

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DO PROCESSO DE RECOZIMENTO EM LINHA DE GALVANIZAÇÃO –
CARACTERIZAÇÃO E IMPLICAÇÕES INERENTES AO ARRASTE DE CHUMBO

Marcelo Franzkowiak Stahlschmidt

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DO PROCESSO DE RECOZIMENTO EM LINHA DE GALVANIZAÇÃO –
CARACTERIZAÇÃO E IMPLICAÇÕES INERENTES AO ARRASTE DE CHUMBO

MARCELO FRANZKOWIAK STAHLSCHMIDT
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2010

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos, IFRS – Caxias do Sul

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGE3M/UFRGS

Dr. Wagner Viana Bielefeldt, PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a Paula e a Clara, pessoas especiais em minha vida e que, em muitos momentos, abdicaram de seu lazer para que eu pudesse dar prosseguimento a este trabalho. Também dedico este agradecimento a minha mãe e minha irmã, por terem sido ao longo dos anos um grande alicerce e base da minha educação e do que sou hoje em dia. Não poderia deixar de agradecer a Leila, Djalmar, Lucia, Cristina e Mauro, pelos inúmeros momentos que passamos juntos e discussões enriquecedoras nos mais diversos assuntos.

Em especial, deixo um grande e profundo agradecimento e reconhecimento ao meu pai, um grande amigo, que deixou muitas saudades e que me ensinou muitas coisas durante o período em que convivemos. A ti pai, um grande abraço e um beijo.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Afonso Reguly, pelo apoio, orientação e discussão relativos ao desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

As amigas e profissionais da área de galvanização Lilian de Azevedo Maria e Ana Mallet, por sua inestimável contribuição ao longo de todos estes anos em que trabalhei com galvanização e pelo aprendizado que proporcionaram.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1.0 INTRODUÇÃO	3
2.0 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 Chumbo.....	7
2.2 Epidemiologia.....	8
2.3 Exposições não-ocupacionais ao chumbo metálico.....	9
2.4 Toxicologia do chumbo	9
2.5 Vias de penetração no organismo	10
2.6 Prevenção.....	10
2.7 Trefilação de arames e lubrificação.....	11
2.8 Trefilação com microcassete (laminação a frio).....	14
2.9 Energia de Superfície dos Materiais	20
2.9.1 Teoria do ângulo de contato.....	21
2.9.2 Influencia da rugosidade.....	24
2.9.3 Parâmetro para quantificar a rugosidade.....	24
2.10 Tratamento térmico de arames em forno de chumbo	27
2.10.1 Recozimento	28
2.10.2 Fornos de recozimento	30
2.10.3 Consumo de chumbo	32
Consumo por arraste.....	32
Método de raspagem.....	33
Consumo por oxidação	35
Consumo por evaporação	36
2.10.4 Qualidade do material galvanizado	36
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Material.....	39

3.2	Método	45
	Rugosidade.....	57
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.0	CONCLUSÕES	65
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

material, com manchas por falhas no revestimento de zinco.....	38
Figura 2.21 – Amostra de arame galvanizado com excesso de zinco	38
Figura 3.1 - Tanque de cal, onde aparecem o termostato (1), a entrada da resistência no banho (2) e o bico de saída do banho (3)	41
Figura 3.2 – Detalhe do bico de saída do banho	41
Figura 3.3 – Detalhe da passagem do arame pelo tanque e saída para posterior passagem pelo soprador de ar quente	42
Figura 3.4– Passagem do fio sobre o rolo e entrada na cuba de recozimento	42
Figura 3.5 – Adesão de chumbo na superfície do arame trefilado com microcassete	44
Figura 3.6 – Pontos de atuação da pesquisa	45
Figura 3.7 - Exemplo da técnica D.O.E. utilizada para a realização dos experimentos.....	46
Figura 3.8 – Excesso de chumbo depositado na calha de coleta para posterior pesagem.....	47
Figura 3.9 – Experimento realizado para coleta e pesagem de chumbo depositado na calha de coleta	51
Figura 3.10 Exemplo de como as amostras foram coletadas no meio do carretel	52
Figura 3.11 Exemplo de como as amostras foram medidas após sua coleta	53
Figura 3.12 Exemplo de como as amostras foram coletadas no início do carretel	53
Figura 3.13 Exemplo de como as amostras foram medidas após sua coleta	53
Figura 3.14 – Exemplo da rugosidade R_q , que é a média entre os picos e vales apresentados nas amostras	55
Figura 3.15 – Foto ilustrativa da medição de rugosidade do arame	55
Figura 4.1 – Foto ilustrativa da contaminação dos equipamentos ao longo da linha de galvanização	57
Figura 4.2 – Arame galvanizado sem cal (esq) e arame com cal (dir)	57
Figura 4.3 - Gráfico da rugosidade do arame trefilado com fieira X arame laminado com	

microcassete	60
Figura 4.4 – Gráfico da rugosidade do arame retrefilado com fieira X arame relaminado com microcassete	61
Figura 4.5 – Gráfico comparativo da rugosidade de rolos novos X rolos velhos utilizados em microcassete	62
Figura 4.6– Gráfico comparativo da variação de diâmetro em arames laminados com microcassete e arames trefilados com fieira	62
Figura 4.7– Gráfico comparativo da variação de diâmetro em arames laminados com microcassete e arames trefilados com fieira	63
Figura 4.8– Gráfico comparativo da variação da ovalização em arames laminados com microcassete e arames trefilados com fieira	63
Figura 4.9– Gráfico comparativo da variação da ovalização em arames laminados com microcassete e arames trefilados com fieira	64
Figura 4.10 – Gráfico comparativo da rugosidade para diferentes tipos de lubrificantes (Ca e Na)	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais atividades profissionais e fontes de exposição ambiental ao chumbo metálico	8
Tabela 2.2 – Principais medidas de prevenção primária da exposição excessiva ao chumbo metálico	11
Tabela 2.3 – Tabela comparativa dos diferentes fornos de recozimento de arames para processo contínuo.....	31
Tabela 3.1 - Faixa de Tolerância Dimensional e Limite de Resistência	43
Tabela 3.2 – Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação da rugosidade entre os arames trefilado e laminado a frio com microcassete	48
Tabela 3.3 – Seqüência de fieiras, reduções e lubrificantes utilizados	49
Tabela 3.4 – Seqüência de fieiras, reduções e lubrificantes utilizados	49
Tabela 3.5 – Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação da rugosidade entre os arames retrefilados e relaminado a frio com microcassete	50
Tabela 3.6 – Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação da rugosidade entre os arames laminados a frio com rolos novos e rolos velhos	51
Tabela 3.7 – Características operacionais dos equipamentos utilizados para os experimentos	52
Tabela 3.8 – Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação do uso de sabões de sódio e cálcio no processo de trefilação e sua influência na rugosidade dos arames	54
Tabela 4.1 - Efeito do banho de cal na camada de Zn formada sobre o arame	58
Tabela 4.2 – Tabela comparativa da massa de Pb arrastada pelas arames produzidos sob diferentes processos de conformação a frio	58

Tabela 4.3 – Tabela comparativa da massa de Pb arrastada pelos arames produzidos sob diferentes processos de conformação a frio61

RESUMO

O presente trabalho descreve os resultados obtidos a partir de análises do processo de trefilação de arames e posterior recozimento destes em forno de chumbo. Baseado na metodologia DOE, busca-se o entendimento da ocorrência do arraste de chumbo proveniente dos arames recozidos, com o objetivo de minimizar este problema.

Amostras de arame foram coletadas diretamente em máquinas de trefila e em linha de galvanização e submetidas a ensaios de verificação da rugosidade superficial e suas implicações no arraste de chumbo, baseadas em variáveis como velocidade da linha, diâmetro do arame, temperatura do banho de chumbo, capacidade térmica da cuba, condição superficial do arame, rugosidade do arame e limpeza superficial do arame.

Foram propostas alternativas para minimizar o arraste de chumbo buscando o aumento do desempenho em máquinas de trefila e do recozimento em linha de galvanização.

Palavras-chave: Arame, Trefilação, Galvanização, Tratamento Térmico, Chumbo

ABSTRACT

The present work describe the experiments carried out based on the wire drawing process analysis and later annealing on lead furnace on a galvanizing line. Using D.O.E methodology, the aim is to understand the occurrence of lead entrainment originating from the annealed wires in order to decrease this problem.

Wire samples were collected from wire drawing machines and galvanizing line and submitted to surface roughness analysis and its implications on lead drag out based on wire speed, wire diameter, lead bath temperature, thermal capacity of the lead kettle, wire surface condition, wire roughness and wire superficial cleanliness.

Proposals to decrease lead drag out were made in order to increase wire drawing machines and galvanizing line performance.

Key words: Wire, Wire drawing process, Galvanizing, Heat Treatment, Lead

1. INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica se depara com alguns desafios, quando busca conciliar a satisfação do cliente ao atendimento dos requisitos ambientais, vinculando estas questões a uma otimização dos aspectos econômicos. Exemplo disso encontramos no processo de galvanização onde arames de aço baixo e médio carbono (SAE 1004 a SAE 1045) apresentam arraste de chumbo quando saem do recozimento em banho neste material.

Cabe salientar que o processo de recozimento de arames em banho de chumbo é realizado já há muitas décadas, tendo sido iniciado na Europa. O arraste de chumbo apresentou-se como um problema inerente ao mesmo, sempre gerando preocupações em função dos potenciais prejuízos econômicos e ambientais (MALLET 1993). Entretanto, ainda que o problema seja observado desde longa data, poucas soluções foram encontradas até o momento.

Neste trabalho o fenômeno foi observado em linha de galvanização com recozimento de arames em banho de chumbo. Algumas medidas foram implementadas na busca da minimização do problema como, por exemplo, a agitação da calha de saída, procedimento desenvolvido com a utilização de arames recobertos com cal, proposta elaborada por uma empresa consultada.

Entretanto tais medidas mostraram-se ineficazes na resolução do problema. Assim, optamos por investigar mais detalhadamente as origens do problema visando, com a obtenção de maior conhecimento sobre o mesmo, tornar viável também a busca de soluções. Uma comparação entre os arames trefilados pelo processo convencional de trefilação com fieiras e o processo com microcassetes é traçado neste trabalho. Além disto outros experimentos foram realizados no intuito de minimizar o arraste de chumbo no processo de galvanização de arames.

O tema aqui discutido raramente é abordado no meio acadêmico, visto que o referido assunto é de domínio de organizações industriais, sendo de acesso restrito ao domínio público. O tema de “caracterização dos arames trefilados a galvanizar” não foi encontrado na literatura técnica, tendo-se encontrado somente outros correlacionados,

como utilização de substâncias para transformar o óxido de chumbo em outro produto com o intuito de facilitar sua remoção da superfície do arame.

Quando buscamos referências sobre o processo abordado, o trabalho de Dewitte (1990) é um dos poucos encontrados, descrevendo o tratamento térmico e suas relações com o problema aqui descrito.

Conforme o autor acima mencionado, o tratamento térmico de arames é um processo em linha, precedido e sucedido por outras etapas como: desbobinamento, decapagem química, lavagem, fluxagem, galvanização e bobinamento. Como processo, o tratamento térmico com banho de chumbo mostra-se vantajoso sobre outras formas de tratamento térmico em faixas de temperaturas entre 500°C e 750°C , graças a sua qualidade de excelente meio para transferência de calor.

Entretanto, o uso de banhos de chumbo apresenta algumas desvantagens. Uma delas é o arraste de chumbo por arames que emergem do banho do metal fundido. Isto leva a alguns problemas tais como:

- Remoção do chumbo da cuba, com conseqüente impacto econômico;
- Questões ambientais;
- Influência negativa nas etapas subseqüentes do processo, como:
 - Contaminação dos banhos de decapagem, lavagem e fluxagem;
 - Aumento da sensibilidade à corrosão;
 - Baixa aderência entre o substrato (aço) e o recobrimento (zinco).

A velocidade do fio na linha de galvanização tem grande impacto no arraste, pois quanto maior a velocidade, maior será o arraste do metal líquido sobre o arame de aço. Conseqüentemente, reduzindo-se a velocidade do fio na linha de galvanização teremos menor arraste, porém esta solução afeta diretamente a produtividade e os custos de manufatura. O arraste de chumbo, segundo Dewitte (1990), é um fenômeno complexo, onde um grande número de variáveis participa decisivamente. Entre estas, podemos citar:

- A rugosidade do arame;
- O número e tipo de vibrações na linha de galvanização;
- O ângulo de saída do arame do banho de chumbo;

Diversos métodos são sugeridos como forma de diminuir o arraste de chumbo (DEWITTE 1990). Em uma das formas, o arame é forçado a passar através de uma cuba de areia na saída do banho de chumbo fundido. A acumulação ou solidificação do chumbo dentro da cuba de areia é evitada pela agitação (deslizamento) do fio através da cuba de areia.

Outra maneira conhecida é realizar a cobertura da superfície de um banho de chumbo fundido onde os arames (1) emergem com um material granular não inflamável colocado dentro da calha de saída (2), como cascalho, areia, carvão vegetal ou coque de granulometria adequada (3) e saem suspensos por um dispositivo (4). O objetivo desta cobertura é de prevenir a oxidação superficial do banho de chumbo, bem como remover o chumbo da superfície do arame que está emergindo.

Entretanto, como observa Dewitte (1990), estas soluções não apresentam resultados satisfatórios quando a velocidade de passagem dos arames é elevada. A figura 1.1 mostra um desenho esquemático da saída dos arames passando por uma caixa com material propício para realizar a raspagem do chumbo da superfície dos mesmos.

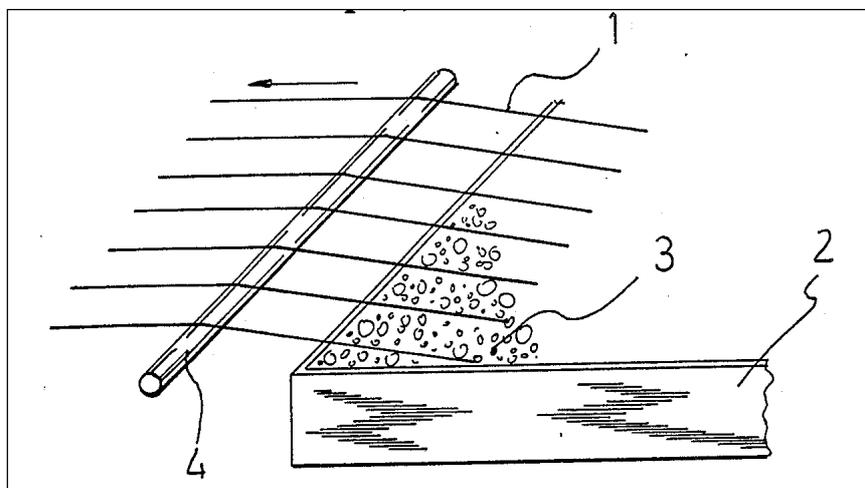


Figura 1.1 Desenho esquemático da saída dos arames passando por uma caixa com material para a realização da raspagem do chumbo da superfície dos arames por meio mecânico (DEWITTE, 1990)

A figura 1.2 mostra na prática o que está descrito na figura 1.1, com os arames emergindo do banho de chumbo e passando por um leito de coque granulado que promove mecanicamente a raspagem do excesso de chumbo da superfície dos arames, fazendo com que este excesso retorne a cuba que contém o chumbo líquido.



Figura 1.2 Exemplo do arraste de chumbo na saída do banho. Os arames emergem do banho de chumbo líquido e passam pelo meio de raspagem.

- 1 – Arames na saída do forno de recozimento
- 2 – Calha de saída
- 3 – Leito de coque
- 4 – Dispositivo guia (rolo)
- 5 – Acúmulo de chumbo (ocasionado pelo arraste)

Os objetivos a serem alcançados neste trabalho são os seguintes:

- Buscar alternativas para a minimização do arraste de chumbo pelos arames;
- Aumentar a velocidade de passagem dos arames no banho de chumbo fundido;
- Facilitar os tratamentos subseqüentes e reduzir a contaminação do meio;
- Entender o fenômeno do arraste de chumbo pelos arames recozidos e suas características.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Chumbo

O chumbo é um metal abundante na crosta terrestre, estando amplamente distribuído e sendo encontrado livre e em associação com outros elementos. Seu número atômico é 82, seu peso atômico 207,21 e seu ponto de fusão 327°C. O metal começa a emitir vapores a 550°C, entrando em ebulição ao atingir cerca de 1.740°C. Em associação com outros elementos, origina compostos como: sulfato de chumbo, arsenato de chumbo, dióxido de chumbo, chumbo-tetraetila, chumbo tetrametila, litargirio, zarcão, alvaiade entre outros (CORDEIRO; LIMA FILHO, 1995). Suas fontes naturais incluem as emissões vulcânicas, o “intemperismo” geoquímico e as emissões provenientes do mar. Entretanto, devido à intensa utilização do metal pelos homens nos últimos séculos a mensuração do conteúdo de chumbo proveniente de fontes naturais tornou-se difícil (QUITÉRIO, 2001).

O baixo ponto de fusão, a ductilidade e a facilidade de formar ligas justificam a ampla utilização do chumbo, desde a antigüidade, para fabricação de utensílios domésticos, armas e adornos, tendo provocado inúmeros casos de intoxicações ocupacionais e ambientais. Os riscos à saúde, decorrentes da exposição ocupacional ou ambiental ao chumbo foram descritos há mais de 2000 anos. No entanto, é a partir da revolução industrial, no século XVIII que a utilização do metal atinge grande escala e as concentrações de chumbo atmosférico passam a crescer paulatinamente, assim como a concentração do metal no sangue das pessoas expostas a ele (PALOLIELO, 1996; MOREIRA, F; MOREIRA, J., 2004).

Nos países desenvolvidos a ocorrência de casos de intoxicações ocupacionais pelo chumbo (saturnismo) vem se tornando cada vez menos freqüente e grande investimento tem sido feito na identificação de efeitos à saúde decorrentes da exposição a baixas concentrações nos ambientes de trabalho e no meio ambiente, muitas das quais consideradas seguras pelas legislações de segurança e medicina do trabalho.

No Brasil, não existem registros ou estimativas confiáveis do número de indivíduos expostos ocupacional e ambientalmente ao metal, embora a literatura especializada venha

apontando grupos de trabalhadores intoxicados principalmente entre os envolvidos na produção, reformas e reciclagem de baterias automotivas (OKADA, 1997; SANTOS, 1993; STAUDINGER, 1998; SILVEIRA; MARINE, 1991). Cresce ainda a preocupação com os agravos à saúde decorrentes de exposições ambientais ao metal.

2.2. Epidemiologia

Estima-se que o chumbo seja utilizado em mais de 200 processos industriais diferentes, com destaque para a produção de acumuladores elétricos. Este segmento abriga além de grandes empresas com melhor controle das condições ambientais de trabalho, pequenas empresas, muitas das quais instaladas em regiões residenciais, e funcionando à margem da legislação trabalhista, ambiental e de saúde. No nosso meio, os homens constituem a maior parte dos atingidos pela intoxicação pelo chumbo dada a natureza das atividades que utilizam o metal (que empregam predominantemente o sexo masculino). No Brasil, além dos casos relacionados à produção e reforma de baterias automotivas têm sido relatados casos entre trabalhadores da indústria de plástico (PVC) (SILVEIRA; MARINE, 1991; MATOS, et al., 2003; DEMARCHI, et al., 1999; MENEZES; D'SOUZA; VENKATESH, 2003; RIGOTTO, 1989), assim como entre trabalhadores que usam rebolos contendo chumbo para lapidação de pedras preciosas, instrução e aprendizado de tiro (SILVEIRA; MARINE, 1991), reparação de radiadores de carro, reciclagem de baterias automotivas, redução de minérios ricos em ouro para obtenção deste, entre outros.

A tabela 2.1, abaixo, apresenta as principais atividades ocupacionais que expõem os trabalhadores ao risco de intoxicação.

Tabela 2.1 Principais atividades profissionais e fontes de exposição ambiental ao chumbo metálico

Exposições ocupacionais a poeiras e fumos de chumbo
Extração, concentração e refino de minérios contendo chumbo
Fundição de chumbo
Produção, reforma e reciclagem de acumuladores elétricos
Fabricação e têmpera de aço chumbo
Fundições de latão e bronze
Reparo de radiadores de carro

Manuseio de sucatas de chumbo
Instrução e prática de tiro
Produção de cerâmicas
Jateamento de tintas antigas à base de chumbo
Soldas à base de chumbo
Produção de cristais
Uso de rebolos contendo chumbo
Corte a maçarico de chapas de chumbo ou pintadas com tintas à base de chumbo
Demolição, queima, corte ao maçarico de materiais revestidos de tintas contendo chumbo
Demolição de instalações antigas com fornos de chumbo
Produção de pigmentos contendo chumbo
Operações de lixamento/polimento de materiais contendo chumbo

2.3. Exposições não-ocupacionais ao chumbo metálico

- Residência nas vizinhanças de empresas que manuseiam ou manusearam chumbo
- Uso de medicações que contêm chumbo
- Utilização de vasilhames de estanho contendo chumbo
- Presença de projéteis de arma de fogo no organismo
- Ingestão acidental de água ou alimentos contendo chumbo
- Ingestão de água contaminada com chumbo
- Contato com solo contaminado com pesticidas contendo chumbo

Fonte: LANDRIGAN, 1994; OSHA, 1993; SILVEIRA, 1991; RAMIREZ, 1986; BEDRIKOW, 1985; LAX, 1996; BARSAN, 1996.

2.4. Toxicologia do chumbo

Uma vez que o chumbo entra em contato com o organismo, o mesmo não sofre metabolização, sendo complexado por macromoléculas, diretamente absorvido, distribuído e excretado. As vias de contaminação podem ser a inalação de fumos e poeiras (mais importante do ponto de vista ocupacional) e a ingestão. Apenas as formas organificadas do

metal podem ser absorvidas via cutânea (ALVES; TERRA, 1983). O chumbo é bem absorvido por inalação e até 16% do chumbo ingerido por adultos pode ser absorvido. Em crianças, o percentual absorvido através da via digestiva é de 50%. Uma vez absorvido, o chumbo é distribuído para o sangue, onde tem meia-vida de 37 dias, tecidos moles, onde a meia-vida é de 40 dias, e ossos, onde sua meia-vida é de 27 anos, constituindo estes o maior depósito corporal do metal, armazenando 90 a 95% do chumbo presente no corpo (MOREIRA, F.; MOREIRA, J., 2004).

