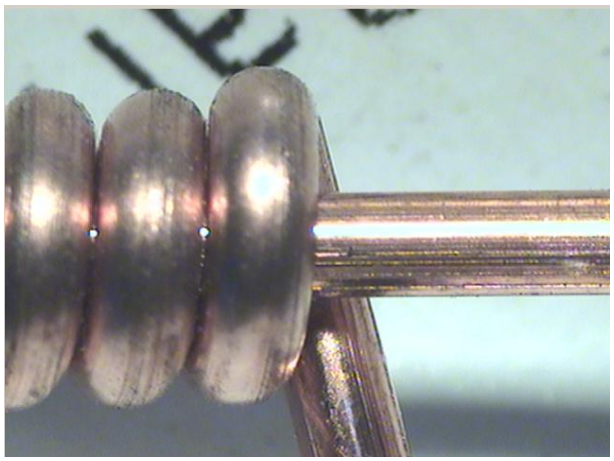


Figura B.54: Amostra A.2.11

Figura B.55: Amostra A.2.12

Figura B.56: Amostra A.2.12

Figura B.57: Amostra A.2.12

Figura B.58: Amostra A.2.12

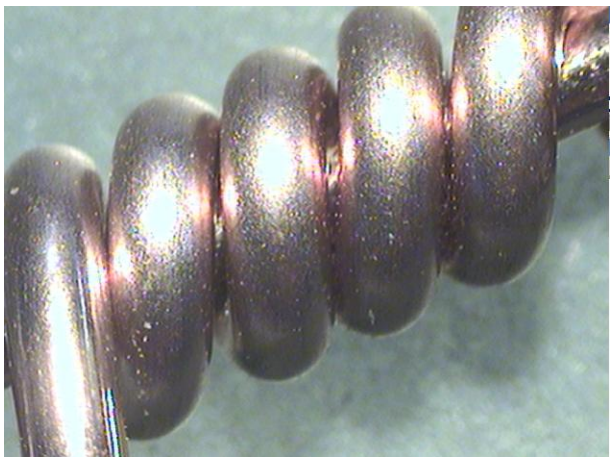


Figura B.59: Amostra A.2.12

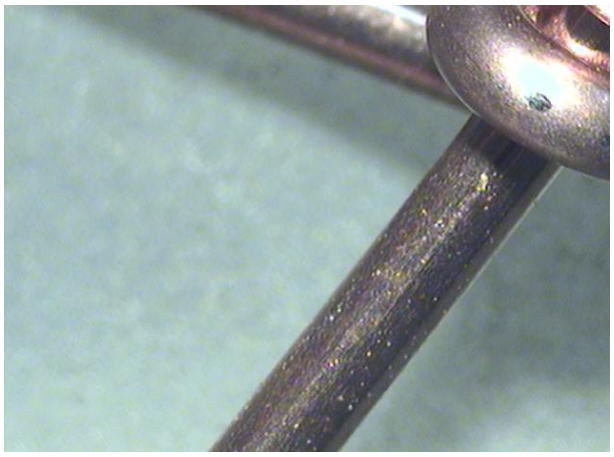


Figura B.60: Amostra A.2.12

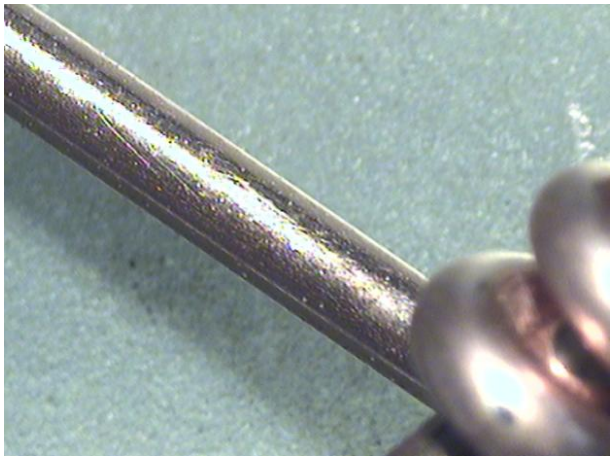


Figura B.61: Amostra A.2.12

Figura B.62: Amostra A.2.13

Figura B.63: Amostra A.2.13

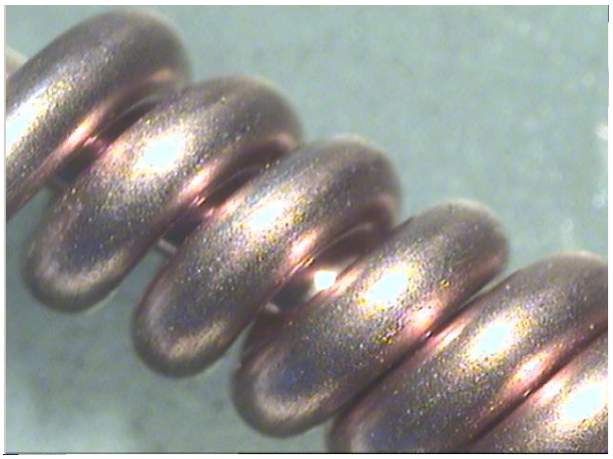


Figura B.64: Amostra A.2.13

Figura B.65: Amostra A.2.13

Figura B.66: Amostra A.2.14

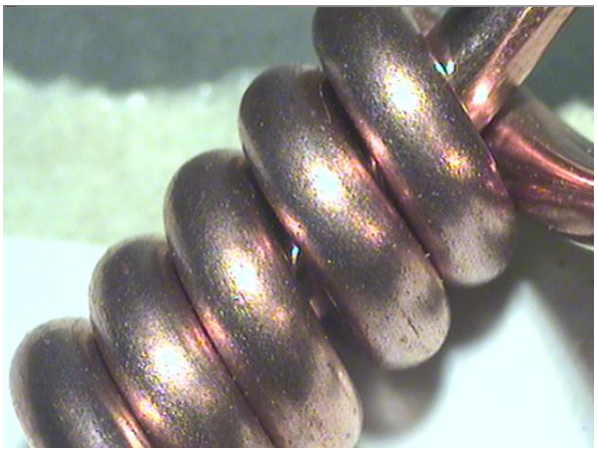


Figura B.67: Amostra A.2.14

Figura B.68: Amostra A.2.14

Figura B.69: Amostra A.2.14

Figura B.70: Amostra A.2.15

Figura B.71: Amostra A.2.15

Figura B.72: Amostra A.2.15

Figura B.73: Amostra A.2.15

Figura B.74: Amostra A.2.15

Figura B.75: Amostra A.2.15

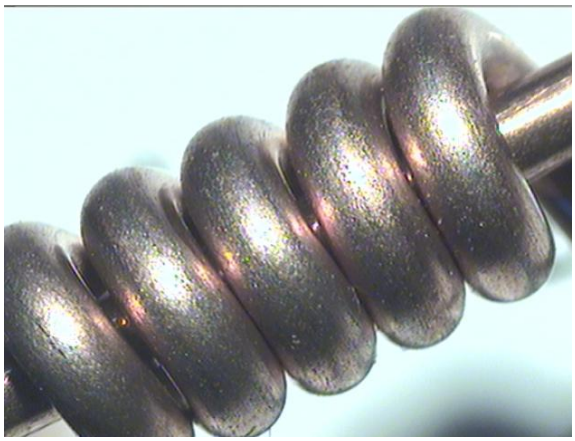


Figura B.76: Amostra A.2.15