



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**



**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE
REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS POR SOLDAGEM EM
MARTELOS TRITURADORES DE BATERIAS AUTOMOTIVAS**

Emydio Clemente de Sousa Neto

Campina Grande/PB
Julho de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725a Sousa Neto, Emydio Clemente de.
Avaliação da resistência ao desgaste de revestimentos duros aplicados por soldagem em martelos triturados de baterias automotivas / Emydio Clemente de Sousa Neto. – Campina Grande, 2015.

102 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel, Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos."

Referências.

1. Resistência ao Desgaste. 2. Revestimentos Duros. 3. Ligas à Base de Cobalto. 4. Processo PTA-P e SMAW. 5. Martelos Triturados de Baterias Automotivas. I. Maciel, Theophilo Moura. II. Santos, Marco Antonio dos. III. Título.

CDU 679.7.024.7(043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE
REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS POR SOLDAGEM EM
MARTELOS TRITURADORES DE BATERIAS AUTOMOTIVAS**

Emydio Clemente de Sousa Neto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito final para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

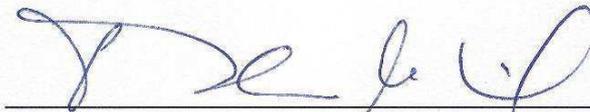
Orientadores: Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel e
Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos

Campina Grande/PB
Julho de 2015

“AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE REVESTIMENTOS DUROS
APLICADOS POR SOLDAGEM EM MARTELOS TRITURADORES DE BATERIAS
AUTOMOTIVAS”.

EMYDIO CLEMENTE DE SOUSA NETO

Dissertação Aprovada em 31/07/2015 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Theophilo Moura Maciel

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marco Antonio dos Santos

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Carlos José de Araújo

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. João Baptista da Costa Agra Melo

Examinador Externo

UAEM/CCT/UF

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Fernando Clemente (in memoriam) e Nery Lopes pelo amor incondicional, dedicação na minha formação e incentivo aos estudos.

À minha esposa Danielle Costa e filhos Letícia Costa e Mateus Costa pelo apoio incessante em todos os momentos, principalmente nos de incerteza e adversidades.

Ao meu irmão e grande amigo Francineri Clemente, pelas profundas orientações e por sempre fomentar otimismo e paciência.

AGRADECIMENTOS

A princípio agradeço a DEUS por me dar a dádiva de concretizar esse sonho e também de colocar pessoas preciosas no meu caminho.

A MINHA FAMÍLIA, especialmente a minha esposa e filhos pela compreensão nos momentos de ausência. Aos meus pais e irmão que, mesmo estando a alguns quilômetros de distância, se mantiveram incansáveis em suas manifestações de apoio.

À Acumuladores Moura S.A., na pessoa do Diretor de Metais e Sustentabilidade Arnolfo Menezes Coelho, pela oportunidade, apoio e confiança no desenvolvimento deste trabalho. Ao Gerente Industrial Valber Henrique Vieira e o Chefe de Produção Felipe pela crença, compreensão e todo suporte para a realização deste trabalho. Ao Chefe de Engenharia Amistein Lopes, bem como a equipe da Engenharia de Instalações da UN 04 pela intensa colaboração para os ensaios de campo desta pesquisa e também pela resolução dos problemas burocráticos.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos por sua valiosa orientação, conselhos e por me orientar não só na área acadêmica, mas também na vida pessoal.

Ao Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel pelas orientações, paciência e por me dar a honra de compartilhar com seus profundos conhecimentos na área de soldagem e aplicações.

Ao Prof. Dr. João Baptista da Costa Agra de Melo pela presteza nas orientações técnicas, bem como no auxílio dos ensaios laboratoriais.

Ao aluno do curso de Engenharia Mecânica da UFCG Eurivaldo pela condução de forma responsável e criteriosa dos ensaios de caracterização e no auxílio do ensaio de campo.

À Professora Dra. Rucilana pela profunda contribuição na confecção dos reagentes para os ensaios metalográficos.

A todos os amigos, funcionários e demais professores do Departamento de Engenharia Mecânica - UFCG, que direta ou indiretamente colaboraram com a realização deste trabalho.

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS POR SOLDAGEM EM MARTELOS TRITURADORES DE BATERIAS AUTOMOTIVAS

RESUMO

O desgaste prematuro de conjuntos e componentes industriais, bem como de uma infinidade de outros segmentos, representa um grande fator para a redução da eficiência operacional de um equipamento, provocando assim, um aumento das perdas, e conseqüentemente, em altas despesas com manutenção e reposição de componentes mecânicos. Este trabalho aborda uma análise comparativa entre a resistência ao desgaste de martelos trituradores de baterias recuperados por três ligas a base de cobalto (Stellite 1, 6 e 21), bem como dois processos de deposição: os processos ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW) e ao Arco Plasma Transferido com adição de Pó (PTA-P). Os martelos trituradores são originalmente confeccionados em aço inoxidável AISI 316 L sem nenhum recobrimento. Além da avaliação da resistência ao desgaste no próprio meio de trabalho foram realizados ensaios de microdureza, análises microestruturais via microscopia ótica, e eletrônica de varredura e, análise de diluição com o objetivo de caracterizar e consolidar a pesquisa para que se tenha o estudo comparativo da melhor liga e melhor processo de deposição. Os resultados demonstraram que a melhor condição testada foi aquela que empregou a liga Stellite 6 depositadas pelo processo PTA-P. Essa condição apresentou a menor perda de massa nos ensaios de resistência ao desgaste, enquanto que a condição menos favorável foi verificada para os depósitos executados com a liga Stellite 1 utilizando o mesmo processo de deposição. A diluição média das ligas depositadas pelo processo SMAW foi 3,7 vezes maior do que a média apresentada utilizando o processo PTA-P. Os maiores valores de microdureza foram aqueles apresentados pelo revestimento executados com a liga Stellite 1 com maior teor de C, e esta liga, proporcionou um maior número de destacamento dos revestimentos. A microestrutura dos depósitos executados pelo processo PTA-P apresentou-se mais refinada quando comparada com aquelas depositadas pelo processo SMAW.

Palavras chave: Resistência ao desgaste; Revestimentos duros; Ligas à base de cobalto, Processo PTA-P e SMAW; Martelos trituradores de baterias automotivas.

ANALYSIS RESISTANCE TO WEAR HARD COATINGS APPLIED FOR WELDING IN HAMMERS CRUSHERS AUTOMOTIVE BATTERIES

ABSTRACT

The premature wear sets and industrial components, as well as many of other segments, is a big factor for reducing operational efficiency of equipment, thus causing an increase in losses, and consequently in high cost of maintenance and replacement of mechanical components. This work presents a comparative analysis of the wear resistance of AISI 316 L steel automotive batteries crushers hammers repaired by welding process using three cobalt-based alloys: Stellite 1, 6 and 21, as well as, two welding deposition process: Shielded Metal Arc Welding (SMAW) and Plasma Transferred Arc with addition powder (PTA-P). Crushers hammers are originally made of stainless steel AISI 316 L with no coating. Besides the “in situ” wear resistance evaluation microhardness tests, microstructure and dilution analysis by optical microscopy and scanning electron were done to characterize and consolidate research in order to have a comparative study of best league and better deposition process. The results showed that the best alloy was Stellite 6 using the PTA-P process, which had the lowest mass loss in wear resistance tests, while the less favorable condition was for deposits made with the alloy Stellite 1 using the same deposition welding process. The average dilution of the alloys deposited by the SMAW process was 3.7 times higher than the average using the PTA-P process. The highest microhardness values were presented by Stellite 1 alloy deposit, with higher C content, which also provided a greater number of coating detachment. The deposits made by the process PTA-P showed a more refined microstructure when compared to those deposited by the SMAW process.

Keywords: Wear Resistance; Hardfacing; Cobalt alloys, PTA-P and SMAW process; Hammers crushers automotive batteries.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1– Fotografia dos martelos trituradores de baterias acoplados no rotor do moinho.	21
Figura 2 – Fluxograma do processo da Estação de Quebra de Sucata (EQS) evidenciando os detalhes dos equipamentos.	21
Figura 3 – Fotos dos martelos utilizados na trituração de baterias.....	22
Figura 4 – Representação esquemática Processo de falha mecânica.....	24
Figura 5 – Causas de falha e sua perda relativa sobre a economia.....	26
Figura 6 – Representação esquemática dos fatores que influenciam no desgaste de estruturas.	27
Figura 7 – Variação da tensão máxima de cisalhamento num dado ponto, em três tipos de contato: (a) de deslizamento (a tensão de cisalhamento sobre o cursor é mostrado); (b) de rolamento; (c) impacto.....	30
Figura 8 – Categorias para o desgaste por impacto.	32
Figura 9 – Esquema básico do funcionamento do processo de soldagem com eletrodo revestido.	39
Figura 10 – Modos de transferência metálica.....	40
Figura 11 – Esquema básico de interligação do equipamento.....	41
Figura 12 – Equipamento básico para soldagem com eletrodo revestido, evidenciando equipamentos de segurança: máscara, óculos, avental etc. bem como os acessórios de limpeza: picadeira, escova de aço etc.....	41
Figura 13 – Desenvolvimento dos processos de soldagem.	42
Figura 14 – Arco piloto entre o bocal e o eletrodo.	43
Figura 15 – Arco principal entre a peça e o eletrodo.....	43
Figura 16 – Representação esquemática do processo de soldagem PTA.	44
Figura 17 – Influência da corrente do arco transferido na diluição no revestimento PTA com um único passe.	45
Figura 18 – Variação da taxa de alimentação em função da diluição e da espessura do revestimento.	46
Figura 19 – Linha isotérmica à frente de soldagem.	46
Figura 20 – Diluição em uma camada depositada por técnica de soldagem.	48
Figura 21 – Variação na penetração em função da espessura e da diluição do revestimento obtido por PTA.	49
Figura 22 – Regiões características de um revestimento obtido por técnica de soldagem.....	51

Figura 23 – Microestrutura das ligas: (a) Stellite 1, 2 camadas depositadas por GTA. (b) Stellite 6, 2 camadas depositadas por GTA. (c) Stellite 12, 2 camadas depositadas por GTA. (d) Stellite 21, 2 camadas depositadas por GTA. (e) Liga Haynes 6B, placa de 13 mm (0,5 in). (f) Liga Triballoy T-800, mostrando os precipitados de Laves (precipitados grandes e contínuos, cujos estão indicados por setas). (Todas 500x).....	52
Figura 24 – Fluxograma da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho.....	53
Figura 25 – Processos de soldagem e ligas à base de cobalto utilizados para o revestimento dos martelos.	55
Figura 26 – Martelos utilizados para os ensaios.....	56
Figura 27 – Codificação dos martelos a serem utilizados no ensaio de campo.....	57
Figura 28 – Distribuição dos martelos trituradores no rotor do moinho.	59
Figura 29 – Equipamento utilizado na soldagem com eletrodo revestido (SMAW).....	60
Figura 30 – Equipamento utilizado na soldagem manual com plasma de arco transferido (PTA-P).....	60
Figura 31 – Desenho técnico evidenciando os cortes para preparação das amostras.....	62
Figura 32 – Medição da largura do cordão de solda.....	63
Figura 33 – Fotografia das amostras do processo SMAW – Stellite 1, 6 e 21.....	64
Figura 34 – Imagens das amostras do processo SMAW – Stellite 1, 6 e 21 importadas para o programa Autodesk Inventor.	64
Figura 35 – Fotografia das amostras do processo PTA-P Stellite 1 e 6.	65
Figura 36 – Imagem das amostras do processo PTA-P – Stellite 1 e 6 importadas para o programa Autodesk Inventor.....	65
Figura 37 – Microscópio ótico Olympus BX 51M.....	66
Figura 38 – Microscópio Eletrônico de Varredura, marca e modelo.	66
Figura 39 – Imagem das amostras utilizadas para a análise de diluição.	67
Figura 40 – Microdurômetro Future – Tech MODELO FM – 700, utilizado na análise do perfil de microdureza.	68
Figura 41 – Representação esquemática da medição do perfil de microdureza.	68
Figura 42 – Preparação e disposição dos martelos trituradores antes da montagem no moinho.	69
Figura 43 – Aspecto superficial dos revestimentos depositados por SMAW.	70
Figura 44 – Aspecto superficial dos revestimentos depositados por PTA-P.....	71
Figura 45 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 1-SMAW.	75

Figura 46 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 6-SMAW.	76
Figura 47 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 21-SMAW.	77
Figura 48 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 1-PTA-P.....	78
Figura 49 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 6-PTA-P.....	79
Figura 50 – Perfil de microdureza obtido para cada depósito.	81
Figura 51 – Perfil de microdureza obtido para as amostras depositadas pelo processo SMAW.	82
Figura 52 – Perfil de microdureza obtido para as amostras depositadas pelo processo PTA-P.	82
Figura 53 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para a Liga Stellite 1.	84
Figura 54 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para a Liga Stellite 6.	84
Figura 55 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para a Liga Stellite 21.	85
Figura 56 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para o aço inoxidável AISI 316 L.....	85
Figura 57 – Trincas de contração aparente nas seguintes condições testadas: Stellite 1 – PTA- P; Stellite 1 – SMAW; Stellite 6 – SMAW e Stellite 21 – SMAW.....	87
Figura 58 – Micrografia observada através do MEV para as seguintes condições testadas: Stellite 1 – PTA-P; Stellite 6 – PTA-P; Stellite 1 – SMAW; Stellite 6 - SMAW e Stellite 21 – SMAW.....	89
Figura 59 – Micrografias das condições testadas evidenciando os tipos de liga e processo de soldagem.....	91
Figura 60 – Micrografias das condições testadas evidenciando as regiões presentes próximo a interface substrato-revestimento.....	92
Figura 61 – Gráfico comparativo entre a microdureza do revestimento e a perda de massa para cada condição de liga e processo de soldagem.....	95
Figura 62 – Imagens de algumas amostras com a presença de destacamento do revestimento.	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos materiais para revestimento duro.	34
Tabela 2 – Guia para seleção de ligas para revestimento duro.	35
Tabela 3 – Composição química nominal de algumas ligas a base de cobalto.	37
Tabela 4 – Corrosão de três ligas Stellite em ácido mineral a temperatura ambiente.	37
Tabela 5 – Valores mínimos e máximos de diluição para os processos de soldagem utilizados em operações de revestimento.	49
Tabela 6 – Valores mínimos e máximos da eficiência térmica do arco nos processos de soldagem utilizados em operações de revestimento.	50
Tabela 7 – Composição química e propriedades mecânicas do aço AISI 316L.	53
Tabela 8 – Composição química e propriedades mecânicas das ligas comerciais Stellite 1, 6 e 21.	54
Tabela 9 – Tipos e quantidades de corpos de prova utilizados na pesquisa.	56
Tabela 10 – Posicionamento dos martelos no rotor, evidenciando a configuração disco/tirante, de acordo com a Figura 28.	58
Tabela 11 – Parâmetros de soldagem para deposição com o processo SMAW.	61
Tabela 12 – Parâmetros de soldagem para deposição com o processo PTA-P.	61
Tabela 13 – Detalhes das etapas de lixamento e polimento dos corpos de prova.	63
Tabela 14 – Dimensões médias da geometria do cordão para as amostras SWAW e PTA-P.	72
Tabela 15 – Resultados obtidos de diluição (%) para todas as condições testadas.	73
Tabela 16 – Comparação entre os valores médios de diluição e a camada de difusão e ferro.	74
Tabela 17 – Valores médios de microdureza dos revestimentos.	81
Tabela 18 – Comparação entre os valores médios do reforço do cordão e camada endurecida para as amostras do processo SMAW.	83
Tabela 19 – Comparação entre os valores médios do reforço do cordão e camada endurecida para as amostras do processo PTA-P.	83
Tabela 20 – Resultados da perda de massa para cada condição de liga e processo de soldagem.	93
Tabela 21 – Resultados percentuais da redução da perda de massa para cada condição de liga e processo de soldagem.	93
Tabela 22 – Resultados do destacamento do revestimento para cada condição de liga e processo de soldagem.	95

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI – American Iron and Steel Institute
ASM – American Society of Materials
ASME – American Society of Mechanical Engineers
CC⁺ – Corrente Contínua polaridade reversa
CFC – Cúbica de Face Centrada
EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia
EQS – Estaao de Quebra de Sucata
GMAW – Gas Metal Arc Welding
GTAW – Gas-Shielded Tungsten Arc Welding
HRC – Hardness Rockwell
HV – Hardness Vickers
LABMET – Laboratório de Metalografia
Máx. – Máximo
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
Mín. – Mínimo
N – Número
PTA-P – Plasma Transferred Arc – Powder
S/A – Sociedade Annima
SMAW – Shielded Metal Arc Welding
TaC – Carboneto de Tântalo
TiC – Carboneto de Titânio
TIG – Tungsten Inert Gas
UFMG – Universidade Federal de Campina Grande
WC – Carboneto de Tungstênio
ZF – Zona Fundida
ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SIMBOLOS