2.5. Vias de penetração no organismo

O chumbo entra no corpo humano através das vias:

- pulmonar;
- digestiva;
- cutânea.

É pela via pulmonar que o risco se torna maior, dado que possibilita a absorção para o sangue de 35 a 50% do chumbo inalado. Pela via digestiva, apenas 10% de chumbo ingerido passa para o sangue, o que pode facilmente acontecer no ato de fumar, beber ou comer no local de trabalho.

2.6. Prevenção

As medidas de primeira linha na prevenção das exposições a chumbo estão no plano da prevenção primária, ou seja, trata-se de medidas que buscam eliminar ou reduzir a exposição excessiva. Estas medidas são obtidas por meio de técnicas de engenharia, utilização de equipamento de proteção individual (quando os equipamentos de proteção coletiva não forem suficientes ou na fase de implantação dos mesmos), e boas práticas nos locais de trabalho.

Um único caso de exposição ocupacional excessiva aponta a possibilidade da existência de outros trabalhadores acometidos e indica a necessidade de melhorias no ambiente de trabalho. A tabela 2.2 sumariza as principais medidas de prevenção primária da exposição ao chumbo metálico.

Tabela 2.2 Principais medidas de prevenção primária da exposição excessiva ao chumbo metálico.

Medidas de engenharia
• Buscar a substituição do chumbo por outros agentes menos tóxicos.
• Isolar as operações/equipamentos que utilizam chumbo.
• Enclausurar as operações/equipamentos que utilizam chumbo.
• Instalar sistema de exaustão para os gases/vapores do processo.
• Realizar adequado tratamento de efluentes.
Uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI)
• Utilizar máscaras de filtro químico.
• Utilizar luvas.
• Uso de uniformes que devem ser lavados pela empresa (evitar o carregamento de chumbo para o espaço domiciliar).
Boas práticas de trabalho
• Realizar e manter limpa a área de trabalho por via úmida (evitar varrição).
• Dispor os rejeitos contendo chumbo adequadamente.
• Evitar consumo de bebidas, alimentos e tabagismo no local de trabalho.
• Proteger depósitos de água para consumo da possibilidade de contaminação pelo chumbo.
• Informar aos trabalhadores quanto aos riscos decorrentes da exposição, manifestações da intoxicação por chumbo, e formas de prevenção da absorção do metal.
• Informar aos trabalhadores dos resultados de exames toxicológicos.
• Divulgar os resultados das avaliações ambientais.

2.7. Trefilação de arames e lubrificação

Para uma trefilação eficiente de arames, devemos realizar um tratamento prévio de lubrificação, pois em função do atrito entre o material e as fieiras, o arame pode apresentar problemas de qualidade superficial, como por exemplo, material arranhado (mal acabamento superficial), assim como romper, em função da força de tração versus má lubrificação. E, ainda, a fieira pode se desgastar muito rapidamente.

A figura 2.1 mostra de forma esquemática a formação de uma camada de lubrificante entre o material (aço) e a fieira para diminuir a força provocada pelo atrito, que se opõe ao movimento entre o material e a fieira, buscando aumentar a vida útil da fieira.

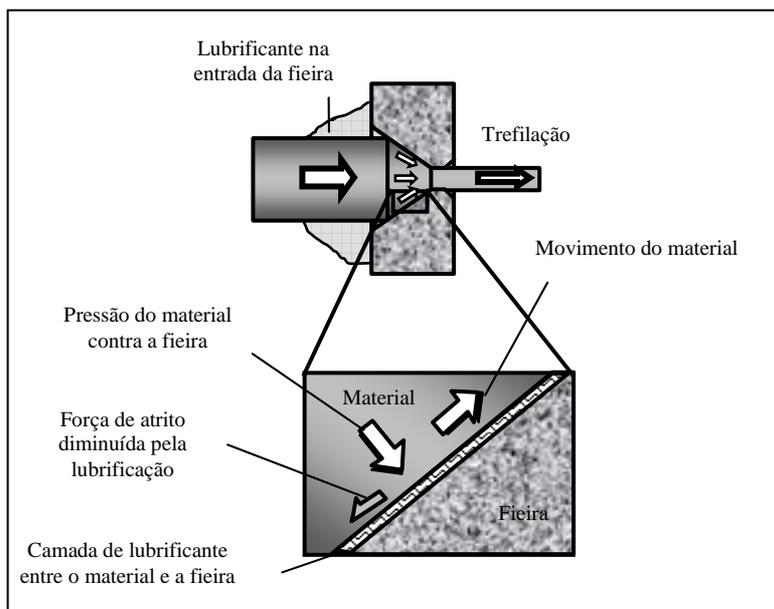


Figura 2.1 Camada de lubrificante formada entre o arame e a fieira, a partir da passagem do arame pela fieira carregando o sabão lubrificante.(CETLIN 2002).

Dois tipos de lubrificantes são usados na trefilação:

- Lubrificantes Líquidos: Óleos e misturas de óleos com água.
- Lubrificantes Sólidos: Sabão em pó*.

* Entenda-se por sabão em pó para trefilação, compostos contendo estearatos, palmitatos, etc. de cálcio e/ou de sódio, ácidos graxos livres e/ou cloretos/sulfetos.

Com o aquecimento na trefilação, o sabão em pó se torna pastoso na região de entrada do material na fieira e na camada entre a fieira e o material. A figura 2.2 mostra a região onde o sabão encontra-se pastoso.

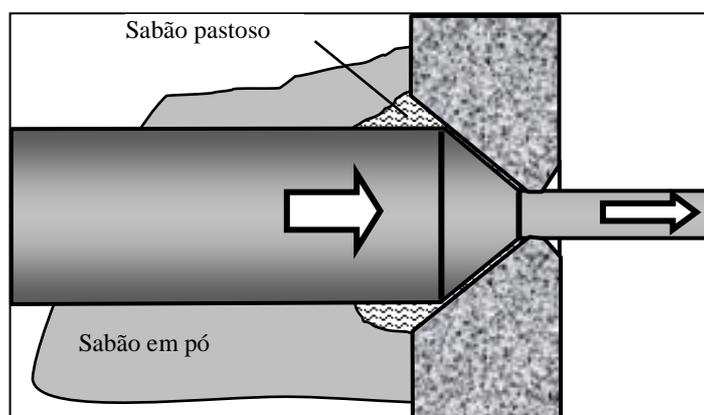


Figura 2.2 Camada de lubrificante (sabão pastoso) entre o arame e a fieira. (CETLIN 2002).

Este sabão pastoso adere à superfície do material, e na medida em que o arame trefilado passa pela fieira, deposita-se sobre o arame e permanece então sobre a superfície do material. A figura 2.3 apresenta o arraste do lubrificante pelo arame que está sendo trefilado. Quando o arame sai da fieira, o mesmo apresenta uma camada de lubrificante sobre a superfície do material.

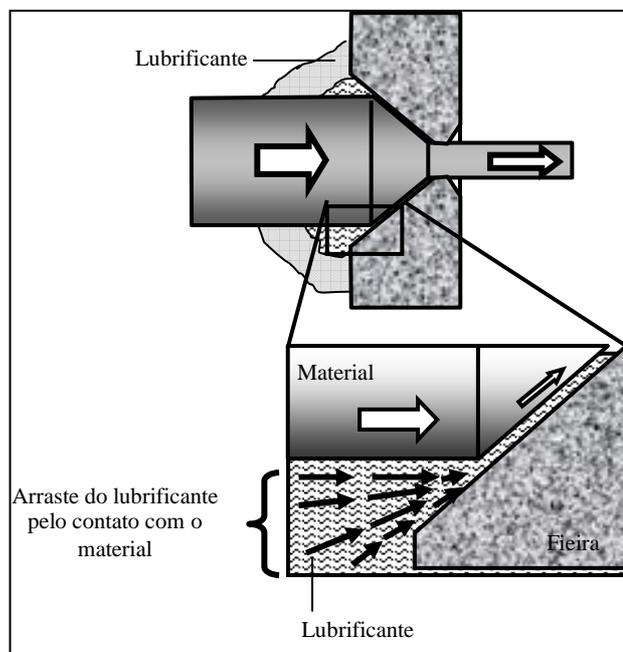


Figura 2.3 Arraste de lubrificante entre o arame e a fieira. (CETLIN 2002).

No caso de arames laminados a frio com o uso de microcassetes, a lubrificação do material que está sofrendo redução entre os passes da máquina de trefila não é necessária, pois os esforços ao qual o arame é submetido do passe anterior para o próximo são esforços de compressão, diferentemente do que ocorre na trefilação com fieira, onde o esforço ao qual o arame é submetido é de redução da seção por tração (Deslizamento X Rolamento). O que ocorre no processo de trefilação com fieira é que os esforços na fieira são triaxiais, com duas componentes em compressão e uma componente em tração. A principal componente é trativa, porém se não existissem as demais não seria possível o processo comercial de trefila. O resultado seria equivalente a um ensaio de tração.

A qualidade superficial do produto acabado é uma das principais exigências do mercado e a sua obtenção e controle tem sido uma preocupação constante. Alguns pesquisadores, como Tripp (1983), Wilson (1979), Baker e Wright (1992), Nakamura (1980) definiram um método para o controle da qualidade superficial, denominada “Razão de Alisamento”.

Esta é a relação entre a área lisa da superfície do material e a área total da superfície do material. A figura 2.4 mostra a relação de alisamento, espessura da película lubrificante residual e a pressão de lubrificante. Pode se notar que a relação de alisamento torna-se menor com a redução na espessura da película lubrificante residual e com o aumento na pressão de lubrificação.

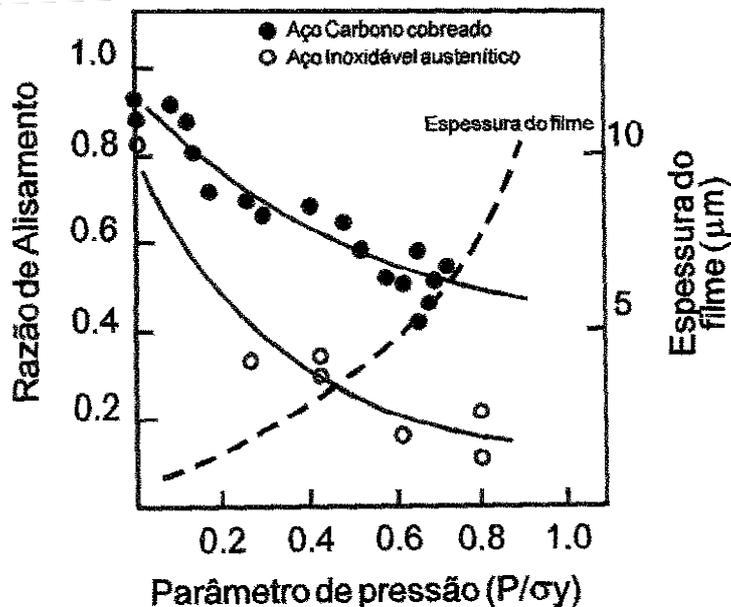


Figura 2.4 Efeito da rugosidade do material. (NAKAMURA 1980).

2.8. Trefilação com microcassete (laminação a frio)

O microcassete é um equipamento composto por seis rolos de compressão, montados em dois suportes, sendo cada um com três rolos defasados em 120° entre si. Os dois suportes são fechados de modo a formar um conjunto único com seis rolos.

Este equipamento substitui a feira oferecendo, como vantagens, entre outras, maior produção (t/feira versus t/microcassete), menor tempo de máquina parada para reparos e menor consumo de energia pelo equipamento. A figura 2.5 mostra um conjunto de microcassete montado para aplicação na máquina de trefila. Visualizam-se os rolos de compressão e sistema de calibração do microcassete.

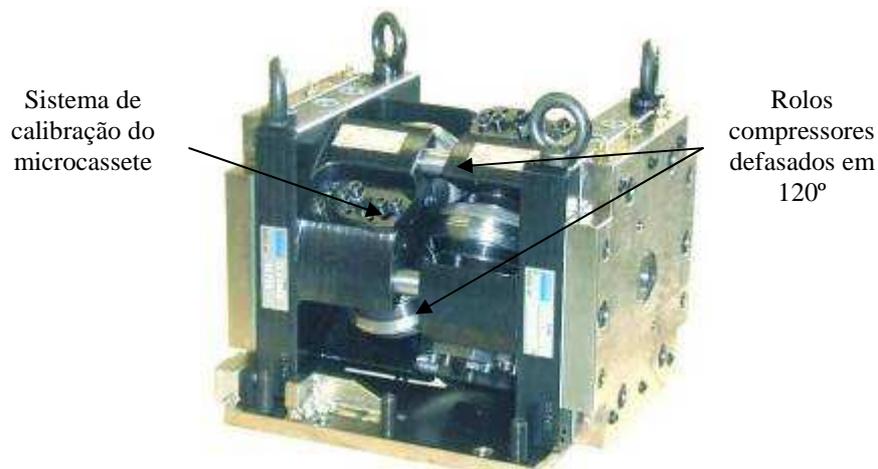


Figura 2.5 Conjunto microcassete montado visualizando-se o sistema de calibração e rolos compressores. (EUROLLS 2005)

Embora a trefilação seja aplicada em diversos perfis de diferentes materiais, o microcassete, devido a suas características construtivas e operacionais, é utilizado para trefilar arames lisos com diferentes bitolas e perfil final circular.

A utilização do microcassete deve preferencialmente ser realizada em máquinas “escravas” (máquinas que produzem sempre o mesmo tipo de material e bitola final) e com poucos setups da máquina de trefila, buscando minimizar o tempo de máquina parada e aumentar a produção por hora. Isto deve ser levado em consideração quando da programação das bitolas por equipamento, haja visto que o setup de uma máquina com microcassetes é mais demorado do que uma máquina com fieiras.

Durante este processo, o material passa através dos rolos compressores do microcassete, sendo comprimido em cada um dos dois conjuntos de três roletes recebendo uma forma distinta em cada um deles.

No primeiro conjunto de roletes, montado na placa RO (placa de entrada do arame no microcassete) o material entra com o perfil circular e tem sua seção transversal modificada. A placa RO é constituída de três rolos compressores montados cada um equidistante 120° entre si. Cada rolo apresenta uma seção ovalizada, que quando montados na placa de fixação produzem no material que passa entre eles um perfil ovalizado-triangular. A figura 2.6 mostra os três rolos montados equidistantes 120° entre si, com o detalhe do canal de passagem do arame.

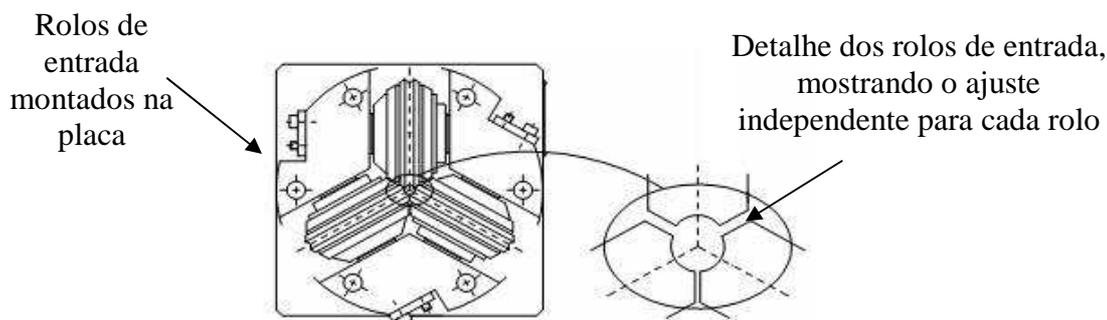


Figura 2.6 Perfil ovalizado-triangular produzido no primeiro conjunto de rolos. (EUROLLS 2005)

Esta forma ovalizada do arame permanece, no entanto, somente na saída do conjunto de rolos de entrada (RO) e a entrada do conjunto de rolos de saída (CA), pois após passar neste último conjunto o material já apresenta um formato circular. A figura 2.7 mostra o arame passando entre os dois conjuntos de rolos do microcassete.



Figura 2.7 Perfil ovalizado-triangular produzido no primeiro conjunto de rolos. (EUROLLS 2005)

Ainda no interior do microcassete, o material passa através do segundo conjunto de roletes, montado na placa CA. A placa CA é composta pelos três rolos acabadores que definem o formato final circular ao arame laminado a frio. A figura 2.8 mostra os rolos compressores da placa CA com o material sendo laminado a frio pelos mesmos.

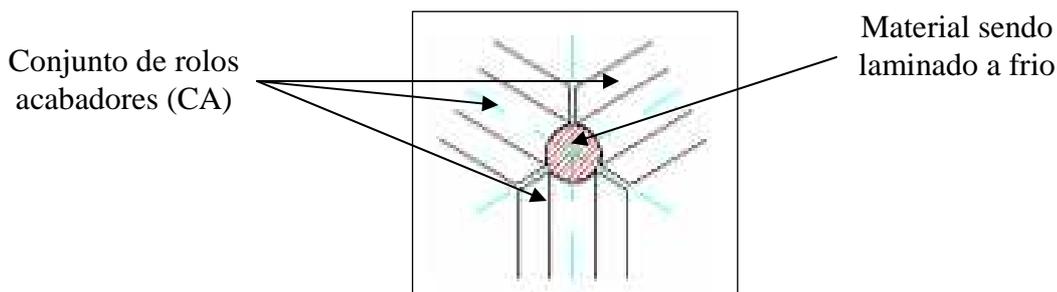


Figura 2.8 Perfil circular produzido no segundo conjunto de rolos. (EUROLLS 2005)

O microcassete, diferentemente da fieira, que necessita de lubrificação em função das forças trativas e compressivas impostas ao material no momento da trefilação, não requer lubrificação entre os sucessivos passes de laminação a frio. Isto ocorre em função dos esforços compressivos impostos ao material e ao movimento giratório dos rolos compressores, pois na medida em que o material é tracionado os rolos giram sobre seu eixo comprimindo o arame e reduzindo sua seção, sem a necessidade do uso de lubrificantes. Somente no passe inicial da máquina de trefila utiliza-se uma fieira com lubrificação para agregar sabão na superfície do arame. Nos demais passes com microcassete não é necessária a lubrificação.

Para evitar o superaquecimento dos rolos do microcassete, que pode ocasionar trincas ou quebras e conseqüente parada da máquina para troca do mesmo, faz-se o uso de refrigeração com água a temperatura controlada.

Para melhorar o desempenho e aumentar durabilidade do microcassete, durante a operação deste, utiliza-se a lubrificação de seus componentes mecânicos com o objetivo de aumentar sua vida útil e conseqüente diminuição de paradas e perdas de produção.

Cabe salientar que em função da forma construtiva do microcassete, para ambos os conjuntos de três rolos (entrada e saída), há conexões de água para refrigeração e para lubrificação.

A figura 2.9 mostra as conexões de entrada de água e lubrificante para o microcassete.



Figura 2.9 Microcassete mostrando as conexões de entrada de água e lubrificante. (EUROLLS 2005)

Verifica-se que os arames trefilados com microcassetes apresentam maior arraste de chumbo do que os arames trefilados com fieiras.

O arraste é o carregamento de chumbo pelo arame e depende de muitos fatores como:

- Velocidade da linha: quanto maior a velocidade, maior é o arraste. A característica de velocidade é função do projeto do equipamento, onde linhas de galvanização que tem VD (velocidade X diâmetro do arame) maior, têm uma capacidade de produção por fio mais elevada. No entanto deve-se levar em consideração também à característica da linha de galvanização, isto é, se foi concebida para produzir bitolas finais maiores ou menores;
- Bitola (diâmetro) do arame: quanto maior o diâmetro, maior a área superficial e, portanto, maior o arraste;
- Temperatura do banho de chumbo: quanto menor a temperatura, mais viscoso é o banho e, portanto, maior é o arraste;
- Capacidade térmica da cuba (quantidade de chumbo na cuba por fio de arame): Se há pouca massa térmica o chumbo congela sobre o arame, e é arrastado por ele;
- Condição superficial do arame: A condição superficial do arame é determinante no arraste. Esta condição superficial depende de:

- Rugosidade do arame: Em geral, quanto maior a rugosidade básica do arame, maior o arraste. Isto se deve porque o metal tende a preencher os vazios superficiais. Entretanto, a rugosidade básica pode ser mascarada pela existência de outros resíduos preenchendo estes vazios, como resíduos de lubrificantes e outras sujidades;
- Limpeza do arame: sujidades sobre o arame afetam o arraste através de dois mecanismos: preenchem os vazios superficiais e modificam a tensão interfacial entre arame e chumbo (quanto menor a tensão interfacial entre a superfície do arame e a do chumbo líquido, maior o molhamento do arame pelo chumbo e, portanto, maior o arraste). Assim, arames rugosos, mas com uma boa camada lubrificante em sua superfície arrastam menos chumbo do que arames mais lisos, mas com menos camada lubrificante. A explicação para este comportamento deve-se ao fato de que o sabão não só preenche as imperfeições superficiais como aumenta a tensão interfacial, "repelindo" o chumbo e, portanto diminuindo o molhamento e conseqüente arraste. Entretanto, outras substâncias que não lubrificantes, podem ter comportamento distinto, copiando a geometria original do arame, ao invés de preenchê-la e/ou diminuindo a tensão interfacial. A figura 2.10 mostra a analogia do efeito na superfície do arame com relação a fieira e o microcassete. O arame produzido com a fieira, em função do seu processo de trefilação com maior lubrificação apresenta uma camada de lubrificante sobre a superfície do mesmo. O arame produzido com o processo de laminação a frio com microcassete não apresenta esta "camada" de lubrificante na superfície laminada a frio, em função da não utilização de lubrificação do arame entre as reduções

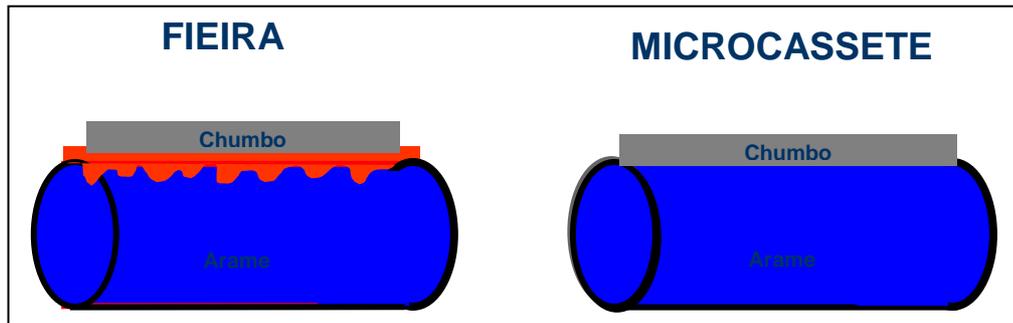


Figura 2.10 - A figura mostra a analogia do efeito na superfície do arame trefilado e laminado a frio. O arame trefilado (à esquerda) apresenta uma camada lubrificante na sua superfície, dificultando o molhamento pelo chumbo. O arame laminado a frio (à direita) não apresenta esta camada lubrificante, facilitando o molhamento pelo chumbo.