Letras Latinas

- A – Ampere / Camada depositada
- B – Zona fundida
- C – Carbono
- Co – Cobalto
- cm – Centímetro
- cm³ – Centímetro cúbico
- Cr – Cromo
- d – Diluição
- dm² – Decímetro quadrado
- Fe – Ferro
- g – Grama
- H – Hidrogênio
- h – hora
- I – Corrente do arco transferido
- J – Joule
- kg – Quilogramas
- l – Litro
- M – Mega
- m – Mili / Metro
- min – Minuto
- mm – Milímetro
- Mn – Manganês
- Mo – Molibdênio
- Ni – Níquel
- P – Fósforo
- Pa – Pascal
- Q – Aporte Térmico ou Energia de Soldagem
- S – Enxofre
- s – Segundo
- Si – Silício
- V – Tensão no arco transferido
- W – Tungstênio

w – Velocidade de soldagem

Letras Gregas

μ – Coeficiente de atrito / Micron

η – Eficiência do arco

$\tau_{\text{máx}}$ – Tensão máxima de cisalhamento

Outros

CH_3COOH – Ácido Acético Glacial

GL – Fração em volume

HCl – Ácido Clorídrico

HNO_3 – Ácido Nítrico

H_2O – Água

% – Porcentagem

$^{\circ}\text{C}$ – Grau Celsius

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	18
2 – RELEVÂNCIA DO PROJETO	20
3 – OBJETIVOS	23
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
4.1 PROCESSO DE FALHA MECÂNICA	24
4.2 DEFINIÇÃO DE DESGASTE.....	25
4.3 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DO DESGASTE E FATORES ECONÔMICOS	25
4.5 DESGASTE POR IMPACTO.....	29
4.5.1 Definição	29
4.5.2 Fatores que aceleram o desgaste por impacto	31
4.5.3 Análise experimental do desgaste por impacto	32
4.6 TIPOS DE LIGAS PARA REVESTIMENTO CONTRA DESGASTE.....	33
4.6.1 Ligas à base de cobalto	35
4.7 SOLDAGEM DE REVESTIMENTO	37
4.8 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO	39
4.8.1 Soldagem com eletrodo revestido	39
4.8.1.1 Princípio de funcionamento.....	39
4.8.1.2 Equipamentos e acessórios	40
4.8.2 Soldagem à plasma com arco transferido	41
4.8.2.1 Introdução	41
4.8.2.2 Princípio de funcionamento.....	43
4.8.2.3 Parâmetros do processo	44
4.9 PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO	47
4.9.1 Diluição	47
4.9.2 Aporte térmico	49
4.9.3 Microestruturas do metal depositado e da zona termicamente afetada	50
5.0 – MATERIAIS E MÉTODOS	53
5.1 – MATERIAIS.....	53
5.2 – MÉTODOS.....	54

5.2.1 – Preparação dos corpos de prova	54
5.3 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	56
5.4 – PROCESSO DE DEPOSIÇÃO	59
5.5 – CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS	61
5.5.1 – Preparação das amostras	61
5.5.2 – Geometria do cordão	62
5.5.3 – Análise microestrutural.....	65
5.5.4 – Análise de diluição	66
5.5.5 – Perfil de microdureza.....	67
5.6 – ENSAIOS DE CAMPO.....	68
6.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
6.1 – ASPECTO GERAL E GEOMETRIA DO CORDÃO	70
6.2 – DILUIÇÃO.....	72
6.3 – PERFIL DE MICRODUREZA.....	79
6.4 – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	83
6.4.1 – Avaliação da composição química dos revestimentos	83
6.4.2 – Avaliação de defeitos de soldagem	86
6.4.3 – Avaliação microestrutural.....	87
6.5 – RESISTÊNCIA AO DESGASTE	93
7.0 – CONCLUSÕES.....	97
8.0 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
9.0 – REFERÊNCIAS	99

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente é notório o interesse cada vez mais crescente na otimização financeira dos processos industriais. Para tanto, a cada dia é dada uma maior relevância a todos os fatores que influenciam nos custos, na qualidade final do produto, no meio ambiente e segurança. Por outro lado, há uma gama de segmentos industriais que utilizam a técnica de soldagem não só para a união de peças, como também para revestir a superfície de equipamentos que estão submetidos à deterioração. Neste cenário destacam-se as indústrias de mineração, sucroalcooleira e de produção de aços.

O desgaste prematuro de conjuntos e equipamentos industriais, bem como de uma infinidade de outros sistemas mecânicos, representa um grande fator para a redução da eficiência operacional de um equipamento, provocando assim, um aumento das perdas, e conseqüentemente, das despesas com manutenção e reposição de componentes mecânicos. Os custos de produção atingem patamares estratosféricos devido à reposição de peças ou conjuntos deteriorados, ocasionando a interrupção drástica da produção e a ineficiência do processo. Para se ter uma ideia do prejuízo que o desgaste abrasivo ocasiona, segundo a Agroindústria Açucareira do Estado de São Paulo, os custos anuais do setor de açúcar e álcool com reposição e manutenção de equipamentos desgastados giram em torno de 5% da receita bruta (CORRÊA, 2005).

O fenômeno de desgaste é fundamentalmente superficial, sendo perceptível a remoção de material da superfície de peças e conjuntos mecânicos. Existe uma vasta literatura que sinaliza e comprova excelentes resultados com a utilização de solda de revestimento para recuperar componentes mecânicos. Esta técnica é usada tanto para prevenir como para mitigar ou recuperar os mais variados tipos de desgaste de metais. Este método basicamente é fundamentado na deposição de um material especial resistente ao desgaste na superfície sujeita à deterioração. O revestimento duro é uma das técnicas mais usuais, eficaz e menos onerosa para a deposição de solda em superfícies que precisam ser recuperadas ou protegidas.

Em diversos casos, peças e dispositivos mecânicos podem ser fabricados com materiais rotineiros, seguindo obviamente as devidas orientações de projeto. Em seguida, tais equipamentos podem ter sua superfície revestida com camadas ou cordões de solda, com consumíveis e procedimentos de soldagem adequados para cada situação que necessita de uma camada resistente ao desgaste.

Um método bastante usual é a aplicação de um material duro e resistente ao desgaste e ou corrosão na superfície de um material menos nobre (substrato), através de um processo de soldagem ou aspensão térmica, o chamado *hardfacing* (DAVIS, 1993).

A deposição por soldagem a arco elétrico tem flexibilidade no que tange aos materiais a serem depositados, à posição e ao local de operação, à geometria e às dimensões dos componentes, a espessura e às propriedades do material depositado e aos tipos e o grau de sofisticação dos equipamentos que podem ser empregados na operação de revestimento (DAVIES, 1980).

Dentre os processos baseados no plasma destaca-se o método de soldagem à Plasma por Arco Transferido utilizando pó como metal de adição, que vem do termo em inglês *Plasma Transferred Arc Powder* (PTA-P). Atualmente, esse processo é utilizado na fabricação tanto de peças sujeitas a intenso atrito (válvulas para motores e assentos de válvulas) quanto de peças sujeitas ao choque de partículas (palhetas de turbinas) (FOLTRAN, 2000). A técnica de deposição a plasma por arco transferido pode ser considerada como uma evolução do processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG), pois também utiliza como fonte primária de energia o arco elétrico entre um eletrodo não-consumível de tungstênio encapsulado e a peça (TIGRINHO, 2005).

Entre os revestimentos tradicionalmente utilizados para *Hardfacing*, estão as ligas à base de Cobalto, que apresentam desempenho superior aos aços, principalmente nos serviços a altas temperaturas (YAEDU, 2003).

No geral, este trabalho trata de uma análise comparativa entre a resistência ao desgaste de martelos trituradores de baterias feitos de aço AISI 316 L, recuperados por três ligas a base de cobalto, conhecidas por Stellite 1, 6 e 21, bem como dois processos de deposição o processo ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido ou *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) e o processo PTA-P.

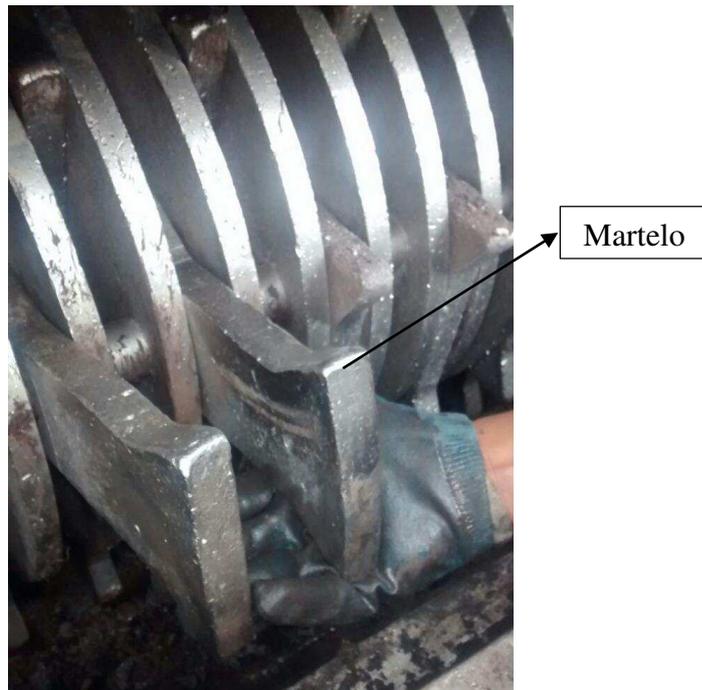
2 – RELEVÂNCIA DO PROJETO

A Acumuladores Moura S/A Unidade 04, percebeu, ao longo dos anos, que ocasionam perdas em seus processos produtivos de trituração de sucata de bateria devido ao desgaste dos martelos trituradores da máquina de reciclagem de baterias. Ou seja, os martelos que realizam a etapa de trituração total das baterias que retornam a planta sofrem desgaste por impacto (martelamento/amassamento), e ainda estão submetidos ao ataque corrosivo em virtude da liberação do ácido sulfúrico presente nas baterias de chumbo-ácido. A Figura 1 ilustra os martelos acoplados no moinho da máquina de reciclagem de baterias.

O equipamento é na realidade um sistema composto, que inclui transportador de correias, moinho, transportadores helicoidais, bombas centrífugas, tanques de óxido, além de outros acessórios necessários ao bom funcionamento da unidade de reciclagem. A máquina de triturar baterias é o início da cadeia produtiva da metalúrgica, e seu objetivo é enviar óxido e metal para os fornos e polipropileno para o processo de reciclagem de polipropileno.

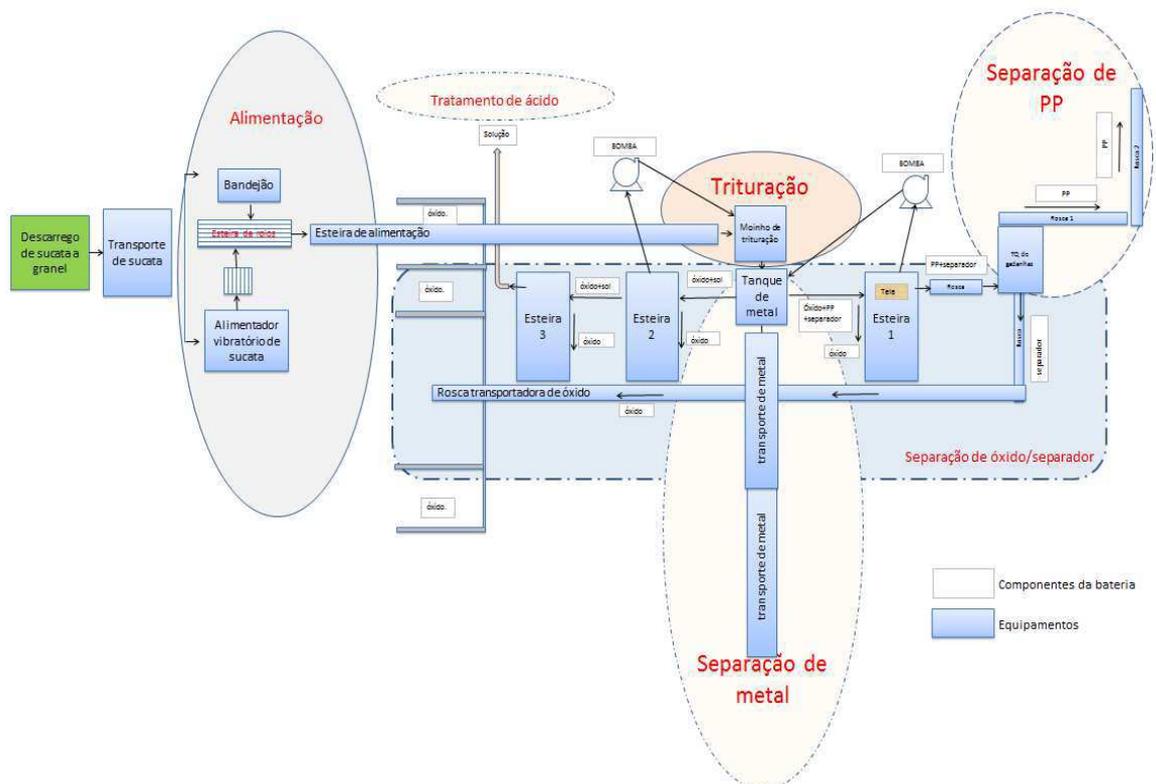
O fluxo de processo da Estação de Quebra de Sucatas (EQS) encontra-se ilustrado no diagrama esquemático representado na Figura 2. Após a alimentação na esteira, as sucatas de bateria são quebradas no moinho de martelos que tritura o material através de impacto e atrito. O moinho possui grelhas com aberturas para a passagem de material para um transportador helicoidal. Após a moagem das baterias por via úmida, visto que há refrigeração do moinho através de uma bomba centrífuga que utiliza solução de ácido sulfúrico do tanque 02, o material processado (óxido de chumbo, chumbo metálico e polipropileno mais solução ácida) são encaminhados para o tanque de metal ou tanque de separação hidrodinâmica.

Figura 1– Fotografia dos martelos trituradores de baterias acoplados no rotor do moinho.



(Fonte: Autoria própria).

Figura 2 – Fluxograma do processo da Estação de Quebra de Sucata (EQS) evidenciando os detalhes dos equipamentos.



(Fonte: Autoria própria).

Os martelos para trituração de sucata de bateria utilizados no moinho das EQS são equipamentos responsáveis pela quebra e trituração das baterias que retornam à planta recuperadora. Sendo assim, de acordo com a natureza, características e heterogeneidade do material a ser triturado (baterias), bem como os mecanismos de desgaste aos quais os martelos estão expostos (impacto e corrosão), ocasionam por si só o desgaste prematuro destes componentes. Para que se tenha uma ideia da magnitude do problema, os martelos usados nesta operação de trituração duram em média de quinze a vinte dias por face cortante, e de sessenta a oitenta dias usando as quatro possíveis faces. O desgaste por impacto resulta em altos custos de manutenção, paradas de produção e ineficiência geral da planta. Atualmente os martelos são fabricados em aço inoxidável AISI 316 L. Este material tem uma alta resistência à corrosão e alta tenacidade, no entanto, não possui dureza significativamente alta para resistir ao desgaste por martelamento/amassamento. A Figura 3 revela os martelos que são utilizados para a trituração de baterias. Percebe-se o desgaste severo sofrido pelos martelos durante a trituração de baterias. Logo, a recuperação destes implementos, através da técnica de revestimento duro, é de fundamental relevância, pois com esta aplicação tem-se um aumento da resistência ao desgaste superficial, e conseqüentemente, ter-se-á uma redução considerável nos custos de manutenção, bem como maior confiabilidade deste conjunto mecânico.

Figura 3 – Fotos dos martelos utilizados na trituração de baterias.

(a) Martelo novo



(b) Martelo desgastado



(Fonte: Autoria própria).

3 – OBJETIVOS

GERAL:

- Avaliar a influência da composição química do metal depositado e do processo de soldagem utilizado sobre a resistência ao desgaste de revestimentos duros aplicados em martelos trituradores de baterias.

ESPECÍFICOS:

- Determinar o melhor processo e consumíveis de soldagem para a obtenção dos melhores valores de resistência ao desgaste de revestimentos duros aplicados por soldagem;
- Relacionar os valores de dureza com os valores de resistência ao desgaste dos revestimentos aplicados com os diferentes processos e consumíveis utilizados;
- Avaliar a microestrutura, a diluição e a variação da composição química junto a interface substrato e revestimento em função da variação dos consumíveis e procedimentos utilizados.

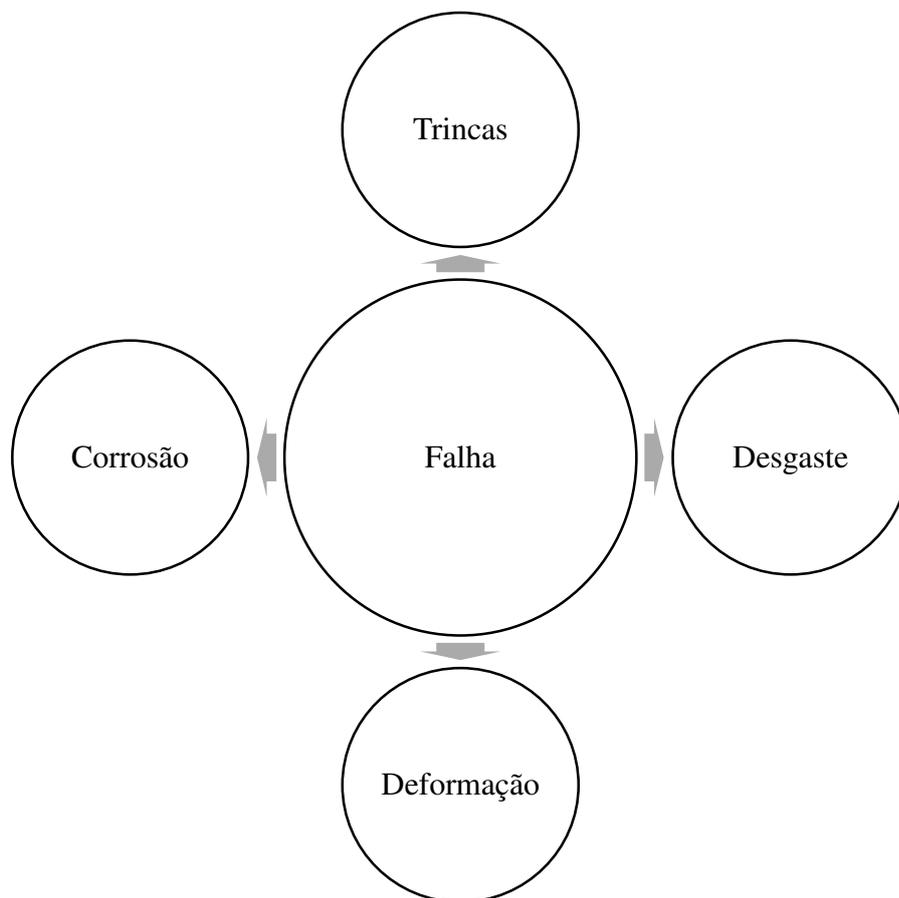
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Processo de falha mecânica

Uma falha pode ser caracterizada como a interrupção da função especificada de um item ou a incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho definido (KARDEC; NASCIF, 2013).

A Figura 4 indica que a falha de um componente ou estrutura resulta de um processo de deformação plástica, formação e propagação de trincas, corrosão e desgaste. O desgaste atinge primeiramente a superfície do componente (GAHR, 1987).

Figura 4 – Representação esquemática Processo de falha mecânica.



(Fonte: GAHR, 1987).

São causas da fricção e desgaste a vibração, ruído, aquecimento, mudanças geométricas e fragmentos, que podem resultar na perda da função pretendida, e levar ou não à falha catastrófica. (GAHR, 1987)

Sendo assim o estudo dos fatores que contribuem para o desgaste se faz necessário para prever a ocorrência dos seus mecanismos de desgaste (RIBAS *et al*, 2002). Os principais fatores de desgaste são relacionados a:

-Variáveis metalúrgicas:

Dureza, tenacidade, composição química, constituição e microestrutura.

-Variáveis de processo:

Materiais em contato, pressão, velocidade, temperatura e acabamento superficial.

-Outros fatores:

Lubrificação, corrosão.

4.2 Definição de desgaste

Desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo em decorrência do movimento relativo (GAHR, 1987).

O fenômeno do desgaste é, de maneira geral, o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras que estão entre ou embutidas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo (DIAS; GOMES, 2003). Nos metais, esse processo pode ocorrer pelo contato com outros metais, sólidos não metálicos, líquidos em movimento, ou ainda partículas sólidas ou partículas de líquido transportadas em um fluxo gasoso (RAMALHO, 1997).

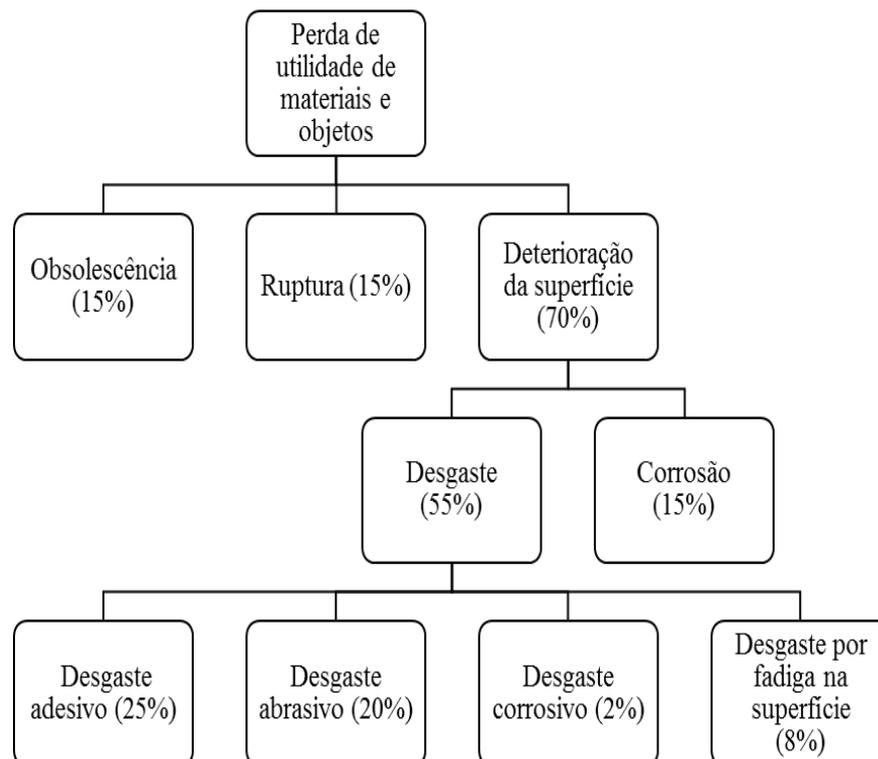
4.3 Importância do estudo do desgaste e fatores econômicos

Estudos realizados pela American Society of Mechanical Engineers (ASME) nos Estados Unidos apontam uma perda econômica de 1% a 2,5% do produto interno bruto devido ao desgaste. Na Alemanha uma pesquisa da década de 80 revela que desgaste e corrosão juntas contribuem com a perda de 4,5% do produto interno bruto (GAHR, 1987).

Para compreender o impacto na economia ocorrido devido a perdas por desgaste, a Figura 5 apresenta a importância relativa do desgaste na economia. Deve-se considerar que a resistência à fricção e ao desgaste não são apenas propriedades dos materiais, mas características intrínsecas dos sistemas de engenharia (tribosistema). A resistência à fricção é uma função das interações dos sólidos e da área de contato. Fricção e desgaste são respectivamente causas sérias de dissipação de energia e de material. O desgaste é causado por

desintegração da interação entre componentes da máquina como resultado de uma tensão no material nas vizinhanças da superfície. Num componente mecânico o desgaste é raramente catastrófico, mas leva a perda de eficiência, causa vibração e desalinhamento. Em casos extremos algumas trincas podem levar a fratura e os fragmentos formados normalmente podem danificar o equipamento (PASCOALI; ALARCON, 2004).

Figura 5 – Causas de falha e sua perda relativa sobre a economia.



(Fonte: Adaptado de RABINOWICZ, 1985).

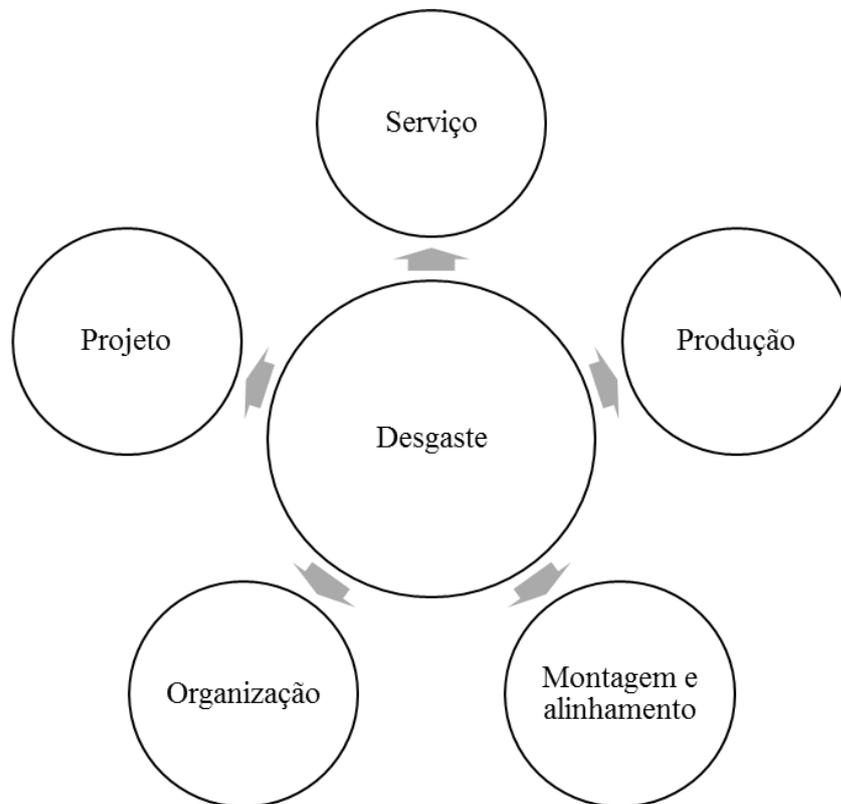
As perdas econômicas devidas ao desgaste podem ser reduzidas por otimização da planta de trabalho, de um projeto adequado, da produção, montagem e uso adequado dos equipamentos. O controle do custo do desgaste pode começar com o processo de fabricação correto para o produto, que inclui a escolha do equipamento e lugar de instalação, questões de padronização e estoque (PASCOALI; ALARCON, 2004). A Figura 6 ilustra esse processo.

O projeto pode efetivamente reduzir o desgaste do componente ao otimizar a transferência de carga e movimento, permitindo apenas baixa tensão de trabalho, usando material e lubrificante adequados em função da carga, temperatura e ambiente. (PASCOALI; ALARCON, 2004).

As condições de trabalho de um componente dependem do tipo e da qualidade da produção. O grau de precisão da forma, tamanho e perfil de superfície e rugosidade exercem influência sobre a resistência à fricção e ao desgaste. No entanto, a vida em serviço depende também da precisão da montagem, alinhamento exato, limpeza e cuidados com a superfície do componente (PASCOALI; ALARCON, 2004).

Durante o serviço, os custos devido à fricção e desgaste podem ser reduzidos através do controle das condições de trabalho e vibração, limpeza do ambiente, manutenção e reparos (GAHR, 1987).

Figura 6 – Representação esquemática dos fatores que influenciam no desgaste de estruturas.



(Fonte: GAHR, 1987).

4.4 Classificação dos processos de desgaste

O desgaste ocorre em diferentes equipamentos e componentes (GAHR, 1987), tais como:

- Equipamentos em movimento;
- Arados;
- Bombas de lamas;
- Rolamentos;
- Anéis de pistão;
- Engrenagens;
- Freios;
- Na vida diária: facas, sapatos, roupas, moveis, escadas;
- No corpo humano: costas, joelhos e cotovelos.

Muitas são as condições que causam desgaste. A solução para um determinado problema depende da identificação exata da natureza deste e a análise de sistemas pode ser utilizada para identificar os parâmetros do sistema tribológico. Dependendo dos parâmetros do sistema, diferentes mecanismos de desgaste podem ocorrer. Os mecanismos de desgaste descrevem as interações energéticas e de materiais entre os elementos do sistema tribológico. O tipo de movimento relativo também pode ser utilizado para classificar os mecanismos de desgaste (PASCOALI; ALARCON, 2004).

Para maior facilidade de análise e prevenção, procura-se geralmente identificar o(s) mecanismo(s) predominante(s) de remoção de material. Para tanto, os tipos gerais de desgaste podem ser classificados como (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2012):

- a) Desgaste por Abrasão – ocasionado por partículas abrasivas (duras) sob tensão, deslocando-se sobre a superfície;
- b) Desgaste por Erosão – devido ao choque contra a superfície, de partículas sólidas ou gotas líquidas presentes em correntes de fluidos;
- c) Desgaste por Cavitação – associado à formação e implosão de bolhas gasosas em correntes de fluidos, na interface líquido - metal, devido à variação súbita de pressão ao longo do percurso;

- d) Desgaste por Adesão ou Fricção – resultante do contato metal - metal, quando superfícies ásperas deslizam entre si;
- e) Desgaste Corrosivo – que envolve a ocorrência de reações químicas superficiais no material, além das ações mecânicas de desgaste;
- f) Desgaste por impacto – ocasionado por choques ou cargas aplicadas pela componente vertical de uma carga sobre uma superfície.

4.5 Desgaste por impacto

4.5.1 Definição

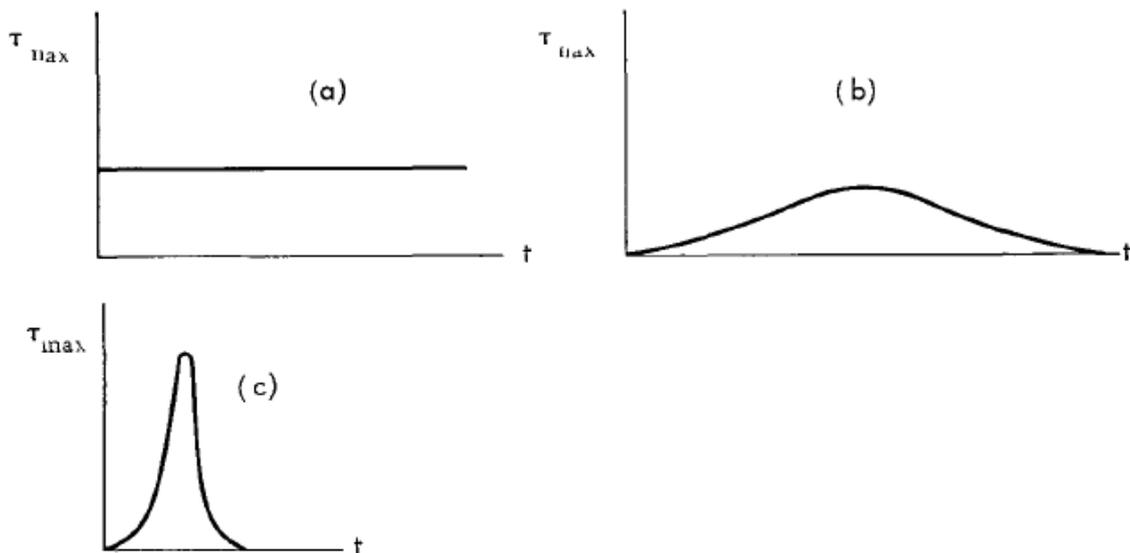
O desgaste por impacto é provocado devido a resultante vertical de choques ou cargas aplicadas sobre superfícies metálicas. Estas cargas podem ser oriundas de martelamento, pancadas, apiloamentos ou outros quaisquer meios de concentração de esforços (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2012).

De acordo com Conde (1986), o choque provocado entre dois corpos proporciona uma deformação na área de contato, cuja magnitude estará vinculada a energia consumida no impacto. No desgaste por impacto, atuam dois mecanismos que dependem da dureza e tenacidade dos materiais. No primeiro mecanismo atua a deformação superficial e subsuperficial em ambas as superfícies de contato. No segundo se dá a fratura do material por efeito da fadiga resultante de repetitivos impactos.