- Quantidade de óxido de chumbo dissolvido no banho: quanto maior, maior o arraste.
- Método de raspagem: quanto melhor o método de raspagem, menor o arraste.

2.9. Energia de Superfície dos Materiais

O arranjo dos átomos na superfície dos metais apresenta forma diferenciada quanto à disposição atômica em relação ao volume interno. Este tipo de diferença acaba ocasionando a elevação do nível de energia livre na superfície, fazendo com que ocorra uma tendência maior na adsorção dos átomos e moléculas estranhas.

Isto ocorre devido ao fato de que quanto maior a energia por unidade de superfície do metal, maior será a possibilidade de surgirem reações entre a superfície do material e o que está sobre esta superfície. Além disso, podem ocorrer modificações na composição do revestimento original.

É extremamente importante conhecer as propriedades de adesão e molhabilidade de um material. De algumas técnicas, se pode destacar a que mede o ângulo de contato resultante entre uma gota de um líquido depositado sobre a superfície do material. Com a medida do ângulo formado por esta gota e com auxílio de modelos físico-matemáticos é possível inferir sobre os valores da energia de superfície.

2.9.1. Teoria do Ângulo de Contato

A molhabilidade das superfícies pode ser quantificada pelo ângulo de contato de um líquido com o substrato sólido. Em consequência, a tensão crítica da superfície pode ser usada para avaliar a energia da superfície. (Schrader, 1992)

O ângulo de contato é um parâmetro importante que determina a qualidade do umedecimento de um sólido por um líquido. Quando este parâmetro alcança um valor constante para uma determinada situação, o equilíbrio termodinâmico na interface é alcançado, de acordo com Aurenty et al (1997).

Diversas teorias sobre o ângulo de contato têm sido propostas. O equilíbrio entre as forças atrativas entre as partículas do fluido e as do sólido faz com que o fluido forme um determinado ângulo com o sólido.

Não se pode negar que a medida e a interpretação dos ângulos de contato são assuntos de extrema complexidade, mas através do desenvolvimento de técnicas experimentais e proposta de modelos teóricos é possível entender os mecanismos envolvidos e correlacionar o ângulo de contato com a superfície e até mesmo com a limpeza da superfície do material. Uma característica importante que fornece informações sobre a molhabilidade é a existência da histerese do ângulo de contato, a qual fornece correlações entre a energia, rugosidade e heterogeneidade das superfícies.

Os ângulos de contato τ com água foram medidos em vários materiais (metais, ligas metálicas e polímeros) por Krell (1967), o qual propôs uma relação empírica entre o ângulo de contato e a profundidade média da rugosidade do sólido. Ele determinou que o ângulo de contato da água com o aço inoxidável era de 50° e poderia ser aumentado para 90° , apenas aumentando a rugosidade da superfície da ordem de $2 \mu\text{m}$. O objetivo do trabalho foi determinar um tratamento de superfície que produzisse total molhabilidade e que também reduzisse os efeitos de quebra do filme líquido devido aos gradientes de tensão superficial.

Segundo Morra et al (1990), tanto a medida quanto a interpretação do ângulo de contato é encarado como um tema de profunda complexidade. Durante certo tempo, houve muita controvérsia sobre o real significado dos ângulos de contato e até que ponto este parâmetro poderia ser considerado uma propriedade termodinâmica. Os autores salientam que, com a possibilidade de se medir os ângulos de contato e com os avanços ocorridos na

teoria da físico-química de interfaces é possível entender melhor a relação entre o ângulo de contato e a molhabilidade.

É importante salientar que o ângulo de contato entre uma gota de um líquido e uma superfície sólida vai depender da relação entre as forças adesivas, que fariam a gota se espalhar sobre a superfície e as forças coesivas do líquido que contraem a gota na forma de uma esfera com superfície mínima. Caso a gota repouse sobre uma superfície homogênea nivelada de forma perfeita, o ângulo de contato depende das tensões, entre o líquido e a superfície sólida em qualquer ponto da linha que separa fases sólidas e líquidas, bem como das tensões entre o sólido e a fase de vapor, conforme representado na figura 2.11

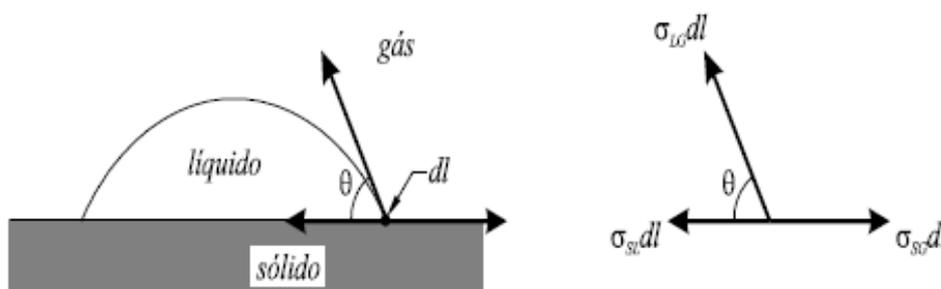


Figura 2.11 - Representações das tensões superficiais e ângulo de contato e molhabilidade (adaptado do site www.ul.pt)

No equilíbrio as tensões superficiais são representadas pela equação de Young:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad \text{Equação 1}$$

Quando há expansão do líquido, o ângulo de contato é maior (ângulo de contato avançando) do que quando a gota fica contraída (ângulo de contato se retraindo). Neste caso, a histerese do ângulo de contato, medida como a diferença entre os ângulos de contato avançando e retraído é interpretada como uma seqüência de heterogeneidades geométricas e de energias superficiais do sólido. O ângulo de molhabilidade do líquido sobre o sólido se ajusta por si mesmo de modo que a soma das forças é igual à zero. Esta inter-relação para o estado de equilíbrio é descrita pela equação de Young (θ_Y).

De acordo com Morra et al (1990), a histerese do ângulo de contato é uma ferramenta de suma importância para gerar subsídios a respeito da rugosidade e energia de superfícies.

Para Li e Neumann (1996), o ângulo de contato aparente, observado através de experimentos, pode ser igual ou não ao ângulo de contato de Young. Eles afirmam que nas superfícies sólidas ideais, não há histerese do ângulo de contato e os ângulos observados experimentalmente são iguais aos de Young. Nas superfícies lisas, mas quimicamente heterogêneas, θ não é necessariamente igual ao ângulo de contato de equilíbrio termodinâmico. No entanto, o ângulo avançado θ_a , determinado experimentalmente, é uma boa aproximação para θ_Y . Nas superfícies rugosas não há igualdade entre o ângulo de contato avançado e o de Young.

Wenzel (1936) analisou a influência da rugosidade da superfície sobre o ângulo de contato aparente. Sua idéia partia da premissa de que "numa unidade de área superficial (rugosa) há mais área e, portanto, há uma maior intensidade de energia de superfície, do que na mesma unidade de área de superfície lisa". Diante disso, o autor propôs a equação atualmente conhecida como equação de Wenzel:

$$\gamma LG \cos \theta_W = R (\gamma SG - \gamma SL) \quad \text{Equação 2}$$

Onde θ_W é o ângulo de Wenzel e R é o chamado fator de rugosidade, que relaciona a área superficial real à geométrica.

De acordo com Morra et al (1990), o efeito da rugosidade é o de aumentar as características de molhabilidade do sólido; isto é, o ângulo de Wenzel aumenta com o acréscimo da rugosidade se o ângulo de Young for superior a 90° e diminui se for inferior a 90° .

Além da rugosidade do material, existem outros fatores que podem causar histerese nas medidas do ângulo de contato: a penetração do líquido no sólido, especialmente se este for muito poroso, o embebimento do sólido pelo líquido e a presença de impurezas.

Segundo Carey (1992) a histerese do ângulo de contato nada mais é do que uma consequência da heterogeneidade ou aspereza da superfície. No que tange às superfícies metálicas, Ponter et al. (1967) realizaram medidas de ângulo de contato com diversos líquidos em cobre, em condições de refluxo total. Eles utilizaram a técnica da gota estática e observaram que para sistemas positivos, a transferência de massa provocou uma redução no ângulo de contato. Já nos sistemas negativos ocorreu o oposto.

Nicolaiewsky e Fair (1999) investigaram a influência do tratamento da superfície na molhabilidade de placas metálicas e cerâmicas, lisas e texturadas, planas e corrugadas,

empregadas em colunas de destilação. Para tanto, utilizaram líquidos com propriedades físicas diversas, a fim de que os efeitos da tensão superficial e da viscosidade pudessem ser analisados. Foram realizadas medidas de ângulo de contato e de sua histerese, através da técnica da Placa de Wilhelmy, a que mede os ângulos de avanço e de retrocesso, através da medida de força e é função da profundidade de imersão do líquido. Foi constatado pelos autores que quanto maior a rugosidade, melhor a sua molhabilidade em relação a todos os líquidos testados.

A determinação experimental do ângulo de contato seja pelo método da placa de Wilhelmy quanto pelo goniômetro, requer cuidados especiais em relação ao manuseio das superfícies sólidas, particularmente para os de alta energia superficial, como os metais. As superfícies não devem ser tocadas com os dedos, pois a matéria orgânica pode ser transferida, afetando o ângulo de contato. Para Neumann & Good (apud Costa et al, 2002), o ar do laboratório deve estar limpo e todas as fontes de vapores de óleo devem ser evitadas. Além disso, os ângulos de contato devem ser medidos à temperatura ambiente (20 – 22°C) de modo que as tensões superficiais dos líquidos testados não variem durante o experimento.

2.9.2. Influência da rugosidade

A rugosidade é uma importante propriedade no que tange aos fenômenos superficiais, pois possibilita o aumento da área superficial, afeta o coeficiente de atrito e proporciona a retenção mecânica de materiais estranhos.

Em se tratando da rugosidade, Morra et al (1990), enfatizam que a histerese do ângulo de contato é uma ferramenta de suma importância para gerar subsídios a respeito da rugosidade e energia de superfícies. O efeito da rugosidade é o de aumentar a molhabilidade do sólido.

Carey (1992) afirmou que a histerese do ângulo de contato nada mais é do que uma consequência da não-homogeneidade ou aspereza da superfície.

2.9.3. Parâmetro para quantificar a rugosidade

A medida da rugosidade é um método empregado para caracterizar a superfície dos materiais. A rugosidade superficial é quantificada por parâmetros medidos ao longo de uma linha hipotética. Estes parâmetros da rugosidade são usados para classificar as heterogeneidades superficiais como ondulações e variações em relação a um perfil.

Entre os diversos parâmetros usados para quantificar a rugosidade superficial destacam-se Ra; Rq; Rz; R3z; Ry e Rt. A Rugosidade Média (Ra) quantifica a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos de perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ($l_m - n$ vezes o valor de “cut off” – NBR 6405).

O parâmetro Ra mostrado em esboço na figura 2.12 é o mais utilizado para caracterizar a rugosidade dos materiais, é aplicável a maioria dos processos de fabricação. Todos os equipamentos de medida da rugosidade permitem a quantificação deste parâmetro. Como desvantagens do uso do valor de Ra para representar a rugosidade salientam-se o fato desse parâmetro indicar a média da rugosidade. A desvantagem é que este parâmetro não define a forma das irregularidades do perfil e não faz nenhuma distinção entre picos e vales.

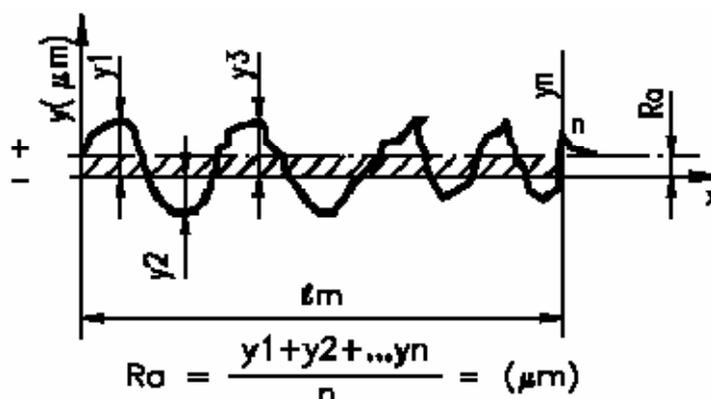


Figura 2.12 – Esboço representativo da Rugosidade Média (Ra) (LEITÃO 1980)

O parâmetro Rz representa a média das distâncias verticais entre a maior protusão e a maior depressão em cada um dos cinco comprimentos da amostragem, conforme verificado na figura 2.13. O parâmetro Rz corresponde à média das distâncias entre duas linhas que tangenciam a protusão (pico) mais pronunciada e a depressão (vale) mais profunda medida dentro de cada amostragem.

Individualmente, este parâmetro não caracteriza as propriedades funcionais de uma superfície quanto ao potencial de desgaste. Este parâmetro pode ser empregado como referência nos seguintes casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada (exemplo: superfícies de apoio, de deslizamento e ajustes prensados) e em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

O uso do parâmetro Rz tem como vantagens o fato de informar a distribuição média da superfície vertical e é um parâmetro de fácil obtenção. As desvantagens estão relacionadas ao fato deste parâmetro não quantificar nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras, além disto, são poucos os equipamentos que fornecem este parâmetro.

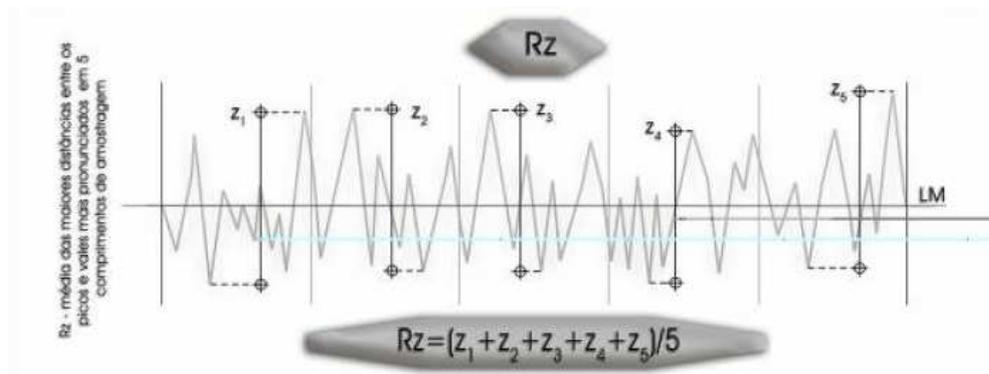
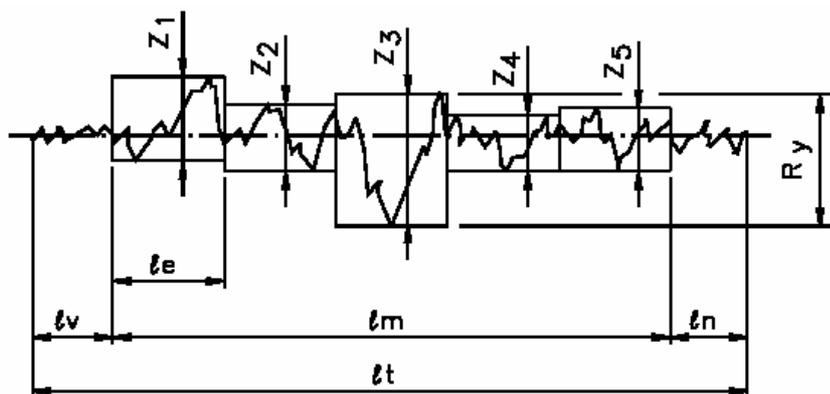


Figura 2.13 – Esboço representativo do parâmetro R3z (LEITÃO 1980)

Em cada módulo são traçadas as distâncias entre o terceiro pico mais alto e o terceiro vale mais fundo, em sentido paralelo à linha média. O parâmetro R3z (Rugosidade Média do Terceiro Pico e Vale) consiste, na média aritmética dos valores de rugosidade parcial ($3Z_i$), correspondentes a cada um dos 5 módulos (cut off). O uso do parâmetro R3z para representar a rugosidade tem como vantagens o fato de desconsiderar picos e vales que não sejam representativos da superfície, além de ser de fácil obtenção. Já como desvantagens o R3z não possibilita informação sobre a forma do perfil nem sobre a distância entre ranhuras.

O parâmetro Ry (Rugosidade Máxima) representado na figura 2.14 é definido como o valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresentam no percurso de medição (l_m). Como vantagens do emprego do parâmetro Ry destacam-se o fato deste informar a máxima deterioração da superfície vertical da peça, ser de fácil obtenção, além de fornecer informações complementares ao parâmetro Ra. Como desvantagens destacam-se o fato deste parâmetro não fornecer a forma da superfície.



Rugosidade R_y definida pela rugosidade parcial (neste caso Z_3)

Figura 2.14 – Representação do Parâmetro R_y . (LEITÃO 1980)

O parâmetro R_t (rugosidade total) corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, como visto na figura 2.15.

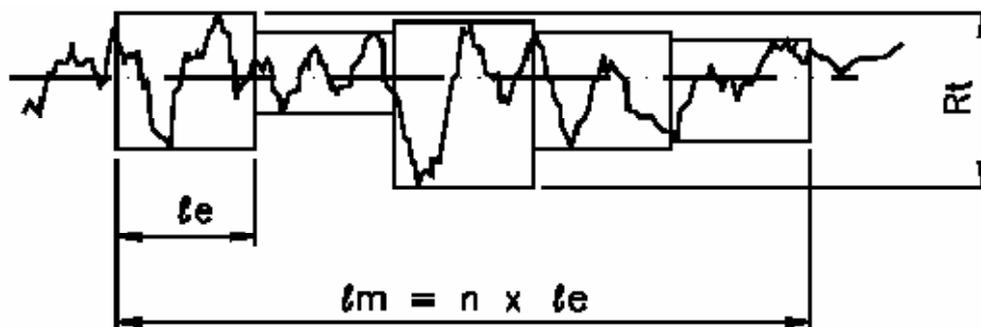


Figura 2.15 – Representação do Parâmetro R_t . Distância entre pico mais alto e vale mais fundo. (LEITÃO 1980)

O parâmetro R_t é mais rígido na avaliação que o R_y , além de ter todas as vantagens indicadas para o R_y . Como desvantagem destaca a rigidez na avaliação, em alguns casos leva os resultados são enganosos.

2.10. Tratamento térmico de arames em forno de chumbo (Recozimento)

A linha de Galvanização é constituída por uma seqüência de processos contínuos pelos quais o arame passa de forma ininterrupta, sendo a Galvanização propriamente dita, uma das últimas etapas.

De forma simplificada, há dois processos fundamentais em toda a linha: o Tratamento Térmico (Recozimento) para adequar as propriedades físicas do arame e a Galvanização (recobrimento com Zinco) para protegê-lo contra a corrosão.

Porém, devido à existência sobre o arame de resíduos de lubrificantes da Trefilação e também de óxidos decorrentes do contato com o oxigênio do ar e da alta temperatura, são necessárias algumas outras etapas, como Resfriamento, Decapagem, Lavagem, Fluxagem, Secagem e Pós-Tratamento (MALLET 2008).

O emprego do aço na engenharia, na indústria ou na agricultura é baseado principalmente nas suas propriedades mecânicas, ou seja, na sua capacidade de suportar os esforços a que está sujeito quando em serviço.

Estas características dependem da sua microestrutura e esta está intimamente relacionada com sua composição e com as condições de fabricação. Estruturas tais como bruta de fusão ou obtidas de altas temperaturas em condições variáveis de velocidade de resfriamento, ou ainda, encruadas por deformação mecânica conferem características que podem se afastar das necessidades de aplicação.

No caso específico das linhas de Galvanização, o tratamento térmico de interesse é o Recozimento para Recristalização ou Subcrítico com o objetivo de remover o encruamento decorrente da trefilação do arame, adequando-o às exigências de resistência e ductilidade (capacidade de conformação).

Conforme Mallet, (2008), outro objetivo do tratamento térmico, secundário, é a eventual “queima” dos resíduos de lubrificantes da trefilação. Na verdade, não é para isso que se projeta um tratamento térmico, mas como o arame passa através de um meio e é aquecido por este, o resíduo presente na superfície do arame (lubrificante) é retirado (em função da alta temperatura do banho de chumbo, o sabão de trefila é removido por contato mecânico dentro deste banho).

2.10.1. Recozimento

O processo de recozimento de arames visando fornecer as propriedades físicas necessárias de resistência à tração e ductilidade pela alteração das microestruturas metalúrgicas do arame, tem sido praticado há várias décadas (POHLE, 1968).

O desenvolvimento de tecnologias modernas não alterou os princípios do processo de recozimento, entretanto, elas permitiram aos trefiladores de arame o refinamento dos parâmetros do processo e deste modo elaborar um produto mais consistente, mais eficiente e com menor impacto ambiental.

O recozimento de arames tem sido realizado historicamente como os seguintes processos (MALLETT, 2008):

- ➔ Fornada;
- ➔ Contínuo.