Segundo Peter (1986) o desgaste por impacto surge entre em um par de corpos sólidos colidindo repetidamente. Se as áreas de contato adjacentes de ambos os corpos são sempre as mesmas, seria de esperar uma tendência de desgaste para ambos os lados. Este pode ser o caso, por exemplo, entre o contato dentes de uma engrenagem de transmissão. Alternativamente, pode ser verificado sobre um dos corpos apenas; têm-se como exemplo o rolamento de um pneu de automóvel na superfície de uma estrada. Um pouco conectado com a classificação acima sobre repetitividade de carregamentos, comentou-se de processos de um corpo, bem como o desgaste de dois corpos. Em um processo de desgaste de um corpo, apenas os danos de uma superfície são de interesse - ou porque a segunda parte é continuamente renovada ou porque a resistência ao desgaste do segundo corpo assegura alterações significativas que são restritas ao primeiro corpo, pelo menos, para um longo período de sua resistência ao desgaste mútuo. O estudo do desgaste de dois corpos é justificado quando as superfícies de ambos os corpos se

alteraram significativamente ao mesmo tempo. O contato mecânico entre sólidos pode resultar de três modos básicos de movimento relativo: de deslizamento, rolamento e impacto. Em cada caso, grandes tensões de contato podem surgir, mas a sua característica, distribuição e variação com o tempo são únicas. A Figura 7 ilustra o comportamento da Tensão máxima de cisalhamento ($\tau_{\text{máx}}$) nestes três tipos de relação com o tempo num dado ponto. Em um controle deslizante, a tensão de cisalhamento máxima (na superfície ou em profundidade, dependendo do coeficiente de atrito, μ) é constante ao longo do tempo. Em rolamento puro, a tensão máxima de cisalhamento surge da relação de Hertz, e vai subir e descer conforme a relação se aproxima e se afasta no que diz respeito ao ponto observado. Em um impacto puramente elástico, o contato é muitas vezes hertziano, e uma das principais diferenças em relação ao rolamento pode ser a menor duração de aplicação da tensão. A velocidade de aplicação sendo normal em vez de tangencial, altera a escala do estado de tensões para o impacto, enquanto que no rolamento, ele muda com o movimento.

Figura 7 – Variação da tensão máxima de cisalhamento num dado ponto, em três tipos de contato: (a) de deslizamento (a tensão de cisalhamento sobre o cursor é mostrado); (b) de rolamento; (c) impacto.



(Fonte: PETER, 1986).

4.5.2 Fatores que aceleram o desgaste por impacto

De acordo com Baptista e Nascimento (2012) os fatores ou variáveis que mais tem influência no desgaste por impacto são:

- a) Frequência do impacto;
- b) Velocidade do impacto;
- c) Dureza do metal (dos metais).

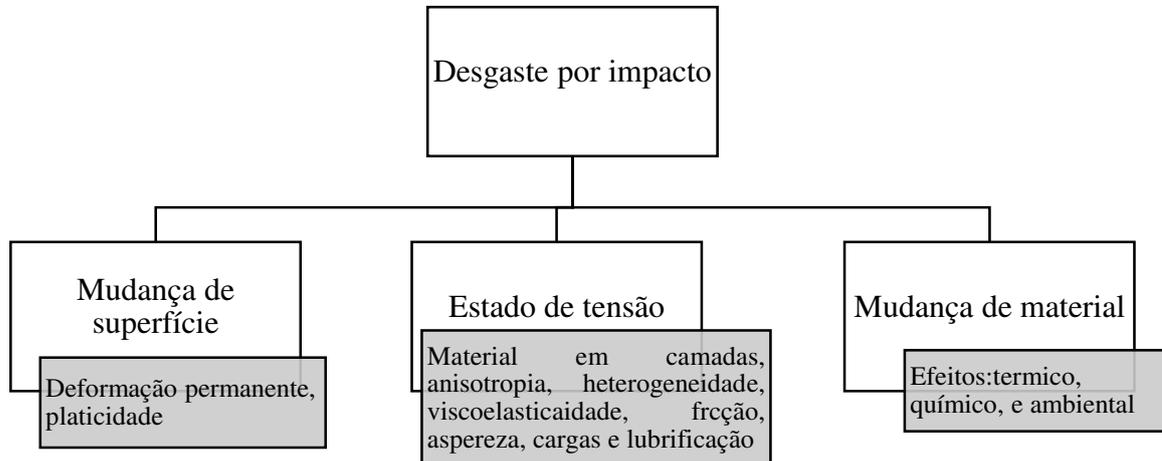
Quanto maior a frequência e a velocidade do impacto, maior será o desgaste, principalmente quando a partícula tiver maior dureza e for angular.

Com relação a dureza do metal (dos metais), podemos afirmar que há duas formas de resistência ao desgaste:

1. Empregando materiais que possuam ductilidade suficiente para absorver o impacto em lugar de opor-se. Materiais com estas características, ao receberem uma pancada ou uma carga concentrada, deformam-se por expansão, aumentando a área de contato. Desta forma, a carga unitária é diminuída, fazendo com que a resistência à ruptura, sob compressão, não seja ultrapassada. Este processo é o mais eficaz e hoje largamente usado.
2. Empregando materiais mais duros e resistentes do que os que produzem choques. Desta forma, o desgaste se transfere para o outro material, permanecendo inalterado o material mais endurecido. Um exemplo típico do que foi mencionado, é o aço manganês austenítico, que é dúctil e absorve impacto, ou seja, com o efeito do trabalho a frio este material inicia o processo de encruamento, aumentando sua dureza e permanecendo tenaz.

De acordo com Peter (1986) o desgaste por impacto pode ser dividido em três categorias, conforme Figura 8:

Figura 8 – Categorias para o desgaste por impacto.



(Fonte: Adaptado de PETER, 1986).

É evidente que de acordo com o diagrama acima, alguns dos fatores que influenciam o desgaste por impacto podem estar em mais de uma categoria: por exemplo, a lubrificação tem efeito sobre a tensão assim como no efeito químico.

4.5.3 Análise experimental do desgaste por impacto

A avaliação do nível de desgaste de uma superfície pode ser realizada tanto através da alteração da geometria da superfície sob desgaste (profundidade, curvatura, de volume, etc.) como pela redução de peso da peça após um determinado tempo em operação. Para a medição da mudança de peso, uma microbalança de precisão da ordem de 10^{-6} g é necessária. Dados da geometria do desgaste são geralmente mais significativos quando a forma ou a rugosidade da superfície de desgaste pode revelar o mecanismo de desgaste, a taxa de desgaste ou a expectativa de vida. (SCOTT; SCOTT, 1957).

Estudos para o desgaste de partículas estão mais frequentemente focados na composição química. Análise de difração por raio x e espectroscopia de infravermelho, podem ser utilizados para esta finalidade. Microscopia eletrônica de transmissão é útil para localizar a distribuição, tamanho e forma das partículas, como carbonetos e nitretos, assim como, a morfologia de eutéticos que influenciam diretamente na resistência ao desgaste (PAVELESCU; ILIUC, 1965).

4.6 Tipos de ligas para revestimento contra desgaste

De acordo com Baptista e Nascimento (2012) os materiais para revestimento duro podem ser categorizados em cinco grandes grupos, em função do teor total de elementos de liga (além do ferro). A escolha de uma liga específica dependerá da aplicação e do tipo de soldagem utilizado. A Tabela 1 ilustra a classificação dos materiais para recobrimento duro. As ligas do grupo 1 apresentam maior tenacidade dentre os demais recobrimentos duro, por exemplo: os aços-manganês austeníticos. Tais materiais possuem também melhor resistência ao desgaste que os aços de baixo e médio carbono, que são as ligas geralmente revestidas pelo grupo 1. São ligas consideradas menos onerosas que as outras ligas de revestimento duro e muito empregadas nos casos onde a usinabilidade é uma propriedade relevante, bem como quando se deseja apenas um aumento moderado da resistência ao desgaste. No caso das ligas dos subgrupos 2A e 2B, são ligas que apresentam maior resistência ao desgaste, mais tenazes e de maior custo quando comparadas aos materiais do grupo 1. Já os subgrupos 2C e 2D são muito tenazes, todavia, apresentam limitações em relação a resistência ao desgaste. Neste caso, estas ligas podem elevar a resistência ao desgaste mediante encruamento. As ligas do subgrupo 2D possuem um teor total de elementos de liga entre 30% e 37%, variando o carbono entre 0,10% e 1%. As ligas de recobrimento do grupo 3 são materiais com alto cromo; apresentam cerca de 25% a 50% de elementos de liga e várias dessas ligas apresentam níquel e molibdênio. Os teores de carbono variam entre 1,75% a 5%. Tal grupo se caracteriza pela presença maciça de carbonetos hipereutéticos, que conferem às ligas uma alta resistência ao desgaste e uma razoável resistência à corrosão e ao calor. São ligas mais caras que as dos grupos 1 e 2. O grupo 4 é caracterizado pelas ligas à base de cobalto e à base de níquel com teor total de elementos não ferrosas entre 50% e 99%. Os materiais do grupo 4 são bastante versáteis, pois resistem ao calor, à abrasão, à corrosão, ao impacto, à descamação, à oxidação, ao choque térmico, à erosão e ao desgaste metal/metal. Os materiais do grupo 5 são constituídos por carbonetos duros distribuídos em uma matriz metálica. São largamente utilizados para aplicações de abrasão intensa e de corte. As ligas pertencentes ao grupo 5 possuem a extrema resistência à abrasão em peças que são submetidas a impactos pequenos ou moderados.

Tabela 1 – Classificação dos materiais para revestimento duro.

Teor total de elementos de liga %	Elementos de liga principais
Materiais ferrosos de baixa liga	
1A 2 a 6	Cr, Mo, Mn
1B 6 a 12	Cr, Mo, Mn
Materiais ferrosos de alta liga	
2A 12 a 15	Cr, Mo
2B 12 a 25	Mo, Cr
2C 12 a 25	Mn, Ni
2D 30 a 37	Mn, Cr, Ni
3A 25 a 50	Cr, Ni, Mo
3B 25 a 50	Cr, Mo
3C 25 a 50	Co, Cr
Ligas à base de níquel e à base de cobalto	
4A 50 a 100	Co, Cr, W
4B 50 a 100	Ni, Cr, Mo
4C 50 a 100	Cr, Ni, Mo
Carbonetos	
5 75 a 96	WC ou WC em combinação com outros carbonetos, como TiC e TaC, sempre em uma matriz metálica

(Fonte: BAPTISTA; NASCIMENTO, 2012).

Segundo Baptista e Nascimento (2012) os tipos de revestimentos mais aplicados por soldagem podem ser classificados em:

- Para endurecimento superficial;
- Resistentes a corrosão;
- Resistentes ao desgaste e ou impacto;
- Para recuperação e reparos de manutenção.

A Tabela 2 ilustra um guia para seleção de ligas para revestimento duro.

Tabela 2 – Guia para seleção de ligas para revestimento duro.

Condições de serviço	Materiais para revestimento duro
Escorregamento metal-metal; altas tensões de contato	Stellite 1, ligas Tribaloy
Escorregamento metal-metal; baixas tensões de contato	Aços de baixa liga para revestimento duro
Escorregamento metal-metal combinado com corrosão e oxidação	Ligas à base de cobalto ou à base de níquel, dependendo da agressividade do ambiente
Abrasão sob baixa tensão; erosão por colisão de partículas com pequeno ângulo	Ferros fundidos de alta liga
Abrasão severa sob baixa tensão, retenção do gume	Materiais com altos teores de carbonetos
Erosão por cavitação e por colisão	Ligas à base de cobalto
Choques mecânicos intensos	Aços-manganês de alta liga
Choques mecânicos intensos combinados com corrosão ou oxidação	Stellite 21. Stellite 6
Abrasão por sulcamento Descamação	Aços – manganês austeníticos Stellite 21, Stellite 6, Tribaloy T-400, Tribaloy T-800
Estabilidade térmica e/ou resistência à fluência à altas temperaturas	Ligas à base de cobalto, ligas de níquel com carbonetos

(Fonte: BAPTISTA; NASCIMENTO, 2012).

4.6.1 Ligas à base de cobalto

Historicamente, muitas das ligas a base de Cobalto comerciais são derivadas dos ternários Cobalto - Cromo - Tungstênio e Cobalto - Cromo – Molibdênio. Estas ligas foram primeiramente pesquisadas por Elwood Haynes, que registrou em 1907 a patente U. S. 873.745 Haynes descobriu a alta resistência e a natureza inoxidável da liga binária Cobalto – Cromo e mais tarde identificou o Tungstênio e o Molibdênio como poderosos agentes de aumento de resistência com o sistema Cobalto - Cromo. Quando da descoberta destas ligas Haynes nomeou-as ligas Stellite, do Latim Stella (estrela), devido a seu brilho “semelhante ao de uma estrela” (TAKEYAMA, 2005).

As ligas a base de cobalto, são oriundas de um arranjo complexo de elementos intencionalmente adicionados. Geralmente estes materiais são endurecidos por uma combinação de carbonetos e por solução sólida (YAEDU, 2003).

O primeiro emprego desses materiais foi na confecção de ferramentas de corte, devido à elevada resistência que eles apresentavam em altas temperaturas. Os Stellites começaram a ser comercializado em 1917, tendo encontrado grande emprego na I Grande Guerra na fabricação de munição, e na II Grande Guerra como liga resistente ao desgaste a altas temperaturas (YAEDU, 2003).

Segundo Foltran (2000) em 1922 as ligas Stellite iniciaram as suas aplicações em revestimentos para proteção de superfícies contra o desgaste, sendo estas depositadas por soldagem.

Dentre estas ligas a base de cobalto, a liga Stellite 6 é a mais largamente utilizada. Exibe uma excelente resistência a várias formas de degradação, tanto químicas como mecânicas, e em uma grande amplitude de temperaturas, além de manter um nível razoável de dureza acima dos 800 °C. Atributos particulares são a excepcional resistência à abrasão, sua dureza à altas temperaturas, e a alta resistência a erosão por impacto e cavitação (TAKEYAMA, 2005). A liga Stellite 21 é mais resistente à corrosão que a Stellite 1, 6 e 12, devido à alta quantidade de molibdênio e pelo fato de grande parte do cromo estar em solução (FOLTRAN, 2000; YAEDU, 2003).

Quanto à aplicação, as ligas a base de cobalto podem ser separadas em três grupos: liga resistente ao desgaste, material estrutural para altas temperaturas, e material resistente à corrosão. Das três aplicações, foi como material resistente ao desgaste que as ligas de cobalto ganharam maior destaque (YAEDU, 2003). A Tabela 3 a seguir indica a composição química de algumas ligas Stellite.

Tabela 3 – Composição química nominal de algumas ligas a base de cobalto.

Nome comercial	Composição nominal (percentagem em peso)									
	Elemento de liga	Co	Cr	W	Mo	C	Fe	Ni	Si	Mn
Stellite 1	Saldo	31,0	12,5	1,0	2,5	3,0	3,0	2,0	1,0	
Stellite 1 (nova)	Saldo	31,0	13,0	-	2,45	Máx 2,5	Máx 3,0	1,0	1,0	
Stellite 6	Saldo	28,0	4,5	1,0	1,2	3,0	3,0	2,0	1,0	
Stellite 12	Saldo	30,0	8,3	1,0	1,4	3,0	3,0	2,0	1,0	
Stellite 21	Saldo	28,0	-	5,5	0,25	2,0	2,5	2,0	1,0	
Stellite 238	Saldo	26,0	-	3,0	0,1	20,0	-	1,0	1,0	
Stellite 190	Saldo	26,0	14,0	-	3,3	Máx 2,5	1,0	1,0	0,5	
Ultimet	Saldo	26,0	2,0	5,0	0,06	3,0	9,0	0,3	0,8	
Tribaloy T-800	Saldo	18,0	-	28,0	Máx 0,08	Máx 1,5	Máx 1,5	3,4	-	
Haynes 25	Saldo	20,0	15,0	-	0,1	Máx 3,0	10,0	Máx 0,4	1,5	

(Fonte: YAEDU, 2003).

As ligas resistentes ao desgaste possuem boa resistência à corrosão, apresentando ótimo comportamento em ambiente atmosférico, conforme mostra a Tabela 4. Os resultados mostram uma comparação da taxa de corrosão por perda de massa em 3 meios, ácido nítrico, ácido sulfúrico e ácido hidrocloreídrico. Em ácido sulfúrico os Stellites 6 e 12 apresentaram corrosão por pite e resultados variáveis (YAEDU, 2003).

Tabela 4 – Corrosão de três ligas Stellite em ácido mineral a temperatura ambiente.

Perda de peso em mg por dm ² por dia											
Material	Ácido nítrico			Ácido sulfúrico				Ácido hidrocloreídrico			
	5%	20%	50%	10%	30%	55%	74%	2%	10%	20%	37%
Stellite 6	0,6	1,3	3,5	1,9	variável	variável	variável	406	965	>1000	>1000
Stellite 12	0,3	2,4	5,5	0,7	variável	variável	variável	152	853	546	530
Stellite 1	0	2,7	2,7	0	1,1	0	0,8	2,2	488	283	151
Aço inox 18-8-3 Mo	3,3	1,9	2,2	1,2	58	>1000	246	184	325	319	-

(Fonte: YAEDU, 2003).

4.7 Soldagem de revestimento

A soldagem de revestimento ou de recobrimento consiste na deposição de um consumível de soldagem com características diferentes daquelas do metal de base, visando aplicações específicas como maiores durezas, resistência ao desgaste e ou à corrosão, com relação às quais o metal de base não teria uma performance tão boa quanto o material do

recobrimento. Entretanto, a escolha inadequada do tipo de consumível e a falta de controle dos parâmetros e procedimento de aplicação podem proporcionar falhas como, por exemplo, a ocorrência de trincas devido a elevados níveis de dureza do revestimento (TREVISAN; BRANTIS, 1993).

No mercado estão disponíveis diversos métodos de aplicação de revestimento duro, alguns deles consistem na aplicação de uma camada de metal duro mediante a soldagem por fusão. Há outras técnicas na qual nenhum material é inserido, todavia, a superfície do material muda, por exemplo, quando se tem tratamentos térmicos ou pelo contato com outros materiais via tratamentos termoquímicos (CARMONA, 2011).

Com relação à deposição de revestimento por soldagem, a taxa de deposição, a composição química dos materiais e a diluição são os fatores que mais afetam as propriedades do revestimento. Estes fatores são dependentes dos valores das variáveis ou parâmetros de soldagem utilizados, tais como, tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem, etc. Para alta produtividade e menor participação das propriedades do metal de base no revestimento é importante que se tenha uma alta taxa de depósito com baixa diluição e penetração uniforme (RIBEIRO, 2004).

O controle dos parâmetros de soldagem deve estar bem definido também com relação à geometria do cordão, pois a altura do cordão de solda, por exemplo, não pode ser excessiva que implique na perda acentuada de material do revestimento num processo de fabricação subsequente ao da soldagem como, por exemplo, usinagem. Todavia, há que se conciliar uma penetração do cordão, de tal forma que não produza uma zona afetada pelo calor muito larga e com regiões de alta dureza, bem como baixa diluição para não mudar as características do revestimento (RIBEIRO, 2004).

Há alguns tipos de discontinuidades em soldas de revestimento, como por exemplo: trincas, poros e inclusões de escória. No entanto, a presença de trincas ou outras discontinuidades lineares não inviabilizam completamente um revestimento, todavia, dependem da especificação do fabricante. Os principais tipos de discontinuidades em soldas de revestimentos são (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992):

- Trincas: consideradas discontinuidades lineares, caracterizadas por extremidades pontiagudas e elevada relação entre comprimento e largura;
- Poros: considerada uma discontinuidade volumétrica, com formato arredondado;

- Inclusão de escória: também considerada uma descontinuidade volumétrica. Este defeito é formado devido a incrustações da escoria no cordão de solda, não retiradas com eficiência antes de se aplicar o segundo passe de soldagem.

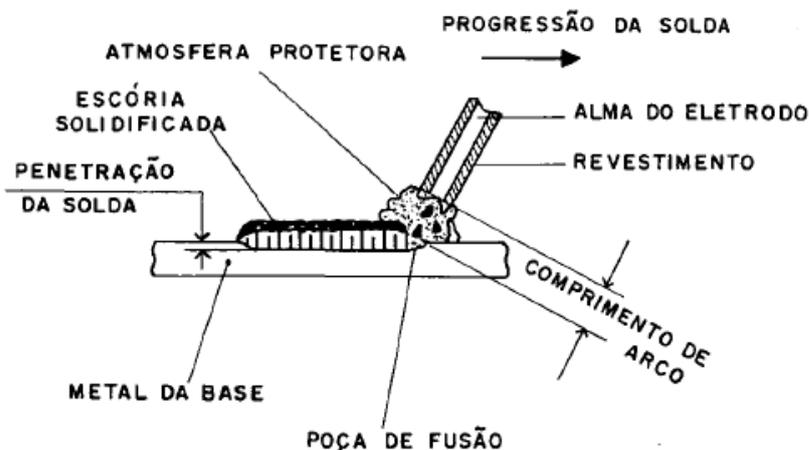
4.8 Processo de deposição

4.8.1 Soldagem com eletrodo revestido

4.8.1.1 Princípio de funcionamento

O processo de soldagem com eletrodo revestido, mundialmente conhecido como SMAW é um processo de soldagem a arco no qual a coalescência dos metais é produzida por um arco elétrico que é mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base. A Figura 9 a seguir ilustra o processo de soldagem manual ao arco elétrico com eletrodo revestido.

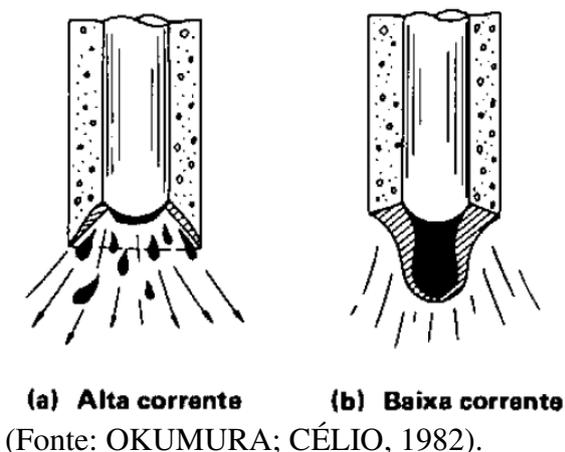
Figura 9 – Esquema básico do funcionamento do processo de soldagem com eletrodo revestido.



(Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

O eletrodo que se funde é transformado em gotas, devido à ação do arco elétrico, que são transferidas para a poça de fusão. No caso da soldagem com altas intensidades de correntes as gotas serão finas e numerosas, conforme pode ser observado mediante Figura 4.7a. Todavia, no caso de se soldar com baixa intensidade de corrente, conforme mostra a Figura 4.7b, tais gotas apresentarão o formato de glóbulos maiores (OKUMURA; CÉLIO, 1982).

Figura 10 – Modos de transferência metálica.



O processo de soldagem SMAW é realizado manualmente e a fonte de soldagem é geralmente do tipo "corrente constante" que possui a característica de manter a corrente praticamente constante durante a soldagem através da alteração da tensão devido às possíveis mudanças no comprimento do arco, muito comum em processos completamente manuais como é o caso do processo SMAW. O calor gerado pelo arco funde ambos, o metal de base e o consumível, desta forma ocorre a transferência do metal líquido, na forma de gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão (RIBEIRO, 2004).

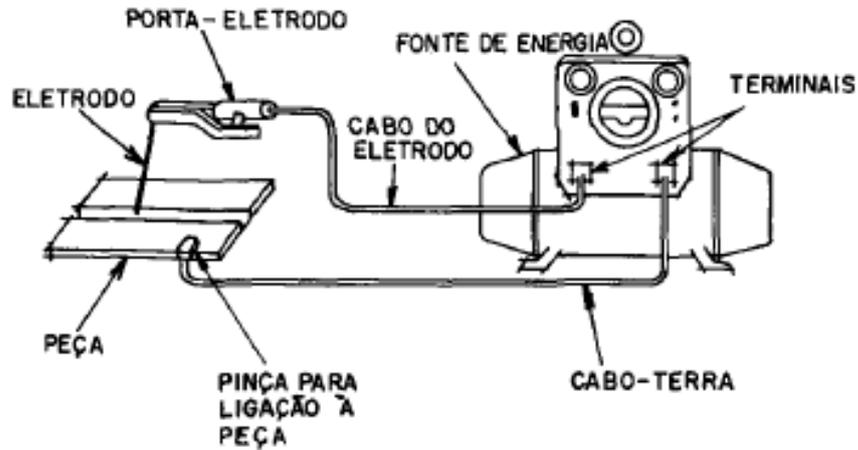
Dos processos de soldagem a arco elétrico, o processo SMAW é o mais simples. Os equipamentos utilizados no processo são relativamente de baixo custo, além do mais, os eletrodos são facilmente encontrados no mercado. Pelo fato do eletrodo revestido, ser composto por diferentes materiais (alma e revestimento), ter um comprimento limitado e da corrente elétrica atravessar todo o comprimento do eletrodo, torna-se o processo SMAW bastante específico (BRACARENSE; FELIZARDO, 2014).

4.8.1.2 Equipamentos e acessórios

Os equipamentos básicos para a soldagem pelo processo SMAW consiste em uma fonte de energia, equipamentos para limpeza e de proteção individual.

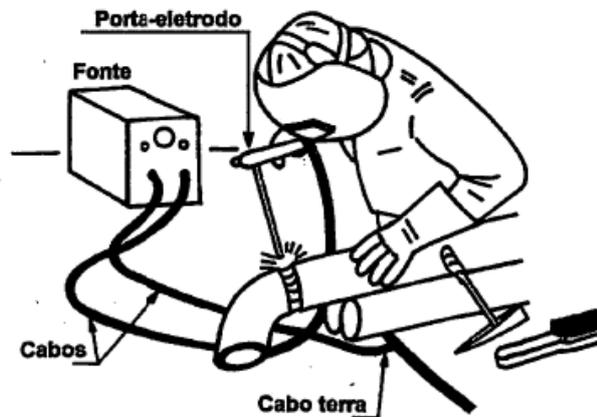
O diagrama de interligação do equipamento, bem como os equipamentos de proteção individual e limpeza da solda estão evidenciados nas Figuras 11 e 12 respectivamente. Os eletrodos podem operar com corrente contínua ou alternada, dependendo do tipo do revestimento. No primeiro caso, tanto é possível utilizar polaridade direta (eletrodo negativo) como a reversa (eletrodo positivo) (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 11 – Esquema básico de interligação do equipamento.



(Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 12 – Equipamento básico para soldagem com eletrodo revestido, evidenciando equipamentos de segurança: máscara, óculos, avental etc. bem como os acessórios de limpeza: picadeira, escova de aço etc.



(Fonte: BRACARENSE; MARQUES; MONDENESI, 2009).

4.8.2 Soldagem à plasma com arco transferido

4.8.2.1 Introdução

O processo de soldagem à *Plasma Transferred Arc* (PTA) foi desenvolvido na década de 50, e introduzido na área industrial no início dos anos 60, mas sua utilização em operações de revestimentos é muito recente se comparado aos processos mais convencionais de soldagem (Figura 13) (TIGRINHO, 2005).

Figura 13 – Desenvolvimento dos processos de soldagem.



(Fonte: Marconi 2002).

No início o processo PTA era considerado muito sofisticado, devido ao acréscimo de parâmetros que tinham de ser ajustados e controlados. Sendo assim, este método era somente empregado em aplicações onde as técnicas convencionais não podiam atender. Todavia, de acordo com o desenvolvimento da tecnologia dos equipamentos, fundamentalmente, do controlador microprocessado e a tecnologia de controle automático, o processo PTA se tornou mais viável e acessível (LUGSCHEIDER; MORKRAMER; AIT-MEKIDECHE, 1991).

A criação do processo PTA ocorreu mediante modificações do processo *Tungsten Inert Gas* (TIG), através da inclusão de um bocal na tocha de soldagem. Estes processos utilizam um cátodo de tungstênio não consumível, que é responsável por produzir a fonte primária de calor, e uma proteção do arco com gás inerte contra a contaminação atmosférica. A principal diferença existente entre os dois processos é que no PTA o eletrodo fica confinado dentro do bocal, o que promove um aumento da densidade de energia, possibilitando maiores taxas de deposição, menor diluição e cordões de boa qualidade. (YAEDU, 2003).

Quando se utiliza pó ao invés de arame como metal de adição, o processo PTA, é denominado *Plasma Transferred Arc – Powder* (PTA-P). Neste caso, ele geralmente é confundido com a pulverização térmica por plasma. Todavia, o PTA-P é um processo, fundamentalmente, utilizado para revestimento de superfícies, pois como a fusão do pó ocorre antes de atingir o substrato proporciona uma baixa diluição (OLIVEIRA, 2001).

4.8.2.2 Princípio de funcionamento

No processo PTA o arco plasma é comprimido e passa através de um orifício, aumentando consideravelmente a densidade de energia e a temperatura do arco elétrico. A liga em pó a ser aplicada é conduzida até a coluna do arco plasma, onde é fundida e projetada sob a proteção de um gás inerte. (EUTETIC, 2009)

O processo plasma por arco transferido utiliza um arco piloto entre o eletrodo de tungstênio e o bocal (FIGURA 14), conhecido como arco não-transferido, bem como o arco principal, também conhecido como arco transferido (FIGURA 15) (FOLTRAN, 2000; MARCONI, 2002).

Figura 14 – Arco piloto entre o bocal e o eletrodo.

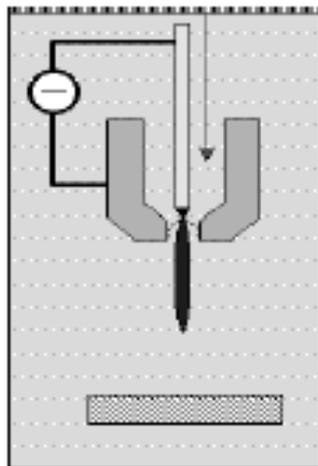
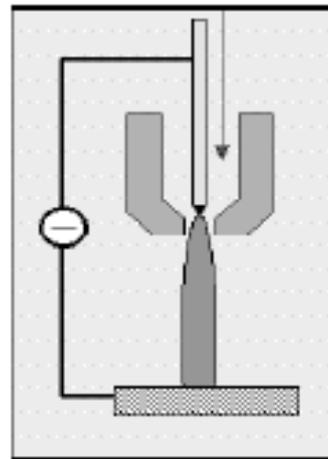


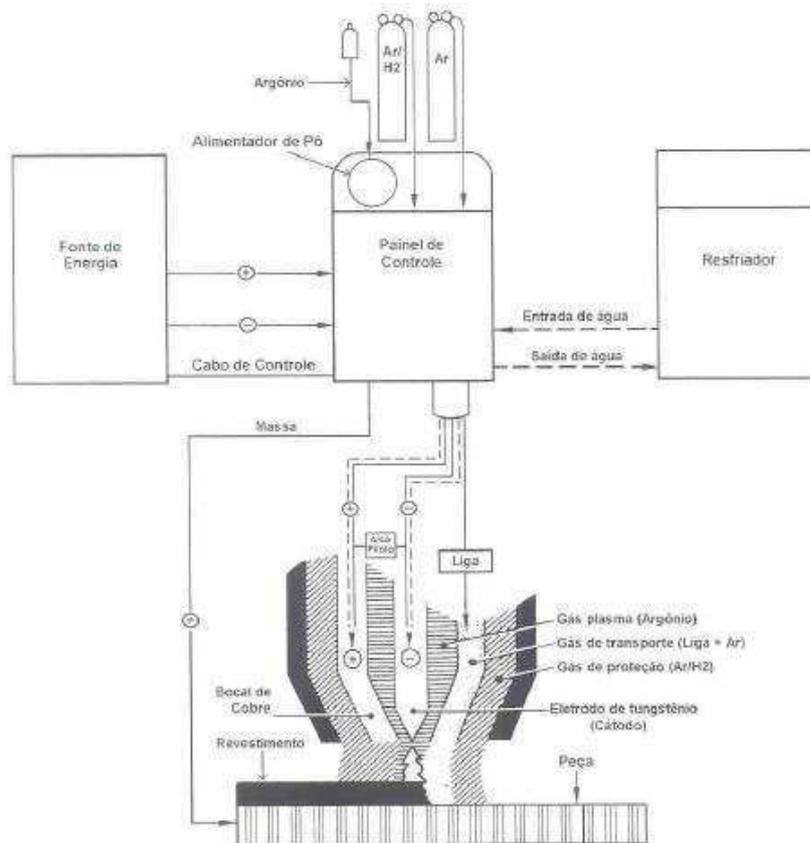
Figura 15 – Arco principal entre a peça e o eletrodo.



(Fonte: Marconi 2002).

Na sequência de processamento o gás ionizado é forçado a passar através do bocal de cobre refrigerado a água com um orifício de restrição na extremidade. A mudança brusca de temperatura do gás que incide com a parede fria do bocal provoca um grande gradiente térmico com o gás do centro da coluna, sendo assim, a densidade do centro da coluna diminui, tornando os elétrons com energia suficiente para provocar a ionização de outros átomos. Logo, o gás ionizado pelo arco, expande-se, acelera e forma um arco de elevada energia. O metal de adição na forma de pó é alimentado ao feixe de plasma em vazões preestabelecidas mediante precisos mecanismos de medição. A Figura 16 a seguir ilustra de forma esquemática o processo de soldagem PTA.

Figura 16 – Representação esquemática do processo de soldagem PTA.