O recozimento de arames passou de um processo de fornada para um processo contínuo em linha há muitos anos atrás.

O recozimento em fornada, no entanto, implica em longos ciclos de aquecimento, encharque e resfriamento que levam de 12 a 18 horas ou mais. Este processo é amplamente utilizado na indústria, primariamente para produtos de arame que necessitam excelente ductilidade e estruturas metalúrgicas específicas, adequadas para o uso final do arame recozido, como por exemplo, conformação a frio de grampos ou arame recozido negro que é fornecido em larga escala para o setor da construção civil.

O efeito do tratamento térmico em um arame trefilado é de devolver a microestrutura que estava presente no fio-máquina inicialmente. O aumento de temperatura e tempo irá permitir ao trefilador alcançar as propriedades de ductilidade e tração além daquelas originariamente presentes no fio-máquina. Esta é uma função direta de temperatura e tempo, os princípios básicos de tratamento térmico.

O recozimento em linha permite a este processo a combinação com outros como, por exemplo, decapagem e galvanização e foi amplamente adotado pelos galvanizadores de arame como forma de eliminar esta operação que era anteriormente realizada separadamente, com conseqüente redução do custo operacional.

Este processo é aceito e utilizado mundialmente como uma etapa produtiva padrão dentro da galvanização de arames em linha. As propriedades físicas obtidas pelo processo de recozimento em linha são ligeiramente diferentes do recozimento em fornada em função do tempo relativo reduzido na temperatura do processo de recozimento, sendo este tempo segundos ao invés de horas. Contudo, as propriedades físicas são satisfatórias para

uma grande gama de aplicações do produto acabado e atendem as especificações das normas ASTM, AISI, DIN, entre outras utilizadas mundialmente.

O tempo reduzido do arame à temperatura de operação com o processo contínuo permite a recristalização da ferrita, mas não elimina todos os efeitos do processo de conformação a frio. Portanto, as propriedades físicas do arame recozido em linha, embora próximas daquelas apresentadas pelos produtos laminados a quente, são ligeiramente maiores em resistência a tração e menores em alongamento. Os valores reais de resistência a tração e alongamento serão uma função da composição química do aço, quantidade de trabalho a frio realizada sobre o material trefilado, temperatura de recozimento e tempo em processo. A figura 2.16 representa a mudança nas propriedades físicas ocorridas no material trefilado durante o processo de recozimento em linha.

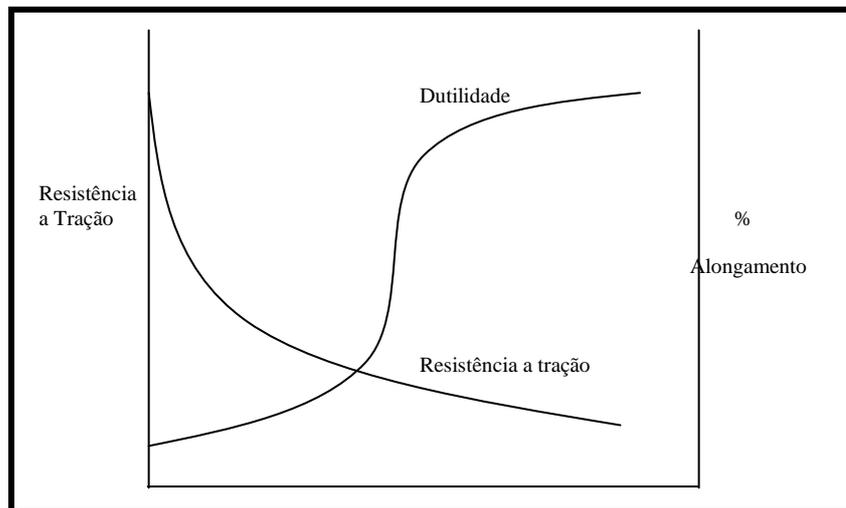


Figura 2.16 Mudança nas propriedades físicas do material durante o processo de recozimento em linha (MALLET 2007).

2.10.2. Fornos de recozimento

Conforme Mallet (2008), o processo de recozimento em linha para diversos arames passando simultaneamente é comumente realizado nos seguintes equipamentos:

- ➔ forno de chumbo (cubas);
- ➔ forno câmara com queimadores (a gás ou a óleo);
- ➔ forno com leito fluidizado;
- ➔ forno câmara com resistências elétricas (mufla).

A principal diferença entre eles está na forma de transferência de calor.

Como o processo de recozimento de arames é realizado em função do tempo e temperatura, os fornos de recozimento adequadamente construídos irão proporcionar as mudanças necessárias nas propriedades dos arames. As características construtivas de cada forno diferem de acordo com a transferência de calor, eficiência energética e cuidados ambientais, entre outras. As diferentes opções de fornos para recozimento contínuo de arames são exibidas na tabela 2.3 (MALLET 2008).

Tabela 2.3 Tabela comparativa dos diferentes fornos de recozimento de arames para processo contínuo.

Comparativo dos tipos de fornos de recozimento contínuo para arames				
Tipo/ Característica	Forno de chumbo	Forno Câmara (com queimadores)	Forno Câmara (com resistências)	Forno de leito fluidizado
Transferência de calor	95%	35%	20%	85%
Forma de transferência de calor	Condução	Convecção/Irradiação	Irradiação	Convecção/Condução
Tipo de recozimento	Isotérmico	Anisotérmico	Anisotérmico	Isotérmico
Eficiência Energética	50%	50%	50%	60%
Questões ambientais	Produtos da combustão Fumos de chumbo Arraste de chumbo Instalações para tratamento de resíduos de chumbo	Transferência de calor	Transferência de calor	Transferência de calor
Questões de saúde ocupacional	Fumos de chumbo	NI	NI	NI
Efeitos negativos no arame	Possível alongamento do arame	Possível influência da chama	NI	NI
Custo de manutenção	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Custo operacional	Energia / Quantidade mínima de chumbo	Energia	Energia	Energia / Quantidade mínima de areia
Produtividade	Alta	Média	Média	Média - Alta
Controle do processo	Muito bom	Regular	Bom	Bom
Custo de investimento	Médio	Alto	Alto	Médio

As cubas de chumbo apresentam excelente capacidade de transferência de calor, produtividade e controle de processo, mas são mais caras tanto do ponto de vista de investimento quanto operacional, e apresentam maiores problemas ambientais (POHLE, 1968).

Quando se usa recozimento em banhos de chumbo, geralmente são empregadas duas cubas, sendo a primeira aquecida a uma temperatura menor e abaixo da temperatura de recristalização para servir de pré-aquecimento e diminuir a exigência térmica da segunda. A primeira cuba de chumbo trabalha a uma temperatura de 450°C e a segunda cuba a uma temperatura de 720°C. A figura 2.17 mostra uma vista lateral esquemática do forno chumbo, onde se visualizam as duas cubas de chumbo.

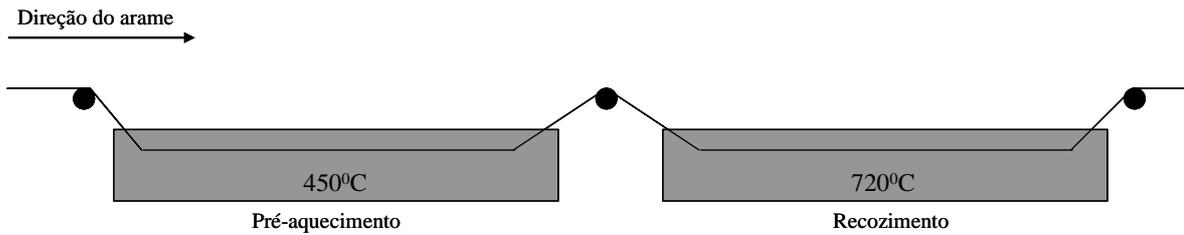


Figura 2.17 Vista lateral do forno de chumbo, onde se visualizam as duas cubas de chumbo e sistema de exaustão de vapores com campânula.

2.10.3. Consumo de chumbo

O consumo de chumbo em cubas de recozimento ocorre devido a três mecanismos:

- Arraste
- Oxidação
- Evaporação

Consumo por arraste

O arraste é o carregamento de chumbo pelo arame e depende de muitos fatores como (MALLET 2002):

- Temperatura do banho: Quanto menor a temperatura, mais viscoso é o banho e, portanto, maior é o arraste de chumbo, que é transportado em função de sua aderência a superfície do arame;
- Capacidade térmica da cuba (quantidade de chumbo na cuba por fio de arame): Se há pouca massa térmica o chumbo solidifica sobre o arame, e é arrastado por ele;
- Bitola (diâmetro) do arame: Quanto maior o diâmetro, maior a área superficial e, portanto, maior o arraste;
- Velocidade da linha*: Quanto maior a velocidade do arame que passa pela cuba de chumbo, maior é o arraste;

* Esta velocidade é determinada em função dos requisitos finais para um arame galvanizado como, por exemplo, limite de ruptura e camada de zinco. Como o processo de uma linha de galvanização de arames é contínuo, as propriedades mecânicas e a camada de

zinco a serem obtidas para um determinado produto acabado ditam a velocidade que este passará por todas as etapas do processo.

- Rugosidade do arame: Quanto maior a rugosidade, maior o arraste. A rugosidade é influenciada por resíduos de lubrificante, sujidades e oxidação do arame;
- Quantidade de óxido de chumbo dissolvido no banho*: Quanto maior, maior o arraste.

Para minimizar a presença de óxido de chumbo no banho, coloca-se sobre o chumbo líquido presente na cuba, uma camada de grafite granulado (coque granulado), que irá evitar a exposição do banho do contato com o ar e com isto diminuir a oxidação do chumbo. Além disto, a camada de grafite também auxiliará na redução das perdas térmicas para o meio ambiente.

- Método de raspagem: Quanto melhor o método de raspagem, menor o arraste.

Método de raspagem

Com o objetivo de melhorar a qualidade superficial final do arame galvanizado, reduzir o impacto ambiental e diminuir os custos com a necessidade de reposição de chumbo na cuba, procura-se minimizar o arraste deste através da instalação de um sistema de raspagem na saída da cuba (DEWITTE 1990). Abaixo são apresentados alguns sistemas de raspagem que podem ser utilizados.

- Seixos rolados;
- Carvão ou coque granulado;
- Vermiculita com ou sem óleo;
- Areia.

Em algumas ocasiões, como salienta Mallet (2008), estes sistemas de raspagem estão colocados diretamente sobre o chumbo, na saída da cuba. Em outras ocasiões, estão colocados em uma caixa acoplada a cuba, ou então logo após a mesma. Independentemente da posição de montagem é importante ter atenção com o ângulo de saída do arame (quanto menor melhor) e o comprimento de raspagem (quanto maior melhor). A figura 2.18 mostra três diferentes condições de montagem da caixa de

raspagem. Na condição 1, com maior ângulo de saída, o comprimento de raspagem é menor, ocasionando um comprimento da superfície de contato entre o arame e o material da caixa de raspagem pequeno. Na condição 2, com o ângulo de saída menor e o comprimento de raspagem maior, a condição de raspagem já é melhor do que na condição 1. Na condição 3, este ângulo é menor ainda do que nas 2 condições anteriores e resulta num maior comprimento de raspagem, sendo esta a melhor condição para a raspagem do chumbo da superfície do arame, pois permite que o fio tenha mais contato com o material utilizado na raspagem do que nas condições citadas anteriormente.

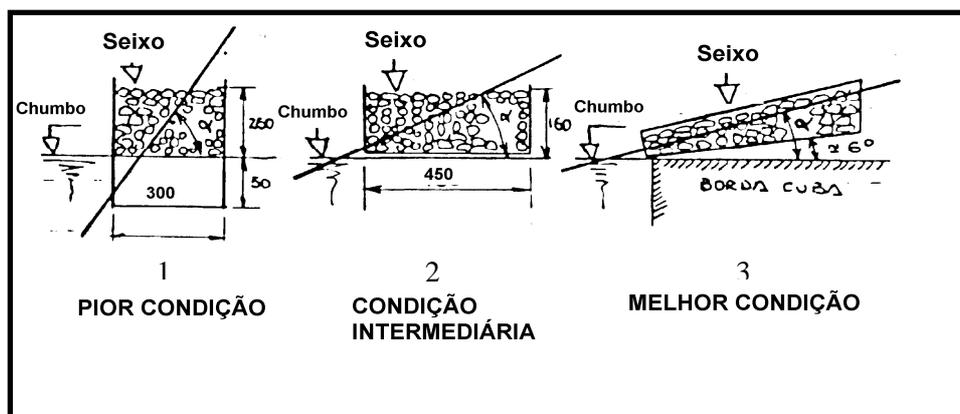


Figura 2.18 Experiência feita com diferentes comprimentos de raspagem e ângulos de saída do arame. (MALLET 2002).

Conforme descrito acima, a melhor condição de raspagem é a condição três, onde o ângulo de saída é pequeno e resulta num maior comprimento de raspagem.

Embora se possa utilizar areia como um meio para a raspagem do chumbo, este não é recomendável, uma vez que a areia reage com o chumbo e com resíduos do sabão lubrificante da trefilação, formando um composto (silicato de chumbo) que o processo posterior de decapagem ácida (realizado com ácido clorídrico) não consegue remover.

Também se deve, em linhas com recozimento em chumbo, evitar o uso de bórax como neutralizante da decapagem do fio-máquina (no caso de decapagem química do fio-máquina), uma vez que resíduos deste também reagem com o chumbo, formando um composto (borato de chumbo) que o ácido clorídrico também não consegue remover. (MALLET 2002).

Para diminuir ainda mais o arraste e adicionalmente se obter uma recuperação do chumbo, é possível, usar um sistema de vibração pneumático na caixa de raspagem,

associado com um aquecimento desta. O uso de um sistema como este é tanto mais importante, quanto maior for a velocidade da linha, uma vez que o arraste aumenta sensivelmente. Este método é visualizado na figura 2.19.

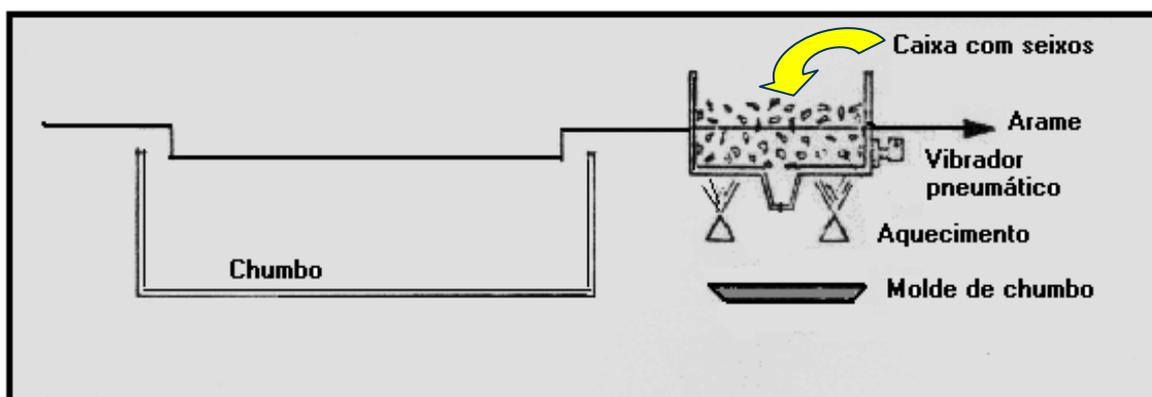


Figura 2.19 Caixa de raspagem com sistema de vibração pneumático e aquecimento. (MALLET 2002).

Consumo por oxidação

A oxidação é a reação do chumbo com o oxigênio do ar formando óxido de chumbo. Este óxido fica na superfície do banho e, devido a sua aparência é vulgarmente chamado de “terra”.

A reação de oxidação é extremamente favorecida pela temperatura e pelo contato metal líquido (chumbo) - ar (oxigênio). Como nada se pode fazer em relação à temperatura (inerente ao processo), deve-se usar uma cobertura sobre o banho para diminuir o contato chumbo – ar.

Desta cobertura exige-se que (MALLET 2002):

- Tenha maior afinidade com o oxigênio do que o chumbo, para evitar que este reaja com o oxigênio;
- Tenha grande densidade, para não ser retirado pela passagem do arame causando desperdício e sujeira na área;
- Seja composto de partículas finas (com maior fator de “empacotabilidade”, com menos vazios, logo com menos espaços para penetração do oxigênio);
- Seja isolante térmico, para também servir como proteção às perdas energéticas (térmicas);

- Seja pouco molhável pelo chumbo, para que não haja perda de chumbo para a cobertura.

Uma cobertura bastante usada é a de coque metalúrgico. A vermiculita, embora bastante usada e com boa isolamento térmica, é muito molhável pelo chumbo. (MALLET 2008)

O próprio óxido pode servir de cobertura, desde que não seja revolvido e evite-se a sua constante remoção, pois quanto mais se remove, mais se forma. No entanto, sem o uso de alguma outra cobertura sobre o banho as perdas térmicas serão mais elevadas, pois somente o óxido não é um bom isolante neste caso.

Consumo por evaporação

A evaporação do chumbo é difícil de ser observada e medida, mas acontece. Aqui, no entanto a preocupação não deve ser o consumo de chumbo (que neste caso é muito pequeno), mas os efeitos danosos à saúde do homem, como já visto anteriormente.

Entretanto, o uso de coberturas para minimizar perdas térmicas e oxidação ajuda bastante a minimizar o problema (MALLET 2008).

O forno de chumbo é constituído de uma campânula sobre ambas as cubas, que funciona como um sistema de exaustão com ventilação forçada e evita a saída dos vapores de chumbo para o ambiente fabril.

2.10.4. Qualidade do material galvanizado

Outro ponto importante a ser discutido é a questão da qualidade superficial dos arames galvanizados. A camada galvanizada deve ser lisa, contínua e livre de imperfeições grosseiras, como falhas do revestimento, excessos de zinco, ferimentos, bolhas e inclusões de fluxo, chumbo, cinza ou borra.

Somente superfícies perfeitamente limpas permitem uma formação normal e adequada das camadas de ligas. O contato deve ser sempre aço-zinco. A presença de outros compostos sobre o metal base (aço) não irá permitir uma boa formação da camada galvanizada.

Quando há falta de zinco, pode-se perceber a superfície do arame sem revestimento em alguns pontos, sendo isto decorrente de uma má limpeza do arame devido a um ou mais de algum dos pontos citados abaixo:

- Decapagem ineficiente;
- Lavagem ineficiente;
- Composição inadequada do fluxo;
- Temperatura de secagem do fluxo inadequada;
- Excesso de cinzas ou coberturas na entrada da cuba de zinco;
- Desalinhamento dos fios;
- Arraste de chumbo do recozimento (raspagem ineficiente).

Neste caso, iremos analisar a questão da influência do arraste de chumbo para a qualidade do arame galvanizado. Em decorrência da presença de chumbo na superfície, o arame apresenta uma rugosidade elevada, que muitas vezes é percebida tanto visualmente quanto pelo tato. Nesta condição, esta rugosidade presente na superfície do arame irá atuar negativamente nas características estéticas finais do produto galvanizado. Este “excesso” de chumbo, que é carregado pelo arame, chega à prensa gaxeta (local onde será realizada a raspagem do zinco do arame). Como já está solidificado desde a saída da cuba de chumbo, este excesso de chumbo, quando passa pela gaxeta, causa um atrito com a superfície interna da mesma, rasgando suas fibras internas e fazendo com isto que a gaxeta já não exerça sobre o arame uma raspagem eficiente, pois permitirá que um excesso de zinco fique sobre o arame.

Assim, o arame galvanizado irá apresentar uma superfície rugosa, que se analisada em laboratório mostrará a presença de chumbo sob a camada galvanizada. O chumbo aderido a superfície do metal base não permitirá que ocorra a reação Fe-Zn, evitando assim o crescimento das camadas de FeZn, prejudicando a qualidade superficial do material. Devido a esta condição superficial, o material não poderá ser enviado ao cliente, sendo sucitado e gerando perdas para toda a cadeia produtiva.

A figura 2.20 mostra a condição superficial de um arame galvanizado camada leve, onde se visualizam manchas escuras na superfície, oriundas de falhas no revestimento.

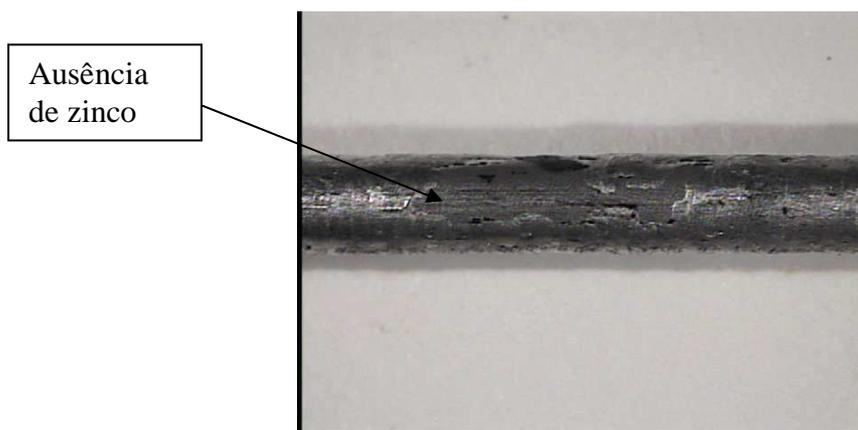


Figura 2.20 Amostra de arame galvanizado mostrando a condição superficial do material, com manchas por falhas no revestimento de zinco. Um dos fatores para que ocorra esta situação é o arraste de chumbo. (SHIBLI 2008)

Outro problema superficial do arame galvanizado, que ocorre em função do arraste de chumbo, é o excesso de zinco em arames camada leve. Neste caso, o excesso de zinco em camada leve é facilmente visível quando este é localizado, formando estrias ou desenhos grosseiros. Quando o excesso de zinco se dá em toda a superfície do arame, este só é percebido através de ensaios de medição da camada.

Na figura 2.21 visualiza-se uma seção de um arame galvanizado com excesso de zinco em sua superfície. Nota-se uma superfície grosseira com elevada rugosidade.