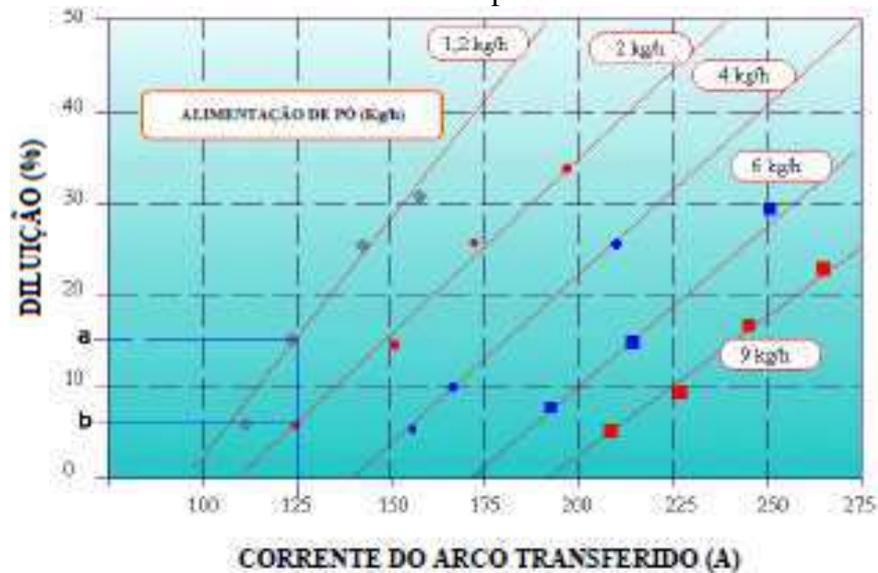
(Fonte: TIGRINHO, 2005).

4.8.2.3 Parâmetros do processo

Os parâmetros do processo relacionados a técnica de soldagem PTA estão listados abaixo. Tais variáveis devem ser controladas, pois há forte influência nas propriedades do revestimento (FOLTRAN, 2000; OLIVEIRA, 2001; MARCONI, 2002).

- Corrente: A intensidade da corrente está fortemente vinculada ao aporte de calor ao substrato. Ou seja, o aumento da corrente deve ser acompanhado também de um acréscimo na taxa de alimentação do pó. O objetivo, na realidade, de aumentar ambas as grandezas é evitar o aumento excessivo da diluição (Figura 17).

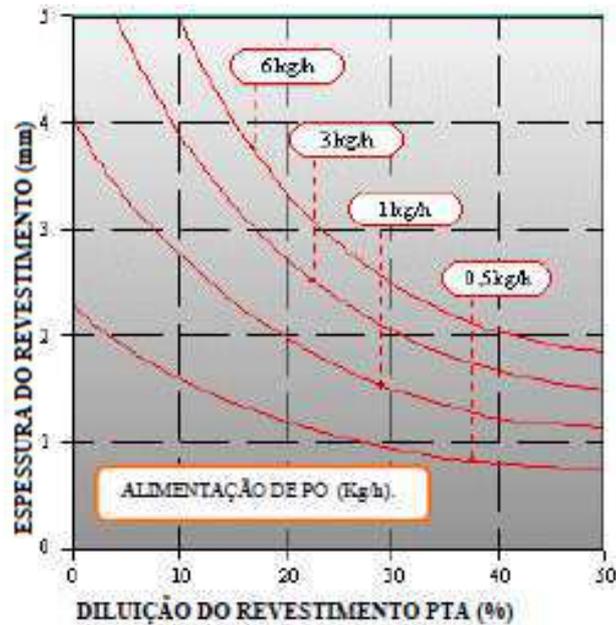
Figura 17 – Influência da corrente do arco transferido na diluição no revestimento PTA com um único passe.



(Fonte: Marconi, 2002).

- Vazão do gás plasma: A vazão do gás plasma está atrelada à quantidade de partículas no feixe de plasma, com o desgaste do eletrodo, bem como a penetração do material de revestimento.
- Taxa de alimentação do pó: A taxa de alimentação de pó influencia, fundamentalmente, nas características do cordão do revestimento; ou seja, na geometria e formato e, logicamente, na taxa de deposição do processo. A Figura 18 ilustra como a diluição aumenta com a quantidade de material depositado. Percebe-se também que a taxa de alimentação de pó está interligada basicamente duas a variáveis: e espessura do revestimento e a taxa de diluição do revestimento. Todavia, este aumento não se dá em virtude de uma maior quantidade de pó, e sim, devido à necessidade do aumento da corrente do arco transferido para processar a quantidade adicional de material de adição. Sendo assim, o aumento da intensidade da corrente de deposição tem como consequência uma maior penetração no metal de base.

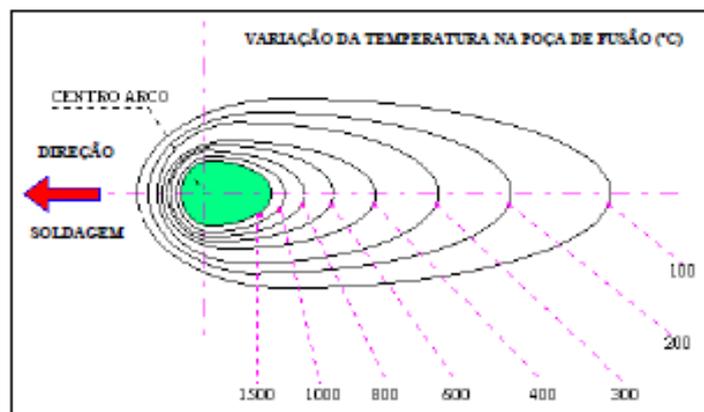
Figura 18 – Variação da taxa de alimentação em função da diluição e da espessura do revestimento.



(Fonte: Marconi, 2002).

- Velocidade de soldagem: É a variável de processo mais relevante que caracteriza o aspecto do revestimento, pois afeta diretamente na qualidade final da solda devido ao aporte de calor (Figura 19). Alguns defeitos de soldagem, fundamentalmente, trincas, porosidades e irregularidade superficial são originados quando se emprega velocidades de deslocamento da tocha muito elevadas.

Figura 19 – Linha isotérmica à frente de soldagem.



(Fonte: Marconi, 2002).

- Vazão do gás de proteção: A vazão do gás de proteção tem influência, basicamente, na diluição e geometria do cordão. Ou seja, quanto menor for a vazão do gás de proteção,

menor será a diluição, maior a largura e menor a altura do cordão do revestimento, devido às menores taxas de resfriamento.

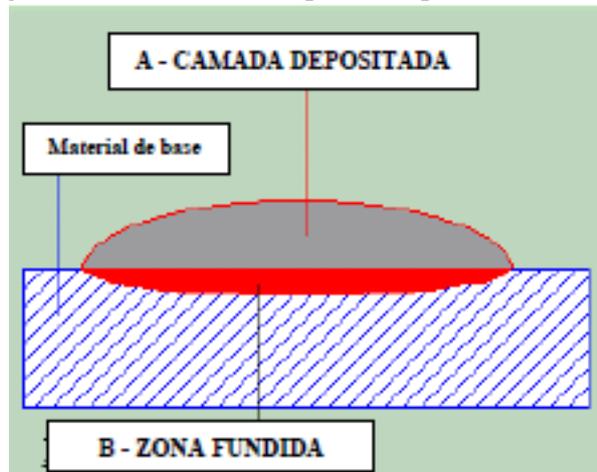
- Vazão do gás de transporte: A vazão do gás de transporte deve ser tal que possibilite o direcionamento do material até o feixe de plasma. A taxa de alimentação de pó tem influência significativa na qualidade do depósito. Isto é, mantendo os demais parâmetros fixos, a diluição diminui e a altura do cordão aumenta para vazões maiores de gás de transporte
- Distância tocha-peça: Devido às características obtidas no processo PTA mediante bocal constritor, são permitidas pequenas variações de distância entre a peça e a tocha. A distância entre a tocha e a peça está diretamente ligada à tensão no arco, ou seja, um aumento excessivo na tensão do arco pode acarretar num aumento exagerado da Zona Termicamente Afetada (ZTA).
- Características do bocal constritor: A variação da constrição do arco é determinada pelo diâmetro e comprimento do orifício do bocal constritor, sendo que os mais elevados graus de constrição são obtidos para pequenos diâmetros e grandes comprimentos do bocal. Uma maior constrição proporciona um feixe mais focado de plasma, que permite maiores distâncias entre a tocha e a peça, mas que podem causar maior transferência de calor ao substrato e ocasionar maiores taxas de diluição.

4.9 Propriedades do revestimento

4.9.1 Diluição

A diluição é uma variável de suma importância para soldas de recobrimento e pode ser definida como sendo a porção do material do substrato em relação ao volume total de revestimento depositado (Figura 20).

Figura 20 – Diluição em uma camada depositada por técnica de soldagem.



(Fonte: Marconi, 2002).

A diluição pode ser representada matematicamente pela Equação (1). Para tanto, tem-se B como sendo a porção do substrato fundida no processo de revestimento, e A a massa de pó adicionada. Sendo assim, $(A+B)$ representa o somatório das duas porções, ou seja, da massa de pó adicionada, bem como a do substrato fundido (FOLTRAN, 2000; MARCONI, 2002; TIGRINHO, 2005).

$$d(\%) = \frac{B}{(A+B)} \cdot 100 \quad (1)$$

A quantidade máxima de diluição depende do processo utilizado para o revestimento, dos parâmetros de processamento e das características do material de adição e do substrato. Para um revestimento mais efetivo não são recomendados valores superiores a 20% de diluição (FOLTRAN, 2000; TIGRINHO, 2005).

A Tabela 5 mostra os valores de diluição comumente obtidos nos processos de soldagem (MARCONI, 2002).

Tabela 5 – Valores mínimos e máximos de diluição para os processos de soldagem utilizados em operações de revestimento.

Processo de revestimento por soldagem	Diluição min-máx para um passe (%)
Brasagem	0
Revestimento Oxiacetileno	1 - 5
Revestimento laser	1 - 6
Revestimento PTA	2 - 10
Revestimento GTAW (TIG)	10 - 20
Revestimento eletrodo revestido	15 - 25
Revestimento GMAW (MIG)	15 - 25
Revestimento eletrodo arco elétrico	15 - 30
Revestimento arco submerso	30 - 60
Revestimento por resistência	90 - 99

(Fonte: Marconi, 2002).

Segundo Tigrinho (2005) a penetração do revestimento é a profundidade que este alcança na Zona Fundida (ZF), abaixo da linha mediana de uma seção transversal do cordão. De acordo com a Figura 21 percebe-se que a penetração do revestimento tem forte dependência da espessura da camada do revestimento, e varia diretamente em função da diluição.

Figura 21 – Variação na penetração em função da espessura e da diluição do revestimento obtido por PTA.



(Fonte: Marconi, 2002).

4.9.2 Aporte térmico

No processo de soldagem por arco plasma, o calor gerado na tocha é transferido para a peça. Usando a técnica de revestimento PTA, se deve controlar atentamente o aporte térmico

conferido à peça para limitar a diluição. O aporte térmico fornecido pelo arco transferido, por unidade de comprimento da solda, é expresso pela Equação (2):

$$Q = \frac{VI}{w} \cdot 60 \quad (\text{J/cm}) \quad (2)$$

Onde:

V: tensão no arco transferido (V)

I: corrente do arco transferido (A)

w: velocidade de soldagem (cm/min)

Sendo que a quantidade total de calor transferida para a peça depende da eficiência do arco (η) determinada experimentalmente. O total de calor transferido para a peça (Q_t) é obtido pela Equação (3):

$$Q_t = \eta \cdot \frac{VI}{w} \cdot 60 \quad (\text{J/cm}) \quad (3)$$

A Tabela 6 fornece os valores mínimos e máximos de eficiência térmica, observada para os principais processos de soldagem.

Tabela 6 – Valores mínimos e máximos da eficiência térmica do arco nos processos de soldagem utilizados em operações de revestimento.

Procedimento de revestimento por soldagem	Eficiência térmica do arco (%)
TIG	25 - 50
PTA	50 - 60
MIG	60 - 70
Eletrodo	65 - 85
Arco submerso	95 - 98

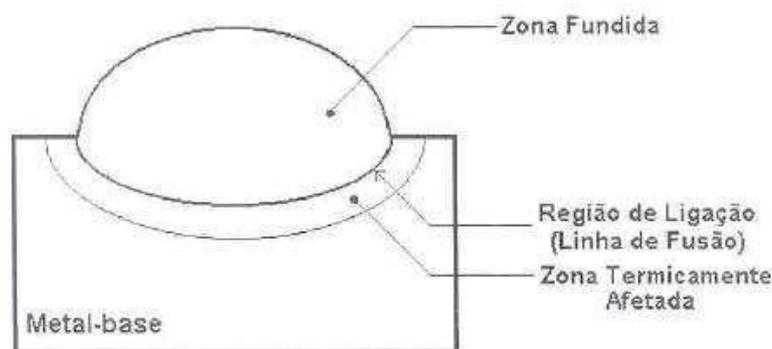
(Fonte: Marconi, 2002).

4.9.3 Microestruturas do metal depositado e da zona termicamente afetada

A microestrutura do revestimento depende diretamente da composição química do metal de adição, da diluição e da velocidade de resfriamento (FOLTRAN, 2000; TIGRINHO, 2005). Outra região de relevância é ZTA do substrato já que o aporte de calor pode causar alterações como o crescimento de grão e transformação de fases nas regiões vizinhas ao metal depositado. Portanto, em uma operação de revestimento com união metalúrgica, devem ser consideradas três regiões para análise (Figura 22) (TIGRINHO, 2005):

- Zona Fundida (ZF): poça de material fundido durante o processo de deposição;
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida do substrato, mas onde ocorrem alterações da microestrutura e das propriedades do material devido ao aporte de calor;
- Metal-base: parte do material não afetada pelo ciclo térmico da operação de deposição.

Figura 22 – Regiões características de um revestimento obtido por técnica de soldagem.



(Fonte: TIGRINHO, 2005).

O ciclo térmico de soldagem é responsável pelas mudanças microestruturais do revestimento, variações dimensionais e alterações da microestrutura e pela formação de discontinuidades. Durante a operação, o processo de resfriamento do revestimento inicia-se logo após a passagem da tocha e, neste caso, a solidificação pode ser considerada como um processo microscópico devido à pequena massa de metal fundido (TIGRINHO, 2005).

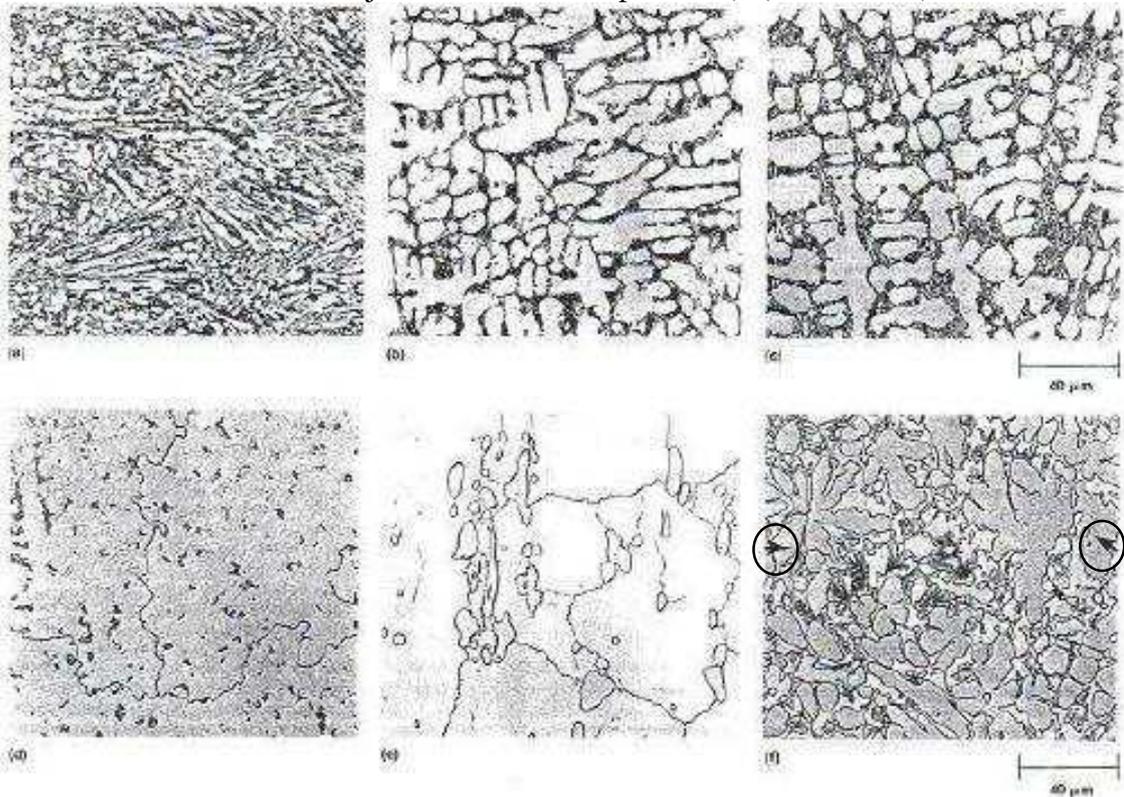
As ligas a base de cobalto possuem uma matriz austenítica Cúbica de Face Centrada (CFC) e uma variedade de fases secundárias. Estas fases secundárias são relevantes para o controle das propriedades, tais como os carbonetos MC, $M_{23}C_6$ e M_7C_3 . O principal carboneto é o carboneto de cromo do tipo M_7C_3 , no entanto o carboneto $M_{23}C_6$ é também muito comum nas ligas de baixo carbono (ROYSE, 2010; YAEDU, 2003).