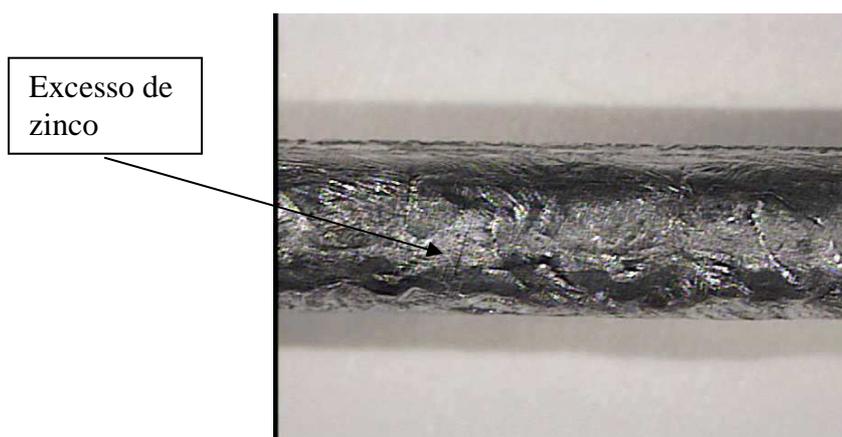


Figura 2.21 Amostra de arame galvanizado com excesso de zinco. (SHIBLI 2008)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa de materiais e métodos, são descritos os experimentos realizados para o estudo da caracterização do arraste de chumbo, bem como para minimizar o arraste deste pelos arames. Primeiramente, será analisado um experimento realizado buscando diminuir o arraste de chumbo pelos arames e posteriormente, o experimento realizado buscando-se responder diferentes questionamentos a respeito do arraste de chumbo comparando-se arames trefilados e laminados a frio e lubrificantes utilizados nestes processos.

3.1. Material

Dentre os experimentos realizados com o intuito de minimizar o arraste de chumbo pelos arames na linha de galvanização, foi testada uma primeira alternativa na linha de galvanização.

Esse primeiro experimento consistia na utilização de um banho de cal como recobrimento para os arames a serem recozidos, buscando minimizar o arraste de chumbo nas demais etapas do processo de galvanização.

O objetivo do teste era verificar se a utilização do banho de CaO aquecido e depositado sobre o arame, iria auxiliar na diminuição do arraste, quando este arame emergisse do banho de chumbo. A função do banho de cal é de recobrir a superfície do arame (depositar sobre o arame um filme de óxido de cálcio), antes da entrada do mesmo no tanque de chumbo, evitando assim que o arame seja “molhado” pelo chumbo líquido.

O conjunto para este teste, fornecido pela Eurolls, foi montado na posição do desbobinamento de arames da linha de galvanização e era composto dos seguintes equipamentos:

- 1 tanque para armazenamento e recirculação do banho;
- 1 bomba pneumática;
- 1 soprador de ar quente;

- ➔ 1 termostato;
- ➔ 1 resistência elétrica;
- ➔ 1 painel elétrico.

Para a montagem do banho, seguiu-se o procedimento abaixo:

Solução: 10 l Ca (OH)₂

Colocar 1 kg de CaO em 10 l de água (10%)

Misturar cuidadosamente, pois a reação é exotérmica

Colocar a solução no tanque e ligar a bomba

Após a montagem do banho de cal e adição no tanque, foi acionada a bomba pneumática e ligada a resistência elétrica para aquecimento do banho. A temperatura foi ajustada para 80°C. Foi também instalado um soprador de ar quente com temperatura ajustada em 500°C, para garantir a secagem do arame e evitar que o mesmo entrasse com algum teor de umidade no banho de chumbo.

Para a realização do teste foi utilizado o arame BWG18 (Ø 1,24 mm). Este material foi galvanizado com uma velocidade de operação de 70 m/min. Para este teste nenhum outro parâmetro do processo de galvanização foi alterado.

O arame foi introduzido no tanque de cal e após passar pelo banho aquecido, entra no canal onde está montado o soprador de ar quente. Após este caminho, o mesmo segue o fluxo normal de produção do arame galvanizado. O princípio de funcionamento do equipamento é que a bomba pneumática faz recircular o banho de cal aquecido e o mesmo é direcionado para a superfície do arame BWG18, quando esta passa pelo tanque. Após a passagem do arame pelo tanque e sua superfície estar recoberta pelo banho de cal, o mesmo passa pelo soprador de ar quente para secagem. A figura 3.1 mostra uma visão geral do conjunto, onde se destacam o tanque em aço inoxidável, o termostato (1) para controle de temperatura do banho, a resistência elétrica (2) para aquecimento do banho e o bico de saída do líquido (3) para recobrir o arame que está passando pelo tanque.

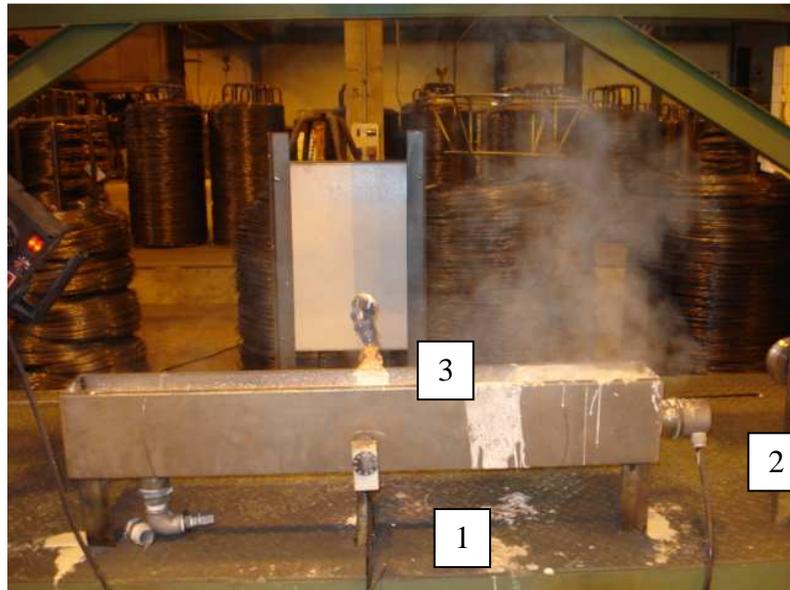


Figura 3.1 Tanque de cal, onde aparecem o termostato (1), a entrada da resistência no banho (2) e o bico de saída do banho (3).

Na figura 3.2 se visualiza o detalhe do bico de saída do banho dentro do tanque.



Figura 3.2 Detalhe do bico de saída do banho com a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ preenchendo o tanque de inox.

Na figura 3.3 tem-se uma visão da passagem do arame pelo tanque com cal e sua saída do mesmo para posterior entrada no soprador de ar quente.



Figura 3.3 Detalhe da passagem do arame pelo tanque e saída para posterior passagem pelo soprador de ar quente com sua superfície recoberta com cal.

Na figura 3.4 se verifica o momento em que o fio de arame BWG18 passa por sobre o rolo de entrada na cuba de recozimento (2^a cuba a 720⁰C) e desce para entrar no banho de chumbo. Nota-se na região de contato do fio com o rolo uma área com pontos esbranquiçados, sendo estes provenientes do resíduo de cal que estava sobre a superfície do arame.

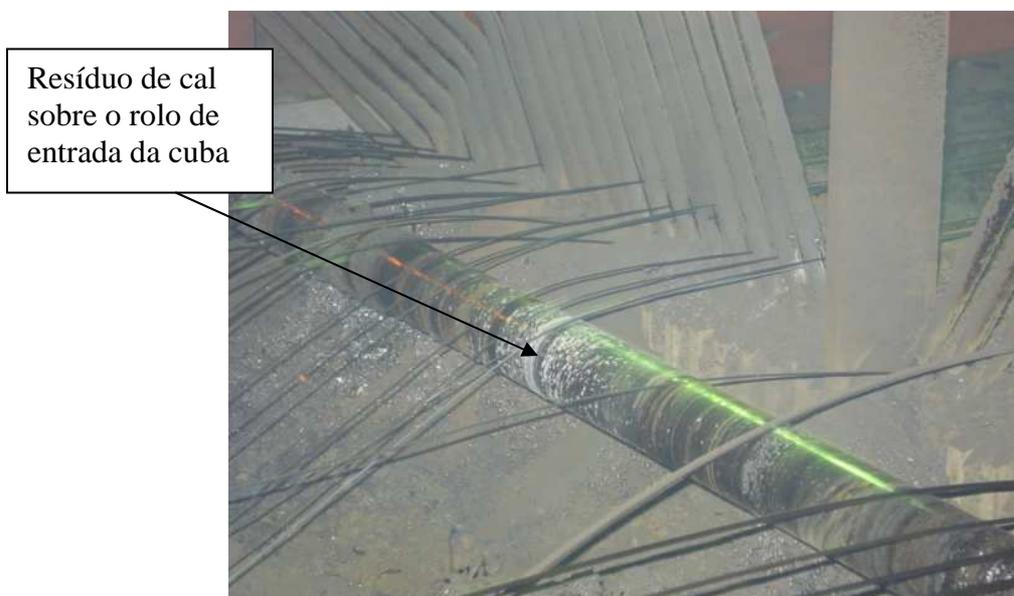


Figura 3.4 Passagem do fio sobre o rolo e entrada na cuba de recozimento com área esbranquiçada denotando presença de partículas de CaO.

Os equipamentos instalados (soprador de ar quente, resistência elétrica e bomba pneumática) funcionaram adequadamente, permitindo que o teste fosse realizado sem interrupções. Foram realizadas análises das amostras galvanizadas pelo processo normal e pelo processo com o uso de cal como recobrimento do material a galvanizar.

Para a análise e experimentos, propostos neste trabalho, foram utilizados arames trefilados pelo processo convencional (com fieiras) e pelo processo de laminação a frio (com microcassetes). O arame trefilado BWG 18 (da classificação inglesa Birmingham Wire Gauge) foi o caso estudado, conforme tabela 3.1.

O arame em questão foi escolhido em função de ser o que tem apresentado maior impacto no arraste de chumbo, considerando sua elevada velocidade de galvanização (70 m/min.).

Tabela 3.1 Faixa de Tolerância Dimensional e Limite de Resistência.

BITOLA BWG	DIÂMETRO (mm)			LIMITE DE RESISTÊNCIA
	NOMINAL	MÍNIMO	MÁXIMO	MÁXIMO
18	1,24	1,22	1,28	55 MPa

O modelo de microcassete utilizado é o CL25C33

O significado do código do microcassete é o seguinte:

CL – Cassete de laminação;

25 – Diâmetro do eixo;

C – Capacidade do microcassete (segundo classificação interna do fornecedor);

33 – Número de rolos de entrada e saída do microcassete.

Em função das características de cada forno de recozimento com chumbo (fabricante, dimensões, ângulo de saída dos fios na caixa de raspagem, etc), este arraste pode variar em maior ou menor grau, levando-se em consideração também os fatores descritos a seguir.

A figura 3.5 a seguir mostra um arame laminado a frio com microcassete onde se visualiza o chumbo aderido a sua superfície. Este “excesso“ de chumbo na superfície do arame será transportado para os processos posteriores, presentes na linha de galvanização. Esta presença indesejada do chumbo causa a contaminação da decapagem ácida, da lavagem e fluxagem.

Uma parte deste chumbo, quando entra em contato com os conjuntos de roldanas e pedras de raspagem, ao longo da linha da galvanização é removido mecanicamente por atrito, depositando-se naquele local.

O chumbo que chega transportado pelo arame até a cuba de zinco, em função da temperatura do banho de zinco (450°C) inicia sua fusão, pois seu ponto de fusão é de 337°C , menor do que a do zinco. No entanto, em função da bitola do arame que o transporta e velocidade, muitas vezes o fio não permanece mergulhado no banho de zinco tempo suficiente para que ocorra uma completa fusão do chumbo. Nestes casos, como já descrito anteriormente, problemas de qualidade superficial do arame galvanizado poderão ocorrer. O chumbo que funde na cuba de zinco se depositará no fundo da cuba devido a sua maior densidade, se comparado com o zinco, e se misturará com o ferro-zinco já presente no fundo da cuba, decorrente da reação Fe-Zn do arame com o banho de zinco fundido. Este chumbo será removido parcialmente quando ocorrer a limpeza da cuba de zinco (remoção de borra de zinco) e ficará misturado junto com a borra de zinco.



Figura 3.5 Adesão de chumbo na superfície do arame trefilado com microcassete (escala 1:1)

3.2. Método

As características dos arames trefilados e laminados a frio e suas implicações no arraste de chumbo foram estudados nos seguintes pontos conforme a figura 3.6.

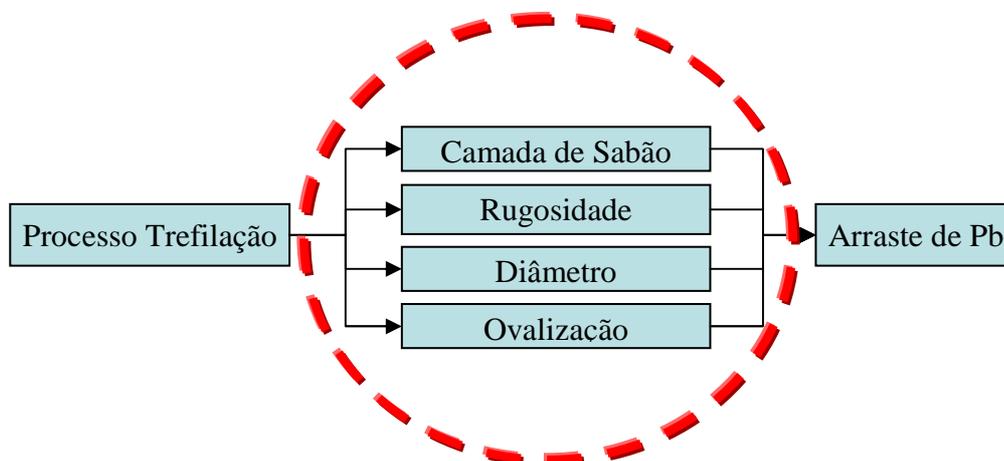


Figura 3.6 Pontos de atuação da pesquisa realizada sobre as características dos arames trefilados e laminados a frio.

Diante de diferentes questionamentos sobre as diferenças entre os processos de trefilação e laminação a frio com microcassete, foram levantados diversos questionamentos a respeito destes processos. Estas perguntas foram levantadas baseando-se nos seguintes pontos:

- ➔ Lubrificação utilizada no processo de trefilação/laminação a frio (sabões de sódio e cálcio);
- ➔ Microcassetes montados com rolos novos;
- ➔ Microcassetes montados com rolos velhos (já com algum desgaste pelo uso);
- ➔ Fieiras novas e fieiras usadas.
- ➔ Material de teste: arame BWG 18 (\varnothing 1,24 mm) por ser o mais rápido (m/min) no processo de galvanização e desta forma promover um maior arraste de chumbo (MALLET 1993)

A partir de diferentes questionamentos, 8 perguntas mais representativas foram analisadas neste processo e para respondê-las foi utilizada a técnica experimental DOE (Design of Experiments), onde a partir de análises estatísticas são projetados os experimentos a serem realizados. Baseados nos testes realizados a partir da coleta de amostras obtiveram-se diferentes respostas para estes quesitos.

Experimento Fatorial		k 2	
Fator		Níveis	
Tipo de Processamento		Trefilado Laminado	
Rugosidade		Alta Baixa	
Número de Réplicas: 5 5 conjuntos de 4 carretéis			
Cada conjunto será formado por: 1- Laminado Rugoso - Laminado com rolo velho 2- Laminado Liso - Laminado com rolo novo 3- Trefilado Rugoso - Trefilado com Ca 4- Trefilado Liso - Trefilado com mistura Ca + Na			
Seqüência de Execução	Número Seqüencial	Processamento	Rugosidade
1	4	Laminado	Liso
2	1	Trefilado	Liso
3	12	Laminado	Rugoso
4	6	Trefilado	Rugoso
5	8	Laminado	Liso
6	7	Trefilado	Liso
7	5	Laminado	Rugoso
8	17	Trefilado	Rugoso
9	19	Laminado	Liso
10	3	Trefilado	Liso
11	15	Laminado	Rugoso
12	13	Trefilado	Rugoso
13	2	Laminado	Liso
14	18	Trefilado	Liso
15	14	Laminado	Rugoso
16	9	Trefilado	Rugoso
17	20	Laminado	Liso
18	11	Trefilado	Liso
19	16	Laminado	Rugoso
20	10	Trefilado	Rugoso

Figura 3.7 Exemplo da técnica D.O.E. utilizada para a realização dos experimentos.

Procedimentos para testes foram elaborados e diversas medições de rugosidade foram realizadas, buscando responder a tais questões. A figura 3.7 mostra a técnica D.O.E. utilizada para a realização destes experimentos.

As questões a serem respondidas, estão descritas a seguir. Estas questões foram analisadas, a fim de utilizar o mesmo critério para a realização dos testes.

Questão 1- Arame relaminado arrasta mais chumbo que o arame retrefilado?

Questão 2 - O arame laminado é mais rugoso que o trefilado?

Questão 3 - O arame relaminado é mais rugoso que o retrefilado?

Questão 4 - O arame mais rugoso arrasta mais chumbo?

Questão 5 - O estado dos rolos afeta a rugosidade?

Questão 6 - A variação de diâmetro no arame laminado é maior do que no trefilado?

Questão 7 - A variação da ovalização no arame laminado é maior do que no trefilado?

Questão 8 - O tipo de sabão faz diferença para a rugosidade do arame trefilado?

Planejamento do experimento do galvanizado:

Questão 1-Arame relaminado arrasta mais chumbo que o arame retrefilado?

Para esta questão foi instalado um dispositivo de coleta (calha) na linha de galvanização onde se depositava o excesso de chumbo que vinha carregado pelos arames. Esta condição é visualizada na figura 3.8, onde se verifica o excesso de chumbo depositado na calha. Este material foi posteriormente pesado para verificar a condição do arraste de chumbo.



Figura 3.8 Excesso de chumbo depositado na calha de coleta para posterior pesagem.

Questão 2- O arame laminado é mais rugoso que o trefilado?

As amostras coletadas foram posteriormente identificadas e enviadas para análise de rugosidade.

Tabela 3.2– Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação da rugosidade entre os arames trefilado e laminado a frio com microcassete.

Arame trefilado com sabão de CÁLCIO							Arame laminado						
Rugosidade (Rq μm)							Rugosidade (Rq μm)						
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts	Média	Desvio Padrão	Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts	Média	Desvio Padrão
T 1.1	0,7451	0,6256	0,2338	0,53483333	0,6018467	0,1496643	L 1.1	0,5907	0,3723	0,3356	0,432867	0,5501367	0,34014
T 1.2	0,6365	0,6491	0,5657	0,6171			L 1.2	0,2067	0,3308	0,614	0,383833		
T 1.3	0,812	0,725	0,8694	0,80213333			L 1.3	0,5204	3,46	0,4029	1,4611		
T 1.4	0,7177	0,6848	0,7048	0,70243333			L 1.4	0,3048	0,5321	0,901	0,5793		
T 1.5	0,4703	0,4331	0,5199	0,47443333			L 1.5	0,3044	0,3608	1,1469	0,604033		
T 1.6	0,378	0,5263	0,8107	0,57166667			L 1.6	0,801	0,522	0,4602	0,5944		
T 1.7	0,5482	0,4411	0,9883	0,6592			L 1.7	0,547	0,547	0,3096	0,467867		
T 1.8	0,5068	0,4606	0,1742	0,38053333			L 1.8	0,4343	0,4359	0,2868	0,385667		
T 1.9	1,101	0,566	0,8266	0,8312			L 1.9	0,2196	0,3008	0,2875	0,2693		
T 1.10	0,4196	0,4739	0,4413	0,44493333			L 1.10	0,3574	0,2362	0,3754	0,323		
T 2.1	0,4258	0,475	0,911	0,60393333	L 2.1	0,5913	0,6344	0,5292	0,584967				
T 2.2	0,7504	0,6576	0,4882	0,63206667	L 2.2	0,4791	0,3745	0,4521	0,435233				
T 2.3	0,5999	0,8672	0,8205	0,76253333	L 2.3	0,4613	0,2941	0,3244	0,359933				
T 2.4	0,5328	0,4648	0,4021	0,46656667	L 2.4	0,3526	0,8106	0,6075	0,590233				
T 2.5	0,3631	0,5147	0,5741	0,48396667	L 2.5	0,3704	0,2912	0,4386	0,366733				
T 2.6	0,6093	1,2435	0,3905	0,74776667	L 2.6	0,3384	0,487	0,6851	0,5035				
T 2.7	0,9557	0,5865	0,5435	0,69523333	L 2.7	0,3582	0,4099	0,7246	0,497567				
T 2.8	0,9408	0,6128	0,8559	0,80316667	L 2.8	0,582	0,2726	0,4464	0,433667				
T 2.9	0,8064	0,6026	0,6711	0,69336667	L 2.9	0,6567	0,3175	0,3828	0,452333				
T 2.10	1,0102	0,7738	0,5499	0,7796667	L 2.10	0,2696	0,4416	0,5472	0,419467				
T 3.1	0,9411	0,8361	0,5856	0,7876	L 3.1	0,285	0,432	0,3648	0,3606				
T 3.2	0,7121	0,9358	0,4823	0,71006667	L 3.2	0,4816	0,4358	0,4835	0,466967				
T 3.3	0,6035	0,6589	0,7192	0,66053333	L 3.3	0,4033	0,4254	0,7736	0,5341				
T 3.4	0,6647	0,4571	0,4794	0,53373333	L 3.4	0,321	0,4684	0,1569	0,315433				
T 3.5	0,5995	0,4511	0,5324	0,52766667	L 3.5	0,8422	0,454	0,3583	0,5515				
T 3.6	0,8086	0,7887	0,5883	0,72853333	L 3.6	0,6367	0,6493	1,0157	0,767233				
T 3.7	0,8272	0,5788	0,61	0,672	L 3.7	0,6258	0,6024	0,6658	0,631333				
T 3.8	0,5589	0,8021	0,9371	0,76603333	L 3.8	0,6307	0,1835	0,8251	0,546433				
T 3.9	0,4661	0,7277	0,4937	0,5625	L 3.9	0,3844	0,6319	1,5698	0,862033				
T 3.10	0,5846	0,7503	1,138	0,8243	L 3.10	0,4028	0,2298	0,3237	0,318767				
T 4.1	0,9021	0,6548	0,882	0,81296667	L 4.1	0,4534	0,8537	0,488	0,598367				
T 4.2	0,691	0,5461	0,5718	0,60296667	L 4.2	0,4443	0,3864	0,7125	0,5144				
T 4.3	0,7424	0,5621	0,9913	0,76526667	L 4.3	0,5265	0,6845	1,5346	0,9152				
T 4.4	0,668	0,58	0,9553	0,73443333	L 4.4	0,2977	0,2707	0,9898	0,5194				
T 4.5	0,7283	0,5749	0,5857	0,62963333	L 4.5	0,5318	0,284	0,3189	0,378233				
T 4.6	0,6967	0,6248	0,5753	0,63226667	L 4.6	0,5804	0,2809	0,4456	0,435633				
T 4.7	0,8259	1,0511	1,1863	1,0211	L 4.7	0,4057	0,348	0,3397	0,364467				
T 4.8	1,0249	0,7367	0,4499	0,73716667	L 4.8	0,5887	0,3508	0,3352	0,4249				
T 4.9	0,8029	0,641	1,04	0,82796667	L 4.9	0,6929	0,1451	1,4738	0,7706				
T 4.10	0,7012	0,9226	0,7542	0,79266667	L 4.10	0,4879	0,4364	0,3685	0,430933				
T 5.1	0,4296	0,6347	0,588	0,55076667	L 5.1	0,6474	0,4542	0,6153	0,5723				
T 5.2	0,644	0,8716	0,512	0,67586667	L 5.2	0,6702	0,4664	0,8599	0,6655				
T 5.3	0,7587	0,6339	0,7023	0,6983	L 5.3	0,6857	0,313	0,2886	0,4291				
T 5.4	0,6049	0,5599	0,4732	0,546	L 5.4	0,441	0,3446	0,3477	0,377767				
T 5.5	0,5428	0,428	0,9268	0,63253333	L 5.5	0,5574	0,3461	0,3788	0,427433				
T 5.6	0,5166	0,754	0,4601	0,5769	L 5.6	0,4188	0,2936	0,2935	0,3353				
T 5.7	0,4972	0,3945	0,5643	0,48533333	L 5.7	0,4027	0,3603	1,1431	0,635367				
T 5.8	0,5255	0,539	0,8037	0,62273333	L 5.8	0,6211	0,5802	0,5413	0,580867				
T 5.9	0,5553	0,5044	0,5856	0,54843333	L 5.9	0,5534	0,8413	0,3926	0,595767				
T 5.10	0,627	0,5431	1,1822	0,7841	L 5.10	0,35	0,3594	0,4165	0,3753				

A seguir aparece o relatório de coleta de amostras realizado para o arame BWG18 trefilado com feiras, e laminado a frio.

Relatório de coleta de amostras do arame Trefilado

Bitola: BWG 18 a galvanizar

Material de entrada: arame trefilado Ø 2,60 mm

Aço: SAE 1007

Tabela 3.3 Sequência de feiras, reduções e lubrificantes utilizados

Passo	1	2	3	4	5	6
Sequência Feiras	2,27	1,95	1,70	1,50	1,35	1,22
Redução (%)	23,77	26,21	24,00	22,15	19,00	18,33
Sabão	9021	9021	9021	9021	9021	9021

Obs: 9021 – sabão a base de sódio

Jogo de feiras: Foi utilizado um jogo usado de feiras de diamante, já tendo produzido 16 t de produtos trefilados.

Velocidade da máquina: 18m/s

Partes mecânicas da máquina: roletes e guias estavam OK.

Relatório de coleta de amostras do arame Laminado

Bitola: BWG 18 a galvanizar

Material de entrada: Fio-Máquina Ø5,50 mm

Aço: SAE 1007

Tabela 3.4 Sequência de feiras, reduções e lubrificantes utilizados

Passo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sequência K7	4,60	3,88	3,30	2,84	2,46	2,15	1,90	1,69	1,51	1,36	1,25
Redução (%)	30,05	28,85	27,66	25,94	24,97	23,62	21,90	20,88	20,17	18,88	15,52
Sabão	QCNW	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Obs: QCNW – sabão a base de cálcio

Jogo de microcassetes: foram revisados e alinhados os K7's antes do teste. Os K7's defeituosos e com o dimensional aberto foram trocados por novos.

Velocidade da máquina no último passo: 26 m/s

Partes mecânicas da máquina: roletes e guias estavam OK.

Decapador da máquina: decapagem por torção e palha de aço

Obs: o 1º passe da máquina é com feira na caixa de sabão.

Questão 3 - O arame relaminado é mais rugoso que o retrefilado?

Para esta questão foi definido o teste de hipótese descrito na tabela 3.5. As amostras foram posteriormente identificadas e enviadas para análise de rugosidade.

Tabela 3.5 Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação da rugosidade entre os arames retrefilados e relaminado a frio com microcassete.

		Rugosidade (Rq µm)					Média	Desvio Padrão
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts				
R	26.1	0,3391	0,6324	0,2768	0,4161	0,94106	0,8169197	
	26.2	1,4898	0,7364	0,2835	0,836566667			
	26.3	0,7594	8,5563	0,2289	3,181533333			
	26.4	0,4791	0,389	0,3833	0,417133333			
	26.5	1,228	0,5311	0,3139	0,691			
	26.6	1,7272	0,5841	0,4994	0,9369			
	26.7	1,7129	0,5165	0,5116	0,913666667			
	26.8	0,327	0,4236	0,6072	0,4526			
	26.9	1,8925	0,5936	0,4361	0,974066667			
	26.10	0,6163	0,5426	0,6142	0,591033333			
e	27.1	0,7826	0,4718	0,6933	0,649233333	0,6686667	0,1394877	
	27.2	0,6137	0,5663	0,498	0,559333333			
	27.3	1,2257	0,9029	0,5209	0,883166667			
	27.4	0,5217	0,7351	0,5835	0,613433333			
	27.5	1,322	0,4357	0,655	0,804233333			
	27.6	1,6479	0,3673	0,613	0,876066667			
	27.7	0,5251	0,9042	0,6256	0,684966667			
	27.8	0,4555	0,4569	0,6133	0,508566667			
	27.9	0,4789	0,608	0,5903	0,559066667			
	27.10	0,5079	0,6836	0,4543	0,5486			
l	28.1	0,5905	0,5817	0,5512	0,574466667	0,5162233	0,1024949	
	28.2	0,3165	0,3339	0,3084	0,3196			
	28.3	0,3676	0,4207	0,4542	0,414166667			
	28.4	0,3469	0,6498	0,6261	0,540933333			
	28.5	0,3849	0,7141	0,3231	0,474033333			
	28.6	0,5079	0,3724	0,5535	0,477933333			
	28.7	0,457	0,8123	0,4509	0,5734			
	28.8	0,4449	0,7973	0,3868	0,543			
	28.9	0,4	0,7847	0,4528	0,545833333			
	28.10	1,2441	0,4133	0,4392	0,698866667			
a	29.1	0,5365	0,8174	0,4262	0,593366667	0,5417033	0,1629931	
	29.2	0,6918	1,0649	0,6144	0,790366667			
	29.3	0,2519	0,3888	0,4167	0,352466667			
	29.4	0,5219	0,6064	0,5607	0,563			
	29.5	0,3095	0,2821	0,5964	0,396			
	29.6	0,3311	0,3999	0,4072	0,3794			
	29.7	0,5842	0,6379	0,9849	0,735666667			
	29.8	0,372	0,3934	0,4322	0,3992			
	29.9	0,3394	0,5347	0,601	0,4917			
	29.10	0,5724	0,4359	1,1393	0,715866667			
r	30.1	0,324	0,3088	0,2889	0,307233333	0,4880333	0,1707703	
	30.2	0,4429	0,3343	0,4367	0,404633333			
	30.3	0,2797	0,6889	0,6044	0,524333333			
	30.4	0,4924	0,3893	0,6394	0,507033333			
	30.5	0,3991	0,4959	0,6298	0,508266667			
	30.6	1,6174	0,4024	0,7821	0,933966667			
	30.7	0,3134	0,3357	0,6608	0,436633333			
	30.8	0,3236	0,3685	0,5798	0,423966667			
	30.9	0,3754	0,3314	0,3935	0,366766667			
	30.10	0,2893	0,7692	0,344	0,4675			

		Rugosidade (Rq µm)					Média	Desvio Padrão
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts				
R	11.1	0,4435	0,2894	0,4563	0,3964	0,6535867	0,12178	
	11.2	0,5994	0,6771	0,7272	0,6679			
	11.3	0,6248	0,4374	0,6844	0,5822			
	11.4	0,5941	0,8176	0,6287	0,6801333			
	11.5	0,7345	0,6268	0,7578	0,7063667			
	11.6	0,4688	0,5638	0,6183	0,5503			
	11.7	0,8021	0,6451	0,5935	0,6802333			
	11.8	0,6862	0,8235	0,5145	0,6747333			
	11.9	0,7876	1,2076	0,5441	0,8464333			
	11.10	0,6001	0,5989	1,0545	0,7511667			
e	12.1	0,7937	1,0796	0,9917	0,955	0,92974	0,0946273	
	12.2	0,8595	1,0476	0,9554	0,9541667			
	12.3	0,6087	0,9965	1,124	0,9097333			
	12.4	0,8386	0,6978	0,8567	0,7977			
	12.5	0,6353	0,8755	1,0452	0,852			
	12.6	1,0345	0,8269	0,932	0,9311333			
	12.7	1,1448	1,4875	0,7769	1,1364			
	12.8	0,9288	1,1243	0,58	0,8777			
	12.9	1,1561	0,8411	0,6185	0,8719			
	12.10	1,2382	0,9002	0,8966	1,0116667			
l	13.1	0,9944	1,0828	0,5355	0,8709	0,89333	0,1024231	
	13.2	1,4058	0,9943	0,7049	1,035			
	13.3	1,0033	1,0782	0,8804	0,9873			
	13.4	1,0385	0,7689	0,6004	0,8026			
	13.5	0,9101	0,7459	1,0629	0,9063			
	13.6	0,5625	0,7999	0,6439	0,6687667			
	13.7	0,7517	1,3599	0,7889	0,9668333			
	13.8	0,9215	0,9948	0,8113	0,9092			
	13.9	0,6149	1,3425	0,7709	0,9094333			
	13.10	0,8263	0,5647	1,2399	0,8769667			
a	14.1	0,9749	0,4987	0,9204	0,798	1,2191267	0,267097	
	14.2	0,8689	0,913	1,5331	1,105			
	14.3	1,1879	1,1347	0,9737	1,0987667			
	14.4	0,7869	0,8842	1,4374	1,0361667			
	14.5	1,0234	0,7032	1,1805	0,9690333			
	14.6	1,4159	1,3249	1,5403	1,4270333			
	14.7	1,0642	1,4348	1,5339	1,3443			
	14.8	1,3981	1,3086	2,2535	1,6534			
	14.9	1,3798	1,1133	1,2111	1,2347333			
	14.10	1,3155	1,4239	1,8351	1,5248333			
r	15.1	1,426	1,5975	1,7046	1,5760333	1,2169933	0,2264759	
	15.2	1,4453	1,1701	1,4957	1,3703667			
	15.3	1,4597	1,2329	1,4699	1,3875			
	15.4	1,2202	1,6916	1,6685	1,5267667			
	15.5	1,1924	0,9273	0,7706	0,9634333			
	15.6	1,2221	0,9552	0,9218	1,0330333			
	15.7	1,0893	0,9769	1,1792	1,0818			
	15.8	1,0903	1,0708	0,8695	1,0102			
	15.9	1,2528	1,0647	0,9129	1,0768			
	15.10	1,2129	0,9972	1,2219	1,144			

Questão 4 – O arame mais rugoso arrasta mais chumbo?

Foram coletados os resíduos do chumbo depositado na calha de coleta, e posteriormente realizada a pesagem comparativa entre as amostras de carretéis laminados a frio com microcassete e com feira. As amostras foram posteriormente identificadas e enviadas para análise de rugosidade. O experimento está descrito na figura 3.9.

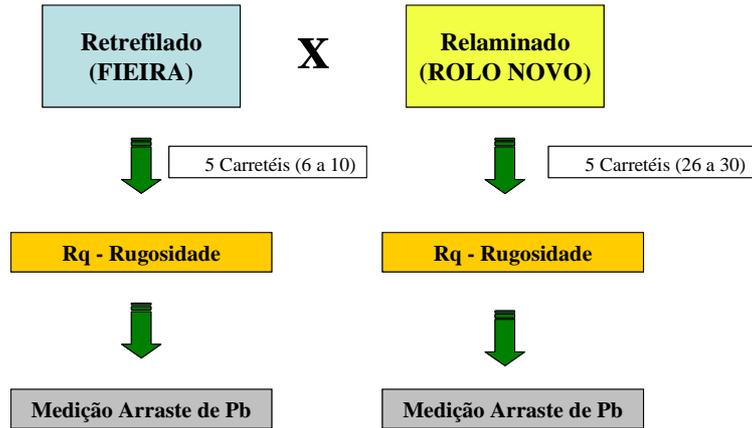


Figura 3.9 Experimento realizado para coleta e pesagem de chumbo depositado na calha de coleta.

Questão 5 – O estado dos rolos afeta a rugosidade?

Para esta questão foi definido o teste de hipótese descrito na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação da rugosidade entre os arames laminados a frio com rolos novos e rolos velhos.

Rugosidade (Rq µm)							
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts	Média	Desvio Padrão	
R	26.1	0.3391	0.6324	0.2768	0.4161	0,94106	0,81691974
	26.2	1.4898	0.7364	0.2835	0.836566667		
	26.3	0.7594	8.5563	0.2289	3,181533333		
	26.4	0.4791	0.389	0.3833	0,417133333		
	26.5	1.228	0.5311	0.3139	0.691		
	26.6	1.7272	0.5841	0.4994	0.9369		
	26.7	1.7129	0.5165	0.5116	0,913666667		
	26.8	0.327	0.4236	0.6072	0.4526		
	26.9	1.8925	0.5936	0.4361	0,974066667		
	26.10	0.6163	0.5426	0.6142	0,591033333		
a	27.1	0.7826	0.4718	0.6933	0,649233333	0,668666667	0,139487693
	27.2	0.6137	0.5663	0.498	0,559333333		
	27.3	1.2257	0.9029	0.5209	0,883166667		
	27.4	0.5217	0.7351	0.5835	0,613433333		
	27.5	1.322	0.4357	0.655	0,804233333		
	27.6	1.6479	0.3673	0.613	0,876066667		
	27.7	0.5251	0.9042	0.6256	0,684966667		
	27.8	0.4555	0.4569	0.6133	0,508566667		
	27.9	0.4789	0.608	0.5903	0,559066667		
	27.10	0.5079	0.6836	0.4543	0.5486		
m	28.1	0.5905	0.5817	0.5512	0,574466667	0,516223333	0,102494872
	28.2	0.3165	0.3339	0.3084	0.3196		
	28.3	0.3676	0.4207	0.4542	0,414166667		
	28.4	0.3469	0.6498	0.6261	0,540933333		
	28.5	0.3849	0.7141	0.3231	0,474033333		
	28.6	0.5079	0.3724	0.5535	0,477933333		
	28.7	0.457	0.8123	0.4509	0.5734		
	28.8	0.4449	0.7973	0.3868	0.543		
	28.9	0.4	0.7847	0.4528	0,545833333		
	28.10	1.2441	0.4133	0.4392	0,698866667		
n	29.1	0.5365	0.8174	0.4262	0,593366667	0,541703333	0,162993056
	29.2	0.6918	1.0649	0.6144	0,790366667		
	29.3	0.2519	0.3888	0.4167	0,352466667		
	29.4	0.5219	0.6064	0.5607	0.563		
	29.5	0.3095	0.2821	0.5964	0.396		
	29.6	0.3311	0.3999	0.4072	0.3794		
	29.7	0.5842	0.6379	0.9849	0,735666667		
	29.8	0.372	0.3934	0.4322	0.3992		
	29.9	0.3394	0.5347	0.601	0.4917		
	29.10	0.5724	0.4359	1.1393	0,715866667		
o	30.1	0.324	0.3088	0.2889	0,307233333	0,488033333	0,170770325
	30.2	0.4429	0.3343	0.4367	0,404633333		
	30.3	0.2797	0.6889	0.6044	0,524333333		
	30.4	0.4924	0.3893	0.6394	0,507033333		
	30.5	0.3991	0.4959	0.6298	0,508266667		
	30.6	1.6174	0.4024	0.7821	0,933966667		
	30.7	0.3134	0.3357	0.6608	0,436633333		
	30.8	0.3236	0.3685	0.5798	0,423966667		
	30.9	0.3754	0.3314	0.3935	0,366766667		
	30.10	0.2893	0.7692	0.344	0.4675		

Rugosidade (Rq µm)							
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts	Média	Desvio Padrão	
R	16.1	0.4298	0.321	0.5216	0,4241333	0,5444333	0,1054183
	16.2	0.5797	0.4286	0.5371	0,5151333		
	16.3	0.7139	0.5909	0.4211	0.5753		
	16.4	0.475	0.8939	0.4443	0.6044		
	16.5	0.5578	0.6845	0.3197	0,5206667		
	16.6	0.432	0.7396	0.3642	0,5119333		
	16.7	1.2513	0.3271	0.4796	0.686		
	16.8	0.5073	0.3828	0.3643	0,4181333		
	16.9	0.5821	0.3549	0.4349	0.4573		
	16.10	1.042	0.4189	0.7331	0,7313333		
e	17.1	0.53	0.4822	0.3202	0,4441333	0,6327933	0,2264709
	17.2	0.8258	0.5454	0.3631	0.5781		
	17.3	0.2321	0.4616	0.2451	0,3129333		
	17.4	0.6095	0.8872	0.4518	0.6495		
	17.5	0.701	1.139	0.4089	0,7496333		
	17.6	0.6424	2.2993	0.546	1,1625667		
	17.7	0.1916	0.9991	0.5162	0,5689667		
	17.8	1.0654	0.609	0.5477	0.7407		
	17.9	0.4068	0.658	0.6217	0,5621667		
	17.10	0.5835	0.4438	0.6504	0,5592333		
l	18.1	0.5138	0.638	0.5432	0.565	0,67075	0,1490862
	18.2	1.1096	0.6959	0.4658	0.7571		
	18.3	0.5863	0.5013	0.4714	0,5196667		
	18.4	1.2285	0.7140	0.8021	1,0153		
	18.5	0.5987	0.4902	0.4819	0.5236		
	18.6	0.8327	0.5375	0.7299	0,7000333		
	18.7	0.7613	0.5806	0.3921	0.578		
	18.8	1.0398	0.4172	0.4322	0,6297333		
	18.9	1.1641	0.5431	0.2863	0.6645		
	18.10	0.8507	0.8045	0.6085	0,7545667		
o	19.1	1.3808	0.6389	0.5483	0.856	0,6948967	0,1709673
	19.2	1.0613	0.3065	0.4134	0,5937333		
	19.3	0.8375	0.3308	0.4348	0,5343667		
	19.4	0.3756	0.5403	0.5508	0.4889		
	19.5	1.0348	0.7685	0.9041	0,9024667		
	19.6	0.5286	0.7535	0.3992	0,5604333		
	19.7	0.94	0.4382	0.2991	0.5591		
	19.8	0.8776	1.3255	0.38	0,8610333		
	19.9	0.6872	0.8119	0.5178	0.6723		
	19.10	1.4246	0.8745	0.4628	0,9206333		
l	20.1	0.4177	0.3638	1.5217	0,7677333	0,6506067	0,1630445
	20.2	0.3501	0.6093	0.4753	0,4782333		
	20.3	0.3331	0.6232	0.5055	0,4872667		
	20.4	1.0223	0.7033	0.6395	0,7883667		
	20.5	0.3609	0.5213	0.2113	0.3645		
	20.6	1.1246	0.5632	0.4865	0,7247667		
	20.7	1.3679	0.6607	0.303	0.7772		
	20.8	1.1015	1.0814	0.3924	0,8584333		
	20.9	0.9739	0.3486	0.4562	0.5929		
	20.10	0.8186	0.7071	0.4743	0,6666667		

Questão 6 – A variação de diâmetro no arame laminado é maior do que do trefilado?

Questão 7 - A variação da ovalização no arame laminado é maior do que no trefilado?

Para as duas questões acima, o método para realização dos experimentos está descrito a seguir.

A tabela 3.7 apresenta as características operacionais dos equipamentos utilizados para a realização dos experimentos concernentes as questões 6 e 7 descritas acima.

Tabela 3.7 Características operacionais dos equipamentos utilizados para os experimentos

	Arame laminado	Arame trefilado
Modelo máquina	MFL	MFL
Produto	2,80	2,80
Diâmetro de saída (mm)	2,85	2,85
Nº de passes	06	05
Diâmetro do fio máquina (mm)	5,50	5,50
Tipo de aço	1407 E	1407 E
Plano de passe	4,65 – 4,00 – 3,42 – 3,10 – 2,85	4,63 – 4,05 – 3,55 – 3,15 – 2,85
Velocidade final (m/s)	16	18
Lubrificante	1º passe - (DP9051)	Todos os passes – (CD812)

Levantamento de dados

A coleta das amostras foi realizada da seguinte forma:

- ➔ Coletar medições de diâmetro em 25 pontos do arame equidistantes a aproximadamente de 5 cm, distribuídos da seguinte forma:
- ➔ Coletar 15 pontos de medições de diâmetro no meio do carretel.

A figura 3.10 ilustra a forma como as amostras foram coletadas.