Os diversos tipos de carbonetos dependem da composição química da liga e também do processamento, estes podem apresentar várias formas e tamanhos. No caso do Carboneto de Tungstênio (WC) disperso em uma matriz rica em Cobalto (Co) mostram que a forma da partícula varia de acordo com o teor de carbono (ROYSE, 2010; KIM *et al*, 2003).

As ligas com maiores quantidades de fases duras (precipitados, fases de Laves, etc.) são complexas de se processar, sendo raro de se apresentar depósitos livres de trincas. Ligas tais como a Stellite 6 e a Stellite 12, com um equilíbrio diferente entre fases duras e a matriz dúctil

de Cobalto, apresentam com mais facilidade revestimentos de boa aparência e livres de trincas. A Figura 23 ilustra as micrografias das ligas Stellite 1, 6, 12 e 21, bem como as ligas Haynes 6B e Triballoy T-800 (TAKEYAMA, 2005).

Figura 23 – Microestrutura das ligas: (a) Stellite 1, 2 camadas depositadas por GTA. (b) Stellite 6, 2 camadas depositadas por GTA. (c) Stellite 12, 2 camadas depositadas por GTA. (d) Stellite 21, 2 camadas depositadas por GTA. (e) Liga Haynes 6B, placa de 13 mm (0,5 in). (f) Liga Triballoy T-800, mostrando os precipitados de Laves (precipitados grandes e contínuos, cujos estão indicados por setas). (Todas 500x)

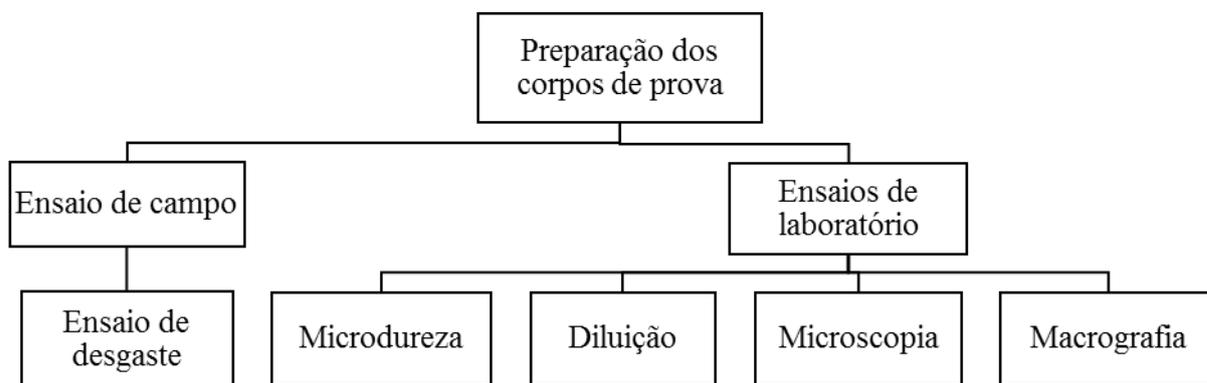


(Fonte: Adaptado de CROOK, 1991).

5.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades experimentais desta pesquisa foram desenvolvidas seguindo a sequência proposta no fluxograma da Figura 24. No decorrer deste capítulo cada etapa mencionada no fluxograma abaixo será detalhada, onde serão evidenciados os materiais utilizados, procedimentos, parâmetros e equipamentos de cada fase.

Figura 24 – Fluxograma da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho.



(Fonte: Autoria própria).

5.1 – Materiais

Os martelos trituradores são originalmente confeccionados em aço inox AISI 316 L, na condição como fundido. As composições químicas, bem como as propriedades mecânicas deste aço estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química e propriedades mecânicas do aço AISI 316L.

Substrato	Composição Química							
	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%P	%S
	0,03	2,0	1,0	(16-18)	(10-14)	(2,0-3,0)	0,045	0,03
AISI 316 L	Propriedades Mecânicas							
	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HV)		Tensão de escoamento (MPa)		Tensão máxima (MPa)		
	8,00	160		220		(515-690)		

(Fonte: Adaptado de ASM METALS HANDBOOK, 1990 e NILSSON, 1997).

No presente trabalho utilizou-se a aplicação de três ligas à base de cobalto (Stellite 1, 6 e 21), depositadas em substratos de aço AISI 316 L (aço inoxidável austenítico). A Tabela 8

revela a composição química, e também, as propriedades mecânicas das ligas Stellite 1, 6 e 21, respectivamente.

Tabela 8 – Composição química e propriedades mecânicas das ligas comerciais Stellite 1, 6 e 21.

Composição química									
Ligas do revestimento	%Co	%Cr	%W	%C	%Ni	%Mo	%Fe	%Mn	%Si
Liga Stellite 1	Bal.	30	13	2,5	1,5	0,5	3	0,5	1,3
Liga Stellite 6	Bal.	29	4,5	1,2	3 (máx.)	1,5	3 (máx.)	1 (máx.)	1,5 (máx.)
Liga Stellite 21	Bal.	27	-	0,25	2,75	5,5	3 (máx.)	1 (máx.)	1 (máx.)
Propriedades Mecânicas									
Ligas do revestimento	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HRC)	Tensão de escoamento (MPa)				Tensão máxima (MPa)		
Liga Stellite 1	8,69	55	---				618		
Liga Stellite 6	8,46	40	541				896		
Liga Stellite 21	8,56	32	494				694		

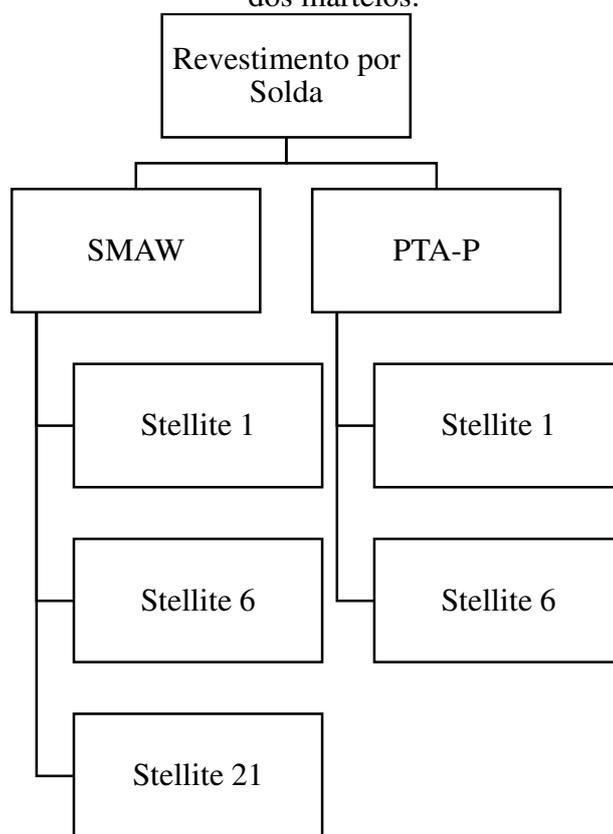
(Fonte: Adaptado de ASM METALS HANDBOOK, 1990).

5.2 – Métodos

5.2.1 – Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova desenvolvidos para este trabalho foi conduzida, a princípio, com a produção de martelos trituradores utilizados como substrato, confeccionados em aço inox austenítico AISI 316 L nas dimensões de 236 x 155 x 25,4 mm. Sobre estes martelos foram depositados cordões de solda com as três ligas de cobalto: Stellite 1, 6 e 21, utilizando o processo SMAW e duas ligas, Stellite 1 e 6, utilizando o processo PTA-P. A Figura 25 indica os processos de soldagem, bem com as ligas utilizadas nesta pesquisa.

Figura 25 – Processos de soldagem e ligas à base de cobalto utilizados para o revestimento dos martelos.



(Fonte: Autoria própria).

Para compor os ensaios de campo, bem com os ensaios laboratoriais, foram confeccionados 58 corpos de prova conforme indicado na Tabela 9. Ou seja, foram produzidos 8 martelos de cada configuração, destinados ao ensaio de campo, isto é, um martelo que foi utilizado para os ensaios de laboratório e um corpo de prova que ficou disponível como material sobressalente, para prevenir um eventual acidente que inutilizasse ou prejudicasse um dos corpos de prova. Ainda assim, foram produzidos mais 8 martelos sem revestimento, os quais foram utilizados nos ensaios de campo a fim de comparar a perda de massa em relação as configurações com martelos revestidos propostos neste trabalho. A Figura 26 mostra os martelos utilizados nos ensaios nas condições com revestimento e sem revestimento.

Tabela 9 – Tipos e quantidades de corpos de prova utilizados na pesquisa.

Processo	Material	Martelos destinados ao ensaio de campo	Martelos destinados à retirada de Corpos de prova (laboratório)	Martelos Sobressalentes	Total de Martelos
Eletrodo Revestido	Stellite 1	8	1	1	30
	Stellite 6	8	1	1	
	Stellite 21	8	1	1	
PTA-P	Stellite 1	8	1	1	20
	Stellite 6	8	1	1	
Martelo Neutro	AISI 316 L	8	-	-	8
Total de Martelos	48 (Ensaio de campo) + 5 (Ensaio laboratoriais) + 5 (Reposição)				58

(Fonte: Autoria própria).

Figura 26 – Martelos utilizados para os ensaios.



(a) Com revestimento



(b) Sem revestimento

(Fonte: Autoria própria)

5.3 – Identificação dos corpos de prova

Os martelos foram codificados com uma letra, um número e por fim outra letra. A primeira letra designa o tipo de processo de soldagem, sendo “E” para eletrodo revestido, “P” para o processo PTA-P e N para o martelo neutro, isto é, sem aplicação de revestimento duro. Na sequência, o número indica qual liga de cobalto foi utilizada. Para tanto, utilizou-se os

números 1, 6 e 21, que representam as ligas Stellite 1, 6 e 21, respectivamente. A última letra representa o posicionamento do martelo no rotor. O objetivo desta última letra é facilitar a identificação dos martelos após o ensaio de campo. Como se têm 8 martelos de cada configuração, os corpos de prova foram identificados por letras no final do código que variam de A à H, como pode ser observado no exemplo descrito na Figura 27.

Figura 27 – Codificação dos martelos a serem utilizados no ensaio de campo.



(Fonte: Autoria própria).

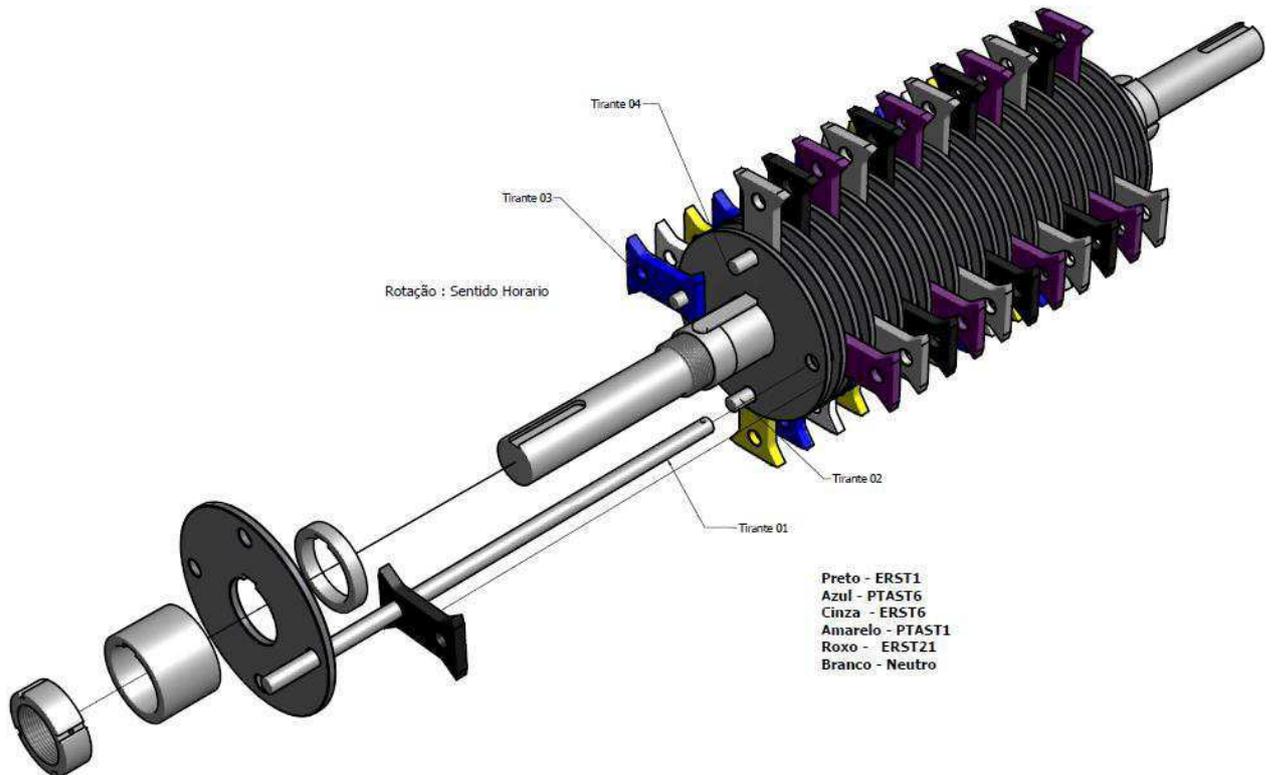
A Tabela 10 evidencia o posicionamento dos martelos segundo a configuração tirante/disco, e a Figura 28 ilustra a distribuição dos martelos no rotor. Os corpos de prova foram distribuídos de forma homogênea e igualitária entre todos os discos do conjunto mecânico a fim de evitar esforços concentrados em determinados tipos de martelos. Os discos 1 e 26 não possuem martelos, pois são utilizados para realizar o fechamento do conjunto rotor, do moinho triturador.

Tabela 10 – Posicionamento dos martelos no rotor, evidenciando a configuração disco/tirante, de acordo com a Figura 28.

Distribuição dos martelos	Tirante 1	Tirante 2	Tirante 3	Tirante 4
Disco 1	-	-	-	-
Disco 2	E 1 A	-	P 6 A	-
Disco 3	-	P 1 A	-	E 6 A
Disco 4	E 21 A	-	N A	-
Disco 5	-	P 6 B	-	E 1 B
Disco 6	E 6 B	-	P 1 B	-
Disco 7	-	N B	-	E 21 B
Disco 8	E 1 C	-	P 6 C	-
Disco 9	-	P 1 C	-	E 6 C
Disco 10	E 21 C	-	N C	-
Disco 11	-	P 6 D	-	E 1 D
Disco 12	E 6 D	-	P 1 D	-
Disco 13	-	N D	-	E 21 D
Disco 14	E 1 E	-	P 6 E	-
Disco 15	-	P 1 E	-	E 6 E
Disco 16	E 21 E	-	N E	-
Disco 17	-	P 6 F	-	E 1 F
Disco 18	E 6 F	-	P 1 F	-
Disco 19	-	N F	-	E 21 F
Disco 20	E 1 G	-	P 6 G	-
Disco 21	-	P 1 G	-	E 6 G
Disco 22	E 21 G	-	N G	-
Disco 23	-	P 6 H	-	E 1 H
Disco 24	E 6 H	-	P 1 H	-
Disco 25	-	N H	-	E 21 H
Disco 26	-	-	-	-

(Fonte: Autoria própria).

Figura 28 – Distribuição dos martelos trituradores no rotor do moinho.



(Fonte: Autoria própria).

5.4 – Processo de deposição

Inicialmente, foi realizada uma limpeza mecânica em todos os corpos de prova (SMAW e PTA-P), sem remoção significativa de material. Não foi feito nenhum tipo de rebaixo, ou usinagem que tenha acarretado na remoção de material para a deposição com revestimento duro. Para a soldagem SMAW utilizou-se uma inclinação do eletrodo revestido entre 75° e 80° na direção da solda.