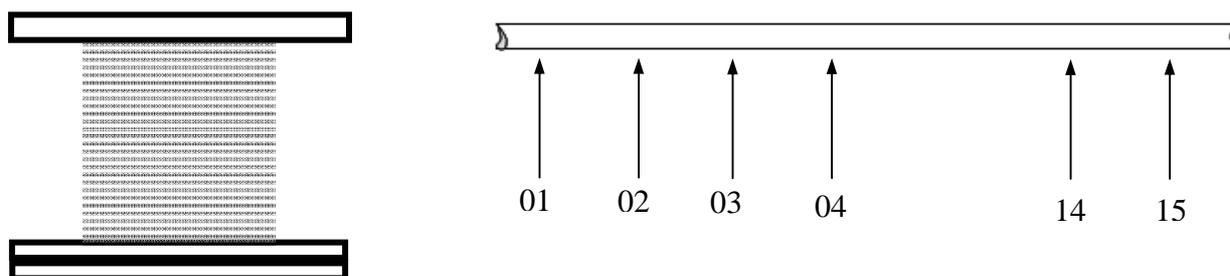


Figura 3.10 Exemplo de como as amostras foram coletadas no meio do carretel.

A figura 3.11 ilustra a forma como as amostras foram medidas após sua coleta.

- ➔ Cada ponto deve conter 03 medições de diâmetro equidistantes a 120° após e obter a variação do diâmetro “dispersão do diâmetro” das 03 medições e a ovalização média de todas as medições;

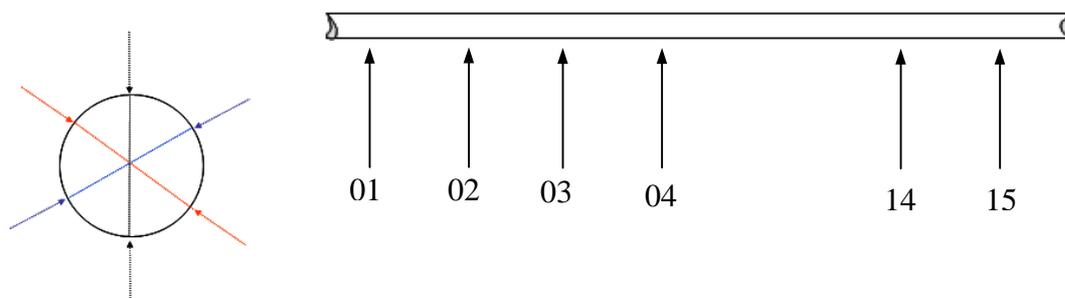


Figura 3.11 Exemplo de como as amostras foram medidas após sua coleta.

A figura 3.12 ilustra a forma como as amostras foram coletadas no início do carretel.

- Coletar 10 pontos de medições de diâmetro no início do carretel;

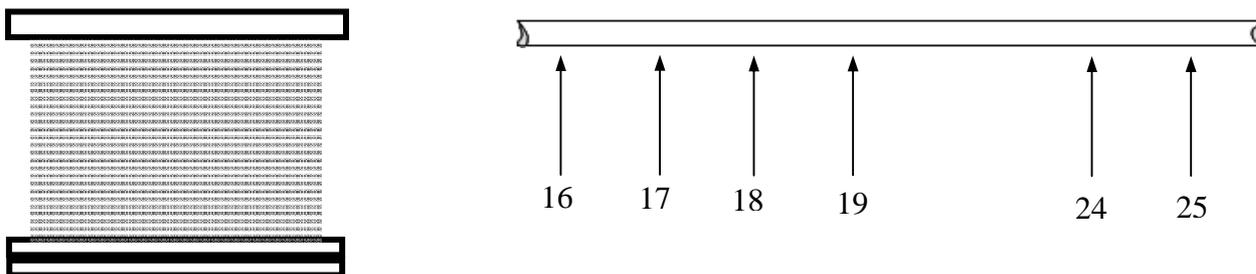


Figura 3.12 Exemplo de como as amostras foram coletadas no início do carretel.

A figura 3.13 ilustra a forma como as amostras foram medidas após sua coleta.

- ➔ Cada ponto deve conter 03 medições de diâmetro equidistantes a 120° e obter a variação do diâmetro “dispersão do diâmetro” das 03 medições e a ovalização média de todas as medições;

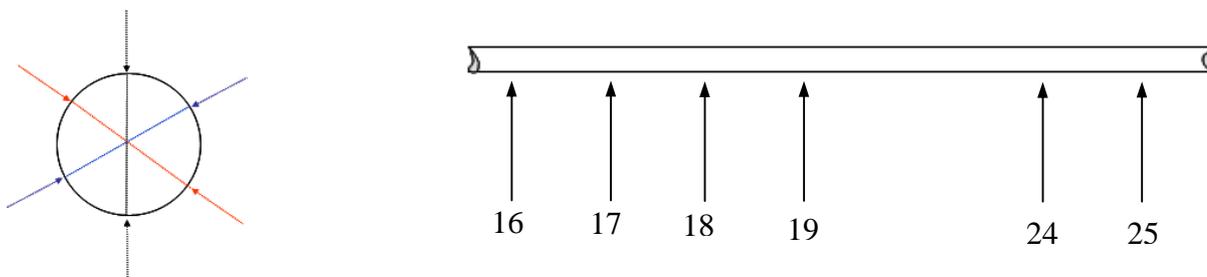


Figura 3.13 Exemplo de como as amostras foram medidas após sua coleta.

Compilação dos dados:

➔ Diâmetro:

Com o resultado das 25 variações do diâmetro “dispersão do diâmetro” por carretel, será possível obter um conjunto de 1000 variações de diâmetro “dispersão do diâmetro”.

➔ Ovalização:

Com o resultado da ovalização média por carretel, será possível obter um conjunto de 40 ovalizações médias.

Questão 8 - O tipo de sabão faz diferença para a rugosidade do arame trefilado?

Para esta questão foi definido o teste de hipótese descrito na tabela 4.4. As amostras foram posteriormente identificadas e enviadas para análise de rugosidade.

Tabela 3.8 Teste de hipótese. Análise realizada baseada na comparação do uso de sabões de sódio e cálcio no processo de trefilação e sua influência na rugosidade dos arames.

Rugosidade (Rq µm)						
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts	Média	Desvio adrião
1.1	0.8978	0.7188	0.4754	0.697333	0,801996667	0,166808286
1.2	0.9837	0.7897	0.4915	0.754967		
1.3	0.8255	0.6148	0.6241	0.688133		
1.4	0.584	0.8912	0.583	0.686067		
1.5	1.0594	0.6161	0.611	0.762167		
1.6	0.8665	0.8002	0.6352	0.7673		
1.7	0.8835	1.0247	0.692	0.866733		
1.8	0.862	0.8442	0.7308	0.812333		
1.9	0.7149	0.8519	0.6422	0.736333		
1.10	1.8004	1.1051	0.8403	1.2486		
2.1	0.7081	0.9502	0.7105	0.7896	0,788046667	0,084066776
2.2	0.9551	0.7793	0.564	0.766133		
2.3	0.9723	0.6199	0.6874	0.759867		
2.4	1.2384	0.858	0.7844	0.960267		
2.5	0.9437	0.5764	0.7683	0.7628		
2.6	0.7765	0.5517	0.6353	0.6545		
2.7	1.061	0.7988	0.7467	0.868833		
2.8	1.181	0.5921	0.5069	0.76		
2.9	0.9338	0.7103	0.8676	0.837233		
2.10	0.8741	0.6864	0.6032	0.721233		
3.1	0.5741	0.8548	0.5151	0.648	0,726256667	0,118027228
3.2	0.7527	0.7425	0.6311	0.708767		
3.3	0.6699	0.4692	0.6993	0.6128		
3.4	1.1418	0.8292	0.5356	0.835533		
3.5	0.4336	0.6749	0.4977	0.5354		
3.6	0.8055	0.5156	0.7577	0.692933		
3.7	0.8267	0.6153	0.6734	0.705133		
3.8	0.7061	0.733	1.0598	0.832967		
3.9	0.8308	0.6272	0.8076	0.7552		
3.10	1.2246	0.8689	0.714	0.935833		
4.1	0.9257	0.7923	0.802	0.84	0,803603333	0,07701268
4.2	0.7401	0.9154	0.6709	0.775467		
4.3	1.0276	0.7865	0.6174	0.8105		
4.4	0.716	0.5514	0.6316	0.633		
4.5	0.8444	1.0206	0.744	0.869667		
4.6	0.9878	0.7787	0.7548	0.840433		
4.7	0.8558	0.7131	0.8538	0.807567		
4.8	0.7659	0.64	0.9007	0.768867		
4.9	1.1851	0.7818	0.7983	0.921733		
4.10	0.9456	0.5997	0.7611	0.7688		
5.1	0.6772	0.8252	0.6511	0.717833	0,755343333	0,161864626
5.2	0.558	0.5309	0.6804	0.589767		
5.3	0.8944	0.7865	0.7754	0.818767		
5.4	0.7158	0.9311	0.6877	0.7782		
5.5	0.7984	1.534	1.0841	1.138833		
5.6	0.8092	0.7569	0.7853	0.7838		
5.7	0.9019	0.6776	0.6864	0.7553		
5.8	0.9592	0.445	0.4475	0.617233		
5.9	0.7255	0.4805	0.5017	0.569233		
5.10	0.5256	1.026	0.8018	0.784467		

Rugosidade (Rq µm)						
Amostra	Medição 1 (Concava)	Medição 2 (Lateral)	Medição 3 (Convexa)	Média pts	Média	Desvio adrião
6.1	1.2357	0.7204	0.569	0.8417	0,91622	0,141144
6.2	0.569	1.1382	0.5409	0.749367		
6.3	1.157	0.83	0.6094	0.865467		
6.4	1.6066	0.9922	0.4312	1.01		
6.5	1.0875	0.6981	0.4406	0.742067		
6.6	1.2706	0.9237	1.398	1.1974333		
6.7	1.1983	0.8783	0.5388	0.8718		
6.8	0.9743	1.3851	0.5272	0.9622		
6.9	1.3019	1.3019	0.5561	1.0533		
6.10	1.0722	0.893	0.6414	0.868867		
7.1	1.0176	1.2257	0.6271	0.9568	0,92114	0,0764844
7.2	0.9442	0.7403	0.7513	0.8119333		
7.3	1.0216	1.137	0.5905	0.916367		
7.4	1.4269	0.6243	0.8177	0.9563		
7.5	0.7585	1.1992	0.4304	0.7960333		
7.6	1.0684	1.0965	0.5009	0.8886		
7.7	1.1821	0.9713	0.5738	0.909067		
7.8	1.2429	0.8005	0.7895	0.9443		
7.9	1.2756	1.1563	0.7284	1.0534333		
7.10	1.4096	0.8474	0.6787	0.978567		
8.1	0.9245	1.0156	0.5128	0.8176333	0,8902833	0,208347
8.2	1.9736	1.8009	0.5467	1.4404		
8.3	0.9342	0.8146	0.631	0.793267		
8.4	1.1694	0.7986	0.6122	0.860067		
8.5	1.0501	0.7155	0.5225	0.7627		
8.6	1.2622	0.6463	0.6923	0.8669333		
8.7	1.0659	0.6078	1.2795	0.9844		
8.8	1.2171	0.874	0.5841	0.8917333		
8.9	1.0492	0.7983	0.5027	0.7834		
8.10	0.9318	0.7498	0.4253	0.7023		
9.1	0.9348	0.4804	0.5041	0.639767	0,8373933	0,1215611
9.2	1.3218	0.8518	0.8518	1.008467		
9.3	1.314	0.8363	0.6442	0.9315		
9.4	1.1687	1.1687	0.4814	0.9396		
9.5	1.1109	0.7105	0.351	0.7241333		
9.6	0.9935	0.8887	0.6699	0.8507		
9.7	1.2427	0.9549	0.5281	0.908567		
9.8	1.0948	0.5839	0.4919	0.7235333		
9.9	1.0487	0.6859	0.4862	0.740267		
9.10	1.1443	0.8927	0.6852	0.9074		
10.1	1.0007	0.968	0.384	0.7842333	0,75674	0,074273
10.2	1.2992	0.8321	0.4563	0.8625333		
10.3	0.7436	0.712	0.5058	0.6538		
10.4	0.9744	0.765	0.5294	0.756267		
10.5	1.0086	0.666	0.4184	0.697667		
10.6	1.0679	0.7379	0.4614	0.7573333		
10.7	0.9327	0.6557	0.4235	0.6706333		
10.8	1.0114	0.564	0.5626	0.712667		
10.9	1.0039	0.7948	0.6329	0.8105333		
10.10	1.1013	0.8984	0.5903	0.8633333		

Rugosidade

No desenvolvimento destes experimentos, conforme discutido anteriormente nas questões elaboradas para os testes de hipótese, o tema rugosidade foi analisado cuidadosamente. Utilizou-se a rugosidade R_q , que é a média entre os picos e vales de uma amostra.

A figura 3.14 demonstra um exemplo desta situação relativa à rugosidade entre picos e vales de uma determinada amostra.

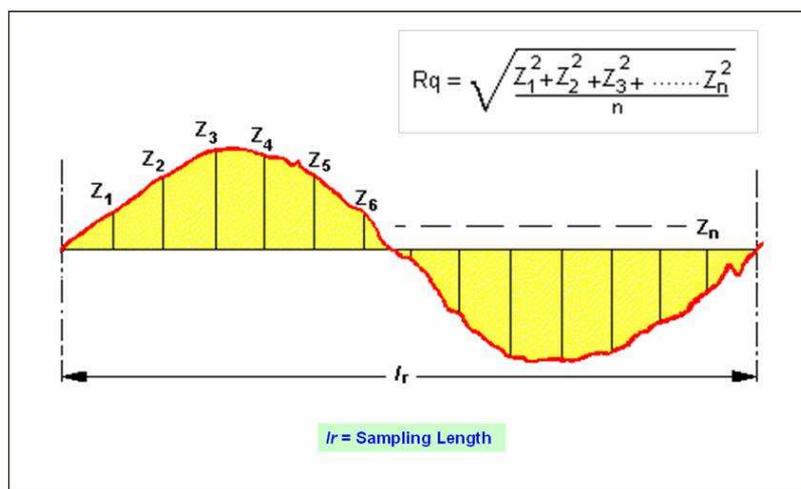


Figura 3.14 Exemplo da rugosidade R_q , que é a média entre os picos e vales apresentados nas amostras.

Para o quesito rugosidade, analisamos a superfície dos arames buscando verificar a sua influência para o arraste de chumbo. A figura 3.15 ilustra como foram fixados os arames no rugosímetro e como se realizou esta medição.

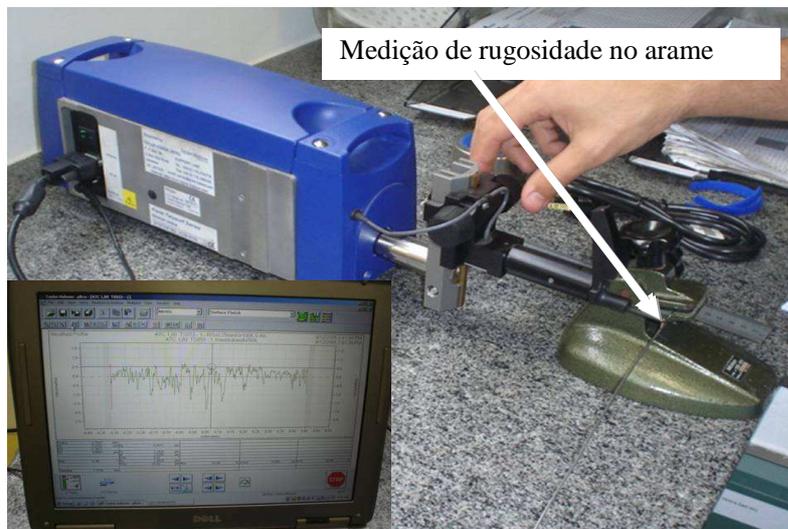


Figura 3.15 Foto ilustrativa da medição de rugosidade do arame

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseados nos experimentos realizados, diferentes questionamentos foram respondidos, obtendo-se desta maneira um maior entendimento e caracterização do problema. A seguir estão descritos os resultados obtidos a partir destes experimentos realizados.

Experimento 1 – Teste com o tanque fornecido pela Eurolls

O resultado do experimento realizado na linha de galvanização com o tanque contendo a solução de CaO foi o seguinte:

A solução de 10% de CaO em água, à medida que o banho era utilizado, evaporava, exigindo a complementação do banho, uma vez que a temperatura utilizada no experimento foi de 80⁰C. Outro ponto negativo é que a solução, com o passar do tempo, apresentava a formação de “placas” e “grumos” (em função da evaporação da água e aumento da concentração do banho), dificultando o funcionamento da bomba pneumática e conseqüente realização do teste. Nesta situação era necessário adicionar água ao banho para evitar a formação destes grumos. Desta forma, a indicação da Eurolls, sugerindo trabalhar com uma concentração mais elevada do banho de cal, não se mostrou adequada.

Outro ponto relevante é a contaminação devido ao arraste da cal por sobre os equipamentos na linha de galvanização. Para um fio-teste, como foi utilizada, a quantidade de cal espalhada foi bastante alta. Em escala maior para mais fios, teríamos que ter uma instalação apropriada, com maior controle e que ocuparia uma área dedicada, hoje indisponível na linha de galvanização. A figura 4.1 mostra áreas esbranquiçadas que denotam o arraste de cal pelo arame e este vai se depositando ao longo do caminho do mesmo.



Figura 4.1 Foto ilustrativa da contaminação dos equipamentos ao longo da linha de galvanização.

A partir das análises realizadas em laboratório metalográfico, as amostras para determinação de chumbo foram digeridas com ácido nítrico e analisadas no espectrômetro de emissão atômica (plasma).

A análise metalográfica é mostrada na figura 4.2 abaixo, onde não se visualiza arraste de chumbo pelo arame.

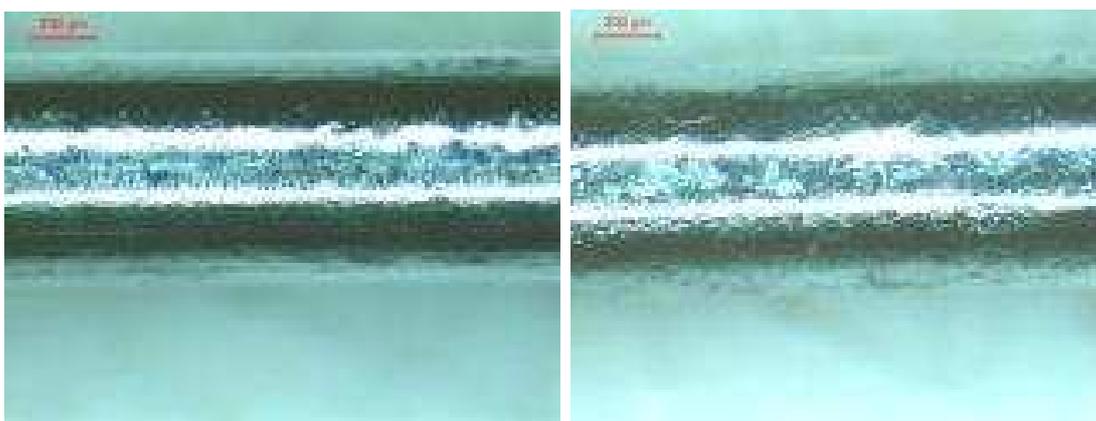


Figura 4.2 Arame galvanizado sem cal (esquerda) e arame com cal (direita).

A camada de zinco das amostras apresentou o resultado apresentado na tabela 4.1. Pelo resultado do experimento verifica-se que o arame galvanizado com cal

apresentou uma gramatura de zinco mais elevada sobre o arame do que o arame galvanizado sem cal.

Tabela 4.1 Efeito do banho de cal na camada de Zn formada sobre o arame laminado.

Amostra	Camada Zn (g/m ²)
Arame galvanizado sem cal	90,0
Amostra 1 Arame galvanizado com cal	126,6
Amostra 2 Arame galvanizado com cal	142,0

Experimento 2 – Resultado das questões elaboradas pela metodologia DOE e testes de hipótese.

Questão 1 - O arame relaminado arrasta mais chumbo que o arame retrefilado?

Sim, o arame relaminado arrasta mais chumbo do que o arame retrefilado, pois a quantidade pesada devido ao arraste de chumbo é maior no arame relaminado do que no retrefilado. A tabela 4.2 mostra uma comparação entre o arame relaminado com microcassete e o arame retrefilado com fieira.

Tabela 4.2 Tabela comparativa da massa de Pb arrastada pelas arames produzidos sob diferentes processos de conformação a frio.

Arraste de Pb (g/t)	
Relaminado (rolo novo)	Retrefilado
33	0
216,06	0
125,41	0
91,73	4

Questão 2- O arame laminado é mais rugoso que o trefilado?

Durante a realização dos testes aconteceram alguns eventos de quebras no material durante o seu processo de trefilação com fieira ou laminação a frio com microcassetes, conforme descrito a seguir.

Relatório de coleta de amostras do arame Trefilado

Bitola: BWG 18 a galvanizar

Material de entrada: arame trefilado Ø 2,60 mm

Aço: SAE 1007

➡ Quebras e enleios:

Quebra de arame no bobinador, entre a 4ª e a 5ª amostra do estocador 1.

Quebra de arame por solda no 4º passe, entre o estocador 1 e o estocador 2.

Quebra de arame no bobinador, entre o estocador 2 e o estocador 3.

Quebra de arame na entrada do bobinador, entre a 5ª e a 6ª amostra do estocador 4.

Quebra de arame no bobinador, entre a 7ª e a 8ª amostra do estocador 4.

Quebra de arame no 6º passe, entre o estocador 4 e o estocador 5.

Enleio na saída do material, entre a 2ª e a 3ª amostra do estocador 5.

As quebras ocorreram devido a efeito de má lubrificação do material.

Relatório de coleta de amostras do arame Laminado

Bitola: BWG 18 a galvanizar

Material de entrada: Fio-Máquina Ø5,50 mm

Aço: SAE 1007

➡ Quebras e enleios:

Quebra de arame no 10º passe, entre a 1ª e a 2ª amostra do carretel 1.

Quebra de arame no 11º passe, entre a 4 e a 5ª amostra do carretel 1.

Quebra de arame no 11º passe, entre a 6ª e a 7ª amostra do carretel 1.

Enleio de FM, entre a 5ª e a 6ª amostra do carretel 4.

Respondendo a questão 2, temos que não, o arame laminado é mais liso do que o trefilado por conta do processo de laminação a frio do arame, se comparado com o processo de trefilação do arame. Isto se deve a diferença entre os processos de conformação a frio, onde na laminação com microcassete há uma compressão do material quando este passa pelos rolos laminadores enquanto que na trefilação ocorre além das forças de compressão do material, a força de tração do mesmo. O atrito na trefilação é maior do que na laminação (em virtude disto é que se faz obrigatório o uso de sabões lubrificantes para que seja possível realizar a trefilação). A figura 4.3 mostra a correlação entre as rugosidades dos arames trefilados e laminados.

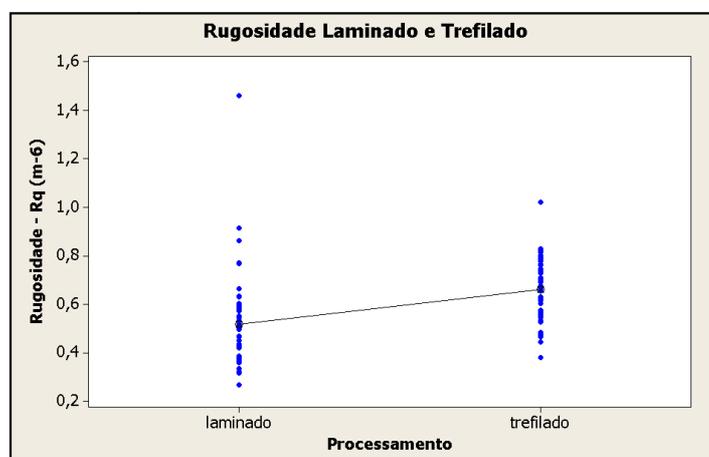


Figura 4.3 Gráfico da rugosidade do arame trefilado com fieira X arame laminado com microcassete.

Questão 3 - O arame relaminado é mais rugoso que o retrefilado ?

Não, o arame relaminado é mais liso que o arame retrefilado por conta do processo de laminação a frio do arame, se comparado com o processo de trefilação do arame. A resposta obtida para esta pergunta segue a mesma linha de raciocínio apresentada na questão 2. A figura 4.4 demonstra uma comparação entre os arames produzidos por ambos processos de laminação a frio e trefilação. Percebe-se a menor rugosidade do arame relaminado quando comparado com o arame retrefilado.

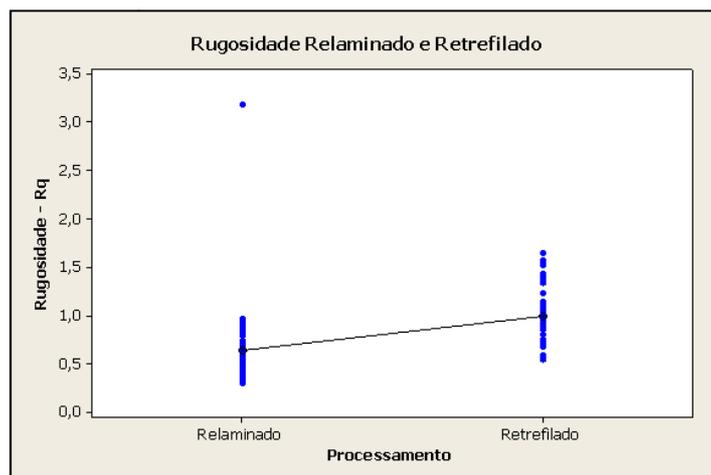


Figura 4.4 Gráfico da rugosidade do arame retrefilado com fieira X arame relaminado com microcassete.

Questão 4 – O arame mais rugoso arrasta mais chumbo?

Não, o arame mais rugoso não arrasta mais chumbo. Conforme visto anteriormente o arame relaminado tem uma rugosidade menor do que o arame retrefilado. A medição realizada (pesagem) do chumbo presente na calha montada na linha de galvanização apontou uma maior quantidade de chumbo arrastado para o caso do arame menos rugoso, o relaminado. A tabela 4.3 mostra uma comparação da pesagem realizada o chumbo coletado devido ao arraste entre o arame relaminado com microcassete e o arame retrefilado com fieira.

Tabela 4.3 Tabela comparativa da massa de Pb arrastada pelas arames produzidos sob diferentes processos de conformação a frio.

Arraste de Pb (g/t)	
Relaminado (rolo novo)	Retrefilado
33	0
216,06	0
125,41	0
91,73	4

Questão 5 – O estado dos rolos afeta a rugosidade?

Não, o estado do rolo não afeta a rugosidade, conforme análise realizada e visualizada na figura 4.5 abaixo. Na comparação realizada entre rolos novos e velhos utilizados nos microcassetes não foi encontrada diferença significativa para a rugosidade de ambos tipos de rolos.

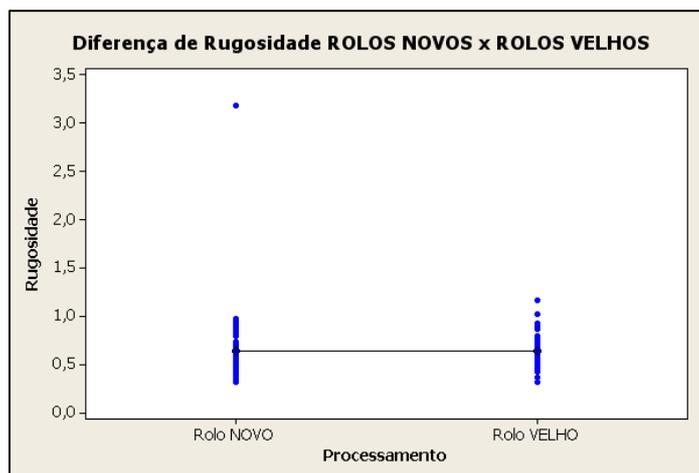


Figura 4.5 Gráfico da rugosidade de rolos novos X rolos velhos utilizados em microcassete

Questão 6 – A variação de diâmetro no arame laminado é maior do que do trefilado?

Esta questão foi avaliada em dois locais distintos, tendo sido encontrados resultados diferentes entre si. Não pudemos afirmar que a variação do diâmetro é maior no arame laminado ou no arame trefilado. As figuras 4.6 e 4.7 exemplificam esta situação.

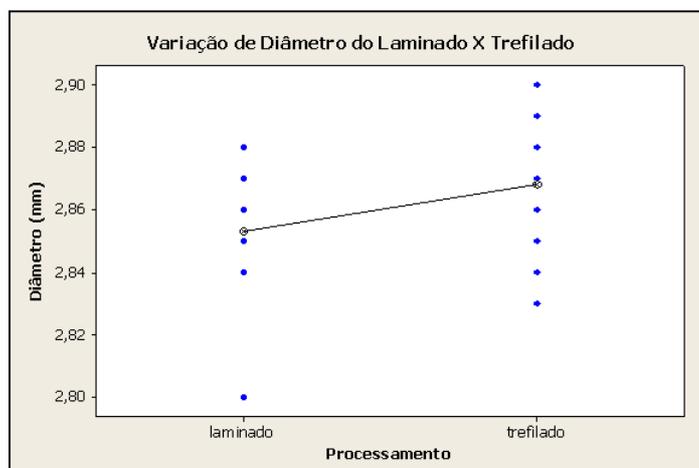


Figura 4.6 Gráfico da variação de diâmetro em arames laminados com microcassete e arames trefilados com fiação

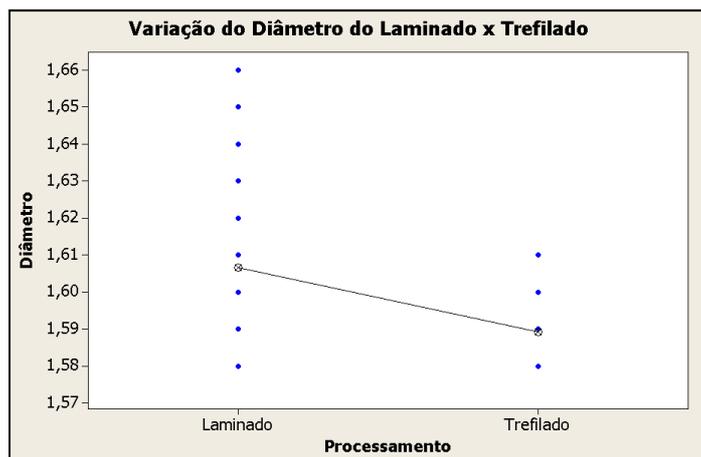


Figura 4.7 Gráfico da variação de diâmetro em arames laminados com microcassete e arames trefilados com feira

Questão 7 - A variação da ovalização no arame laminado é maior do que no trefilado?

Esta questão, a exemplo do que foi descrito na questão 6, também foi avaliada em dois locais distintos, tendo sido também encontrados resultados dissonantes. Não pudemos afirmar que a variação da ovalização é maior no arame laminado ou no arame trefilado. As duas próximas figuras (4.8 e 4.9) exemplificam esta situação.

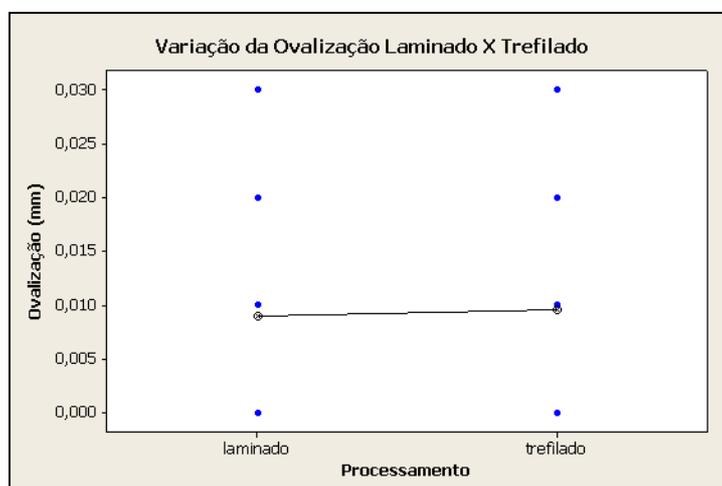


Figura 4.8 Gráfico da variação da ovalização em arames laminados com microcassete e arames trefilados com feira

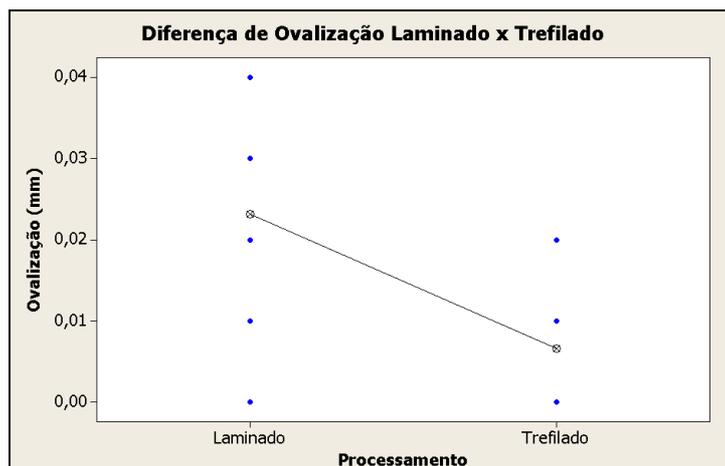


Figura 4.9 Gráfico comparativo da variação da ovalização em arames laminados com microcassete e arames trefilados com fieira

Questão 8 - O tipo de sabão faz diferença para a rugosidade do arame trefilado?

Sim, o arame trefilado com sódio é mais rugoso, conforme análise realizada e visualizada na figura 4.10 abaixo.

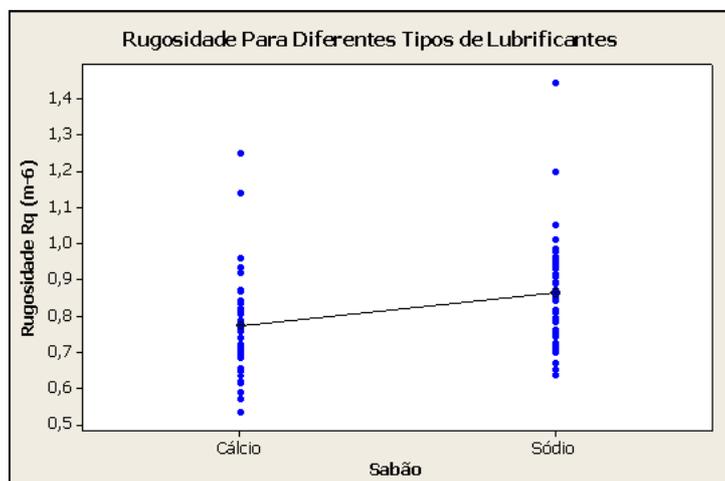


Figura 4.10 Gráfico comparativo da rugosidade para diferentes tipos de lubrificantes (Ca e Na)

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentamos as conclusões obtidas a partir dos experimentos realizados com o tanque de cal em linha de galvanização e também com o projeto de experimentos realizado em arames trefilados e laminados a frio.

Com base nos experimentos realizados em linha de galvanização com o tanque de cal chegamos às seguintes conclusões:

1- As amostras galvanizadas “com cal” apresentaram uma gramatura maior de zinco do que as amostras sem cal, com os parâmetros do processo de galvanização inalterados no caso do BWG18. Contudo, não podemos afirmar que a utilização de cal no processo de galvanização irá aumentar a camada de zinco sobre o arame. Seria necessário realizar mais testes comparativos para podermos chegar a esta conclusão;

2- Embora tenha sido possível a realização do teste com o equipamento enviado pela Eurolls, este processo não é comumente usado em linhas de galvanização e exigiria a instalação de tanques adicionais e controles hoje inexistentes no processo normal de galvanização;

3- O resultado do ensaio como um todo, mesmo levando-se em consideração a análise do teor de chumbo, é incipiente para afirmar que esta modificação no processo irá eliminar ou minimizar a questão do arraste de chumbo. Este acompanhamento deve, caso se deseje dar continuidade neste teste, ser realizado por um período de tempo mais prolongado com uma maior base de dados estatísticos.

Analisando os resultados obtidos a partir do projeto de experimentos realizado chegou-se às seguintes conclusões:

1 - O arame relaminado arrasta mais chumbo do que o arame retrefilado, pois a quantidade pesada de chumbo que foi coletada na calha devido ao arraste pelo arame é maior no arame relaminado do que no retrefilado;

2 - O arame laminado é mais liso do que o trefilado por conta do processo de laminação a frio do arame, se comparado com o processo de trefilação do arame. Com

base nos ensaios de rugosidade realizados e dados coletados pode-se chegar a esta afirmativa;

3 - O arame relaminado é mais liso que o arame retrefilado por conta do processo de laminação a frio do arame, se comparado com o processo de trefilação do arame.

4 - O arame mais rugoso não arrasta mais chumbo. Conforme visto anteriormente, o arame relaminado tem uma rugosidade menor do que o arame retrefilado e arrasta mais chumbo. Cabe salientar nesta conclusão que o arame mais rugoso (retrefilado) utiliza sabão em todos os passes de retrefila, enquanto que o arame relaminado com microcassete não. Esta condição nos leva a pensar na hipótese de que a camada de sabão remanescente entre a superfície do arame retrefilado e o chumbo líquido cria uma condição que minimiza o molhamento do arame pelo chumbo. O sabão age formando uma película sobre a superfície do arame, cobrindo as imperfeições oriundas do processo de trefilação. Esta película irá de certa forma “evitar o contato do chumbo líquido com o metal base e conseqüentemente o arraste do chumbo”. Enquanto, no caso do arame relaminado, que tem uma camada de sabão ínfima, se comparado com o arame retrefilado esta condição de molhabilidade está presente no material;

5 - O estado do rolo não afeta a rugosidade. Na análise dos resultados encontrados não apareceu variação relevante da rugosidade no caso de comparação de rolos novos X rolos velhos;

6 - O arame trefilado com sódio é mais rugoso, conforme análise realizada nas amostras coletadas. Para o mesmo experimento realizado com dois tipos de sabões diferentes, o arame trefilado com sódio mostrou-se mais rugoso.

Arares mais rugosos arrastam menos chumbo, pois está se considerando que fatores como tensão superficial na interface arame X chumbo líquido e quantidade de sabão ou óxido residual na superfície do arame interferem no sentido de promover um menor arraste de chumbo pelo arame. Esta conclusão foi obtida através da massa de Pb medida no arraste deste pelo arame na saída da cuba de chumbo.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos dados levantados com base nos experimentos apresentam-se algumas sugestões para futuros desenvolvimentos, descritas a seguir.

1 - Utilização de sistema de raspagem mecânica para minimizar o arraste de chumbo pelos arames recozidos na saída da cuba, evitando o arraste e contaminação do meio ambiente e demais etapas do processo de galvanização;

2 – Utilização de sistema de movimentação do meio de raspagem mecânica (coque granulado) na saída da cuba, evitando a criação de caminhos preferenciais (túneis) que dificultam a raspagem mecânica na superfície do arame;

3 – Análise e utilização de produto(s) para recobrimento do arame trefilado a galvanizar, antes deste adentrar ao banho de chumbo, que venham a evitar ou minimizar o arraste de chumbo;

4 - Utilização de substâncias que em contato com o arame recozido com chumbo e aderido à sua superfície possa transformar este óxido de chumbo novamente em chumbo metálico na saída da cuba;

5 - Aprofundar o estudo para entendimento do fenômeno do arraste de chumbo na superfície do arame x banho de chumbo líquido analisando o fenômeno da molhabilidade do material.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, Bengt-Ivar, **La influencia del estado superficial sobre las características técnicas de materiales metálicos**, ALAMBRE 31 (1981) 6, ALAMBRE 32 (1982) 1.

AVNER, S. H. **Introduction to Physical Metallurgy**. United States of America: McGraw-Hill, 1964

BANERJEE, B.R. **Annealing Heat Treatments**, Met. Prog. Nov 1980, p.59.

CAREY, V.P. **Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena Series in Chemical and Mechanical Engineering**. Chapters I, II and III, Hemisphere Publishing Corp, 1992.

CETLIN, P. R. **Trefilação Básica**, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais UFMG, Belo Horizonte, 2002.

CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 1981.

COELHO, A. R. Z. et alii, **Recozimento de Arames de Aço Carbono**, Simpósio Anual da COEMA, Volta Redonda, 1976

COLPAERT, H., **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, IPT, 1951.

COLVIN, M. T. et alii, **Wire cleaning: A technical study**, WIRE JOURNAL INTERNATIONAL, August, 1999.

COUTINHO, M. P. **Influência da morfologia da superfície na molhabilidade do titânio comercialmente puro**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2007.

DEWITTE, M. **Lead heat treatment of wire with prevention of lead entrapment**. United States Patent Number 4.954.183. September, 1990

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DOVE, A. B., **Ferrous Wire**, Vol. 1, The Wire Association, Inc., Guilford, Connecticut, 1989.

DOVE, A.B. **Steel Wire Handbook**, Vol.2. Stanford. The Wire Association, 1979.

DÜREN, A. T. e MÜLLER, A., **Cinética do Recozimento de Aços de Baixo Carbono Encruados por Trefilação**, 34º Congresso ABM, 1979.

ENGHAG, P. **Steel Wire Technology**. Sweden: Repro Örebro University, 3ª ed., 2003.

FLEMING, M. A., SEN, P. K., **The role of Diamond Wire Drawing Dies and What Influences Die Life**, Simpósio Internacional de Trefilação, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Novembro de 1999.

- GERDAU. **Processo de Produção do Aço**. <<http://www.gerdau.com.br>>, 2006
- GRACIA Jr L., MALLET, A., **Curso de Galvanização**, 1985, 1989, 1993.
- HORSTMANN, D., **Faults in Hot Dip Galvanizing**, Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1983.
- KALWEIT, M., **Wire Cooling on High Performance Drawing Machines**, Wire Journal International, Julho 1997, pp. 88-91.
- KRELL, G. **The Solid-Liquid Boundary in Chemical Engineering**, Brit. Chem. Eng., 12 (4), 1967.
- LEITÃO, J.; HEGDAHL, T. **On the measuring of roughness**. Acta. Odont Scand, Oslo, 39 (6): 379-384, 1980
- LESLIE W.C. **The Physical Metallurgy of Steels**, Techbooks India, 1991.
- MALLET, A. **Fundamentos de Trefilação**. Gerdau. 2008
- MALLET, A. **TRE-020 Tratamento Térmico na Galvanização**. Módulo SCI, Gerdau. 2007.
- MARTINEZ, G.A.S. **Comportamento da lubrificação no tribo-sistema de trefilação a altas velocidades**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais. 1998.
- POHLE, H. J., **Perdas térmicas dos banhos de chumbo e de galvanização**, Stahl und Eisen 88 (1968) N° 10.
- SHIBLI, S.M.A.; MANU, R.; BEEGUM, Seminar. **Studies on the Influence of metal oxides on the galvanic characteristics of hot-dip zinc coating**. Surface and Coatings Technology 202 (2008) pag. 1733-1737.
- TOMAZELLI, P., **Otimização dos Ciclos Térmicos dos Fornos de Recozimento das linhas de Zincagem – Estudo Teórico**, ET-82-P-17, Siderúrgica Riograndense, 22/07/87.
- VAN VLACK, L. H., **Princípios de Ciências dos Materiais**, Editora Edgard Blücher Ltda., 1970, Reimpressão 1981.
- VLADIMIROV, Y. V., **Heating schedules for wire of pre-eutectoid steel in patenting and normalizing**, STEEL IN THE URSS, February 1972.
- WHITTON, R., **Development of galvanizing practices**, Wire Journal International, May 1986.
- WRIGHT, R., **Physical Conditions in the Lubricant Layer**, Wire Journal International, Agosto de 1997, pp. 87-92.
- YALAMANCHILI, B., POWER, P. M., NELSON JR., J. B., **Effect of Residual Elements on Low Carbon Rod Quality and Implications to the End User**, Wire Journal International, Maio 1999, pp. 100-105.