O equipamento utilizado para depositar os cordões foi uma fonte GST 850 STAR para a soldagem com o processo SMAW (Figura 29) e a fonte GAP 3001 DC para a deposição com o processo PTA-P (Figura 30), ambos equipamentos da Eutetic Castolin.

Figura 29 – Equipamento utilizado na soldagem com eletrodo revestido (SMAW).



(Fonte: Autoria própria).

Figura 30 – Equipamento utilizado na soldagem manual com plasma de arco transferido (PTA-P).



(Fonte: Autoria própria).

Os parâmetros de deposição dos cordões de solda utilizando o processo SMAW, estão apresentados na Tabela 11, e aqueles utilizando o processo PTA-P estão indicados na Tabela 12.

Tabela 11 – Parâmetros de soldagem para deposição com o processo SMAW.

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade média (mm/s)	Corrente e polaridade	Nº de passes de solda	Camada depositada (mm)	Consumível
						Diâmetro (mm)
110 - 120	44	2 ± 1	CC ⁺	1	3 a 4	3,25

(Fonte: Autoria própria).

Tabela 12 – Parâmetros de soldagem para deposição com o processo PTA-P.

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade média (mm/s)	Corrente e polaridade	Nº de passes de solda	Camada depositada (mm)	Comprimento do arco (mm)
85	26 a 28	1,5	CC ⁺	1	3 a 4	13
Vazão do gás de proteção (l/min)	Vazão do gás de arraste de pó (l/min)	Vazão do gás de plasma (l/min)	Consumível		-	-
			Granulometria média (mícrons)			
12	1,7	1,2	Stellite 1: 70 Stellite 6: 110		-	-

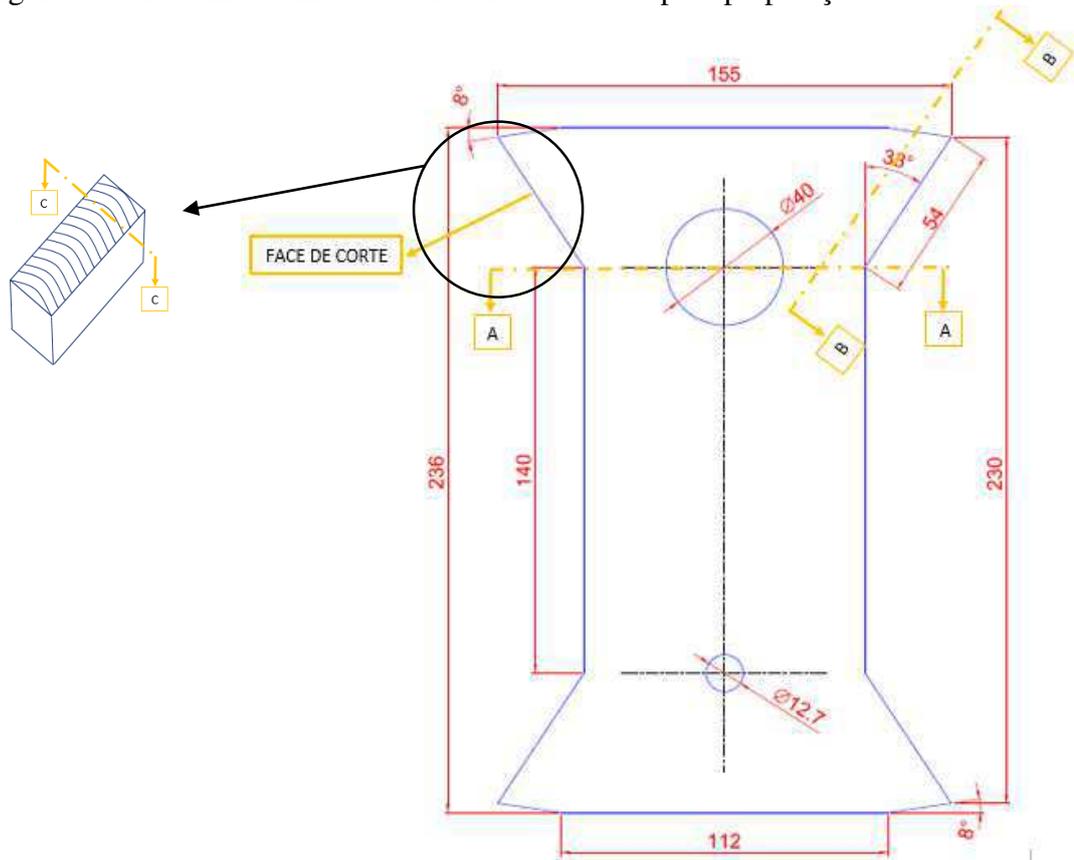
(Fonte: Autoria própria).

5.5 – Caracterização dos revestimentos

5.5.1 – Preparação das amostras

Para realizar a análise metalográfica cada corpo de prova foi cortado na secção A-A. Para tanto, os cortes foram realizados com o auxílio de uma máquina Policorte Arotec COR 80 com refrigeração. Na sequência, os corpos de prova foram novamente cortados na secção longitudinal B-B, o objetivo para tal seccionamento foi a retirada de uma amostra do perfil da área de desgaste do martelo triturador. Por fim, foi realizado o corte na seção transversal C-C a fim de analisar a geometria do cordão, diluição, bem como viabilizar o ensaio de microdureza. O corte C-C foi feito a uma distância de 15 mm do início do cordão de solda. A Figura 31 revela o desenho do martelo, bem como os cortes que foram realizados para preparar as amostras referentes aos ensaios de laboratório.

Figura 31 – Desenho técnico evidenciando os cortes para preparação das amostras.



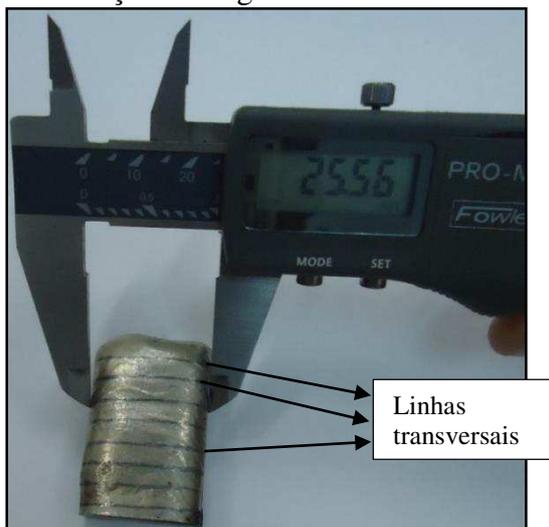
(Fonte: Autoria própria) unidades em mm.

5.5.2 – Geometria do cordão

A análise das amostras foi realizada com a observação dos cordões a olho nu, procurando diferenças no seu aspecto superficial, além da presença ou não de trincas e poros. A superfície dos cordões foi fotografada com câmera fotográfica de 14.1 megapixels a fim de realizar o registro e comparação visual.

A largura, penetração, e reforço para cada condição testada, foi medida na seção transversal C-C dos depósitos. Para a medida da largura do cordão, foram realizadas 8 linhas transversais ao longo do cordão de solda. Na sequência, as medições foram conduzidas com o auxílio de um paquímetro digital Pro-Max Fowler, sendo os valores registrados e extraídos da média da largura do depósito (Figura 32).

Figura 32 – Medição da largura do cordão de solda.



(Fonte: Autoria própria).

Para medição da penetração e reforço, as amostras foram preparadas de acordo com os procedimentos padrões de preparação metalográfica, ou seja, a metalografia envolveu as etapas de embutimento, desbaste, polimento e ataque com reagente adequado. A Tabela 13 resume os detalhes das etapas de lixamento e polimento.

Tabela 13 – Detalhes das etapas de lixamento e polimento dos corpos de prova.

Fase	Abrasivo	Lubrificante	Limpeza	Secagem
Desgaste	Lixas # 180, 220 e 320	Água	Algodão e Álcool Etílico 96° GL	Ar quente
Acabamento	Lixas # 400, 600 e 1200	Água	Algodão e Álcool Etílico 96° GL	Ar quente
Polimento	Alumina com granulometrias entre 1 e 0,05 µm	Água	Algodão e Álcool Etílico 96° GL	Ar quente

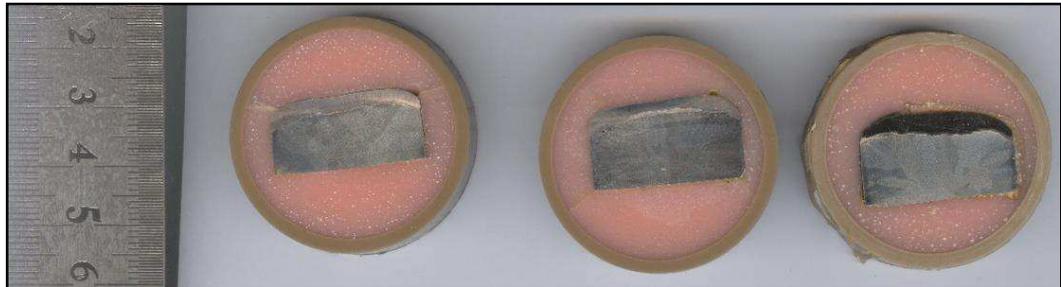
(Fonte: Autoria própria).

O ataque químico das superfícies polidas foi realizado por imersão, utilizando um reagente com a seguinte composição: 15 ml H₂O, 15 ml HNO₃, 15 ml CH₃COOH e 60 ml HCl, por um tempo que variou de 35 a 60 s.

Após toda a preparação metalográfica, as amostras foram fotografadas e as imagens importadas para o programa Autodesk Inventor, onde foram realizadas as devidas medições, a partir da linha neutra, da penetração e reforço. A Figura 33 revela as fotografias das amostras, e a Figura 34 mostra a imagem já importada para tratamento de imagens usando o programa

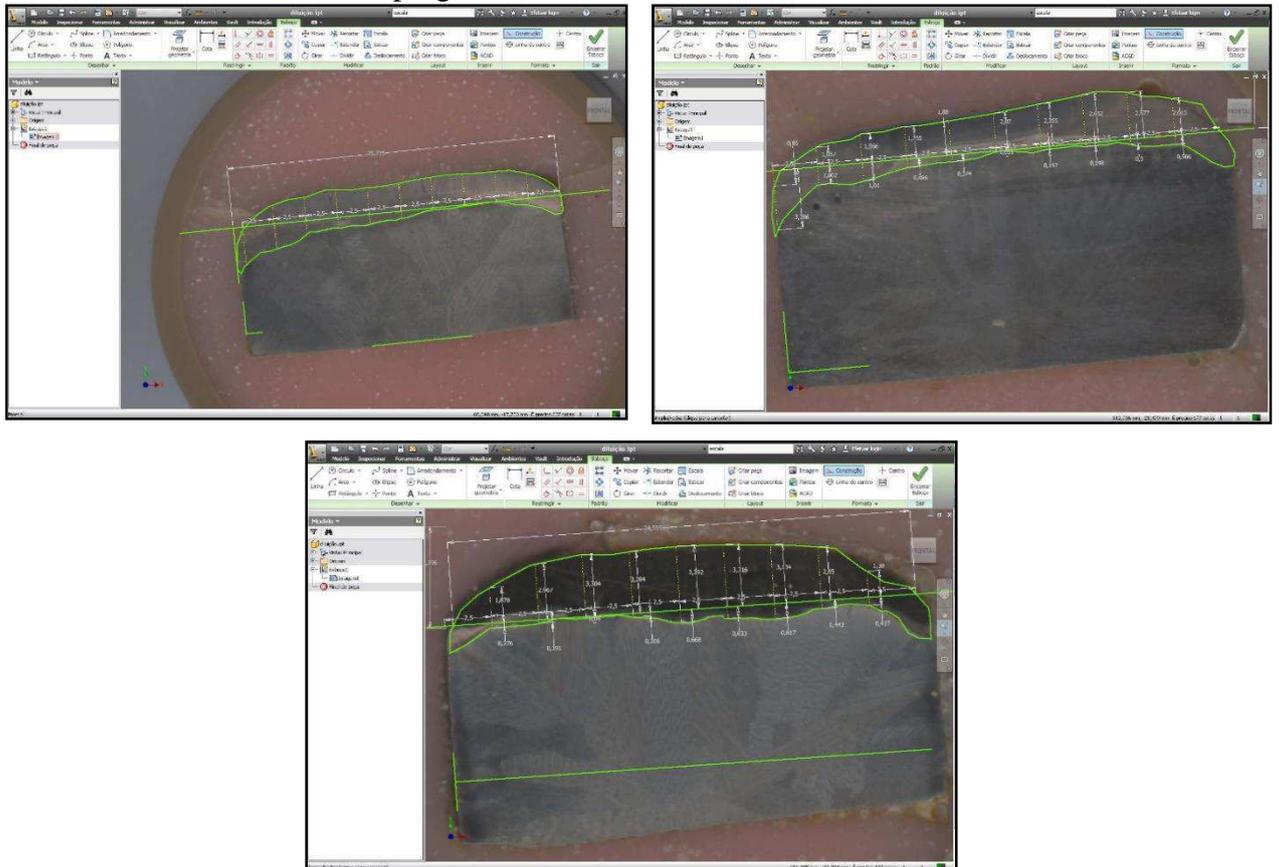
Autodesk Inventor. As amostras soldadas com o processo PTA-P podem ser visualizadas nas Figuras 35 e 36.

Figura 33 – Fotografia das amostras do processo SMAW – Stellite 1, 6 e 21.



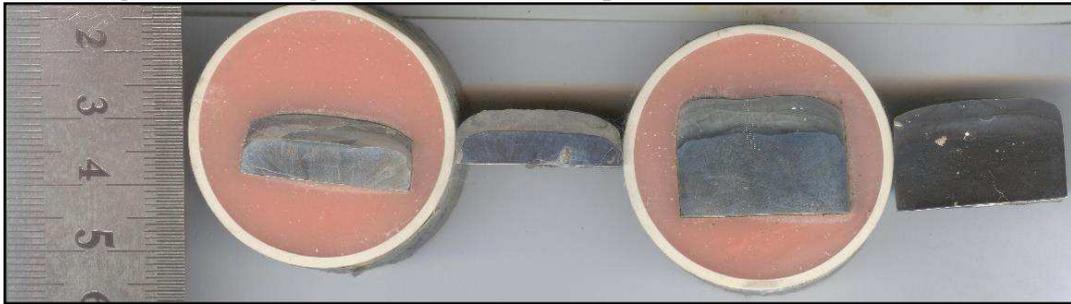
(Fonte: Autoria própria).

Figura 34 – Imagens das amostras do processo SMAW – Stellite 1, 6 e 21 importadas para o programa Autodesk Inventor.



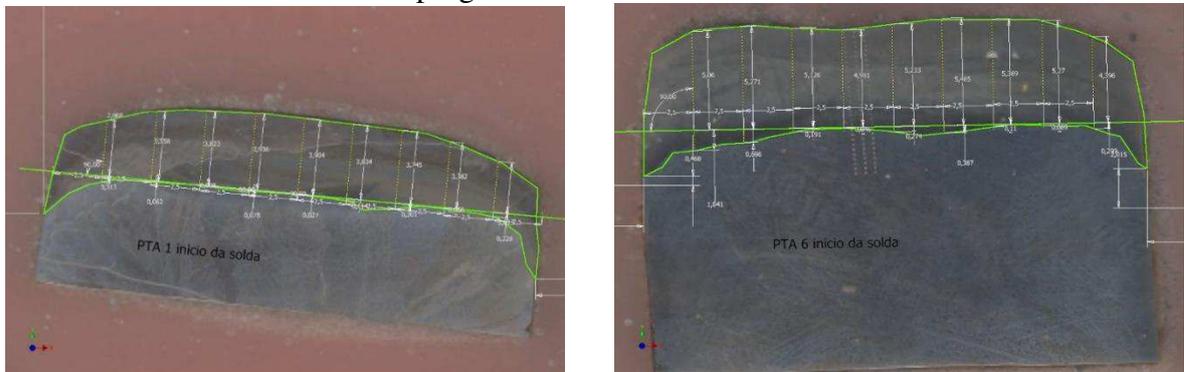
(Fonte: Autoria própria).

Figura 35 – Fotografia das amostras do processo PTA-P Stellite 1 e 6.



(Fonte: Autoria própria).

Figura 36 – Imagem das amostras do processo PTA-P – Stellite 1 e 6 importadas para o programa Autodesk Inventor



(Fonte: Autoria própria).

5.5.3 – Análise microestrutural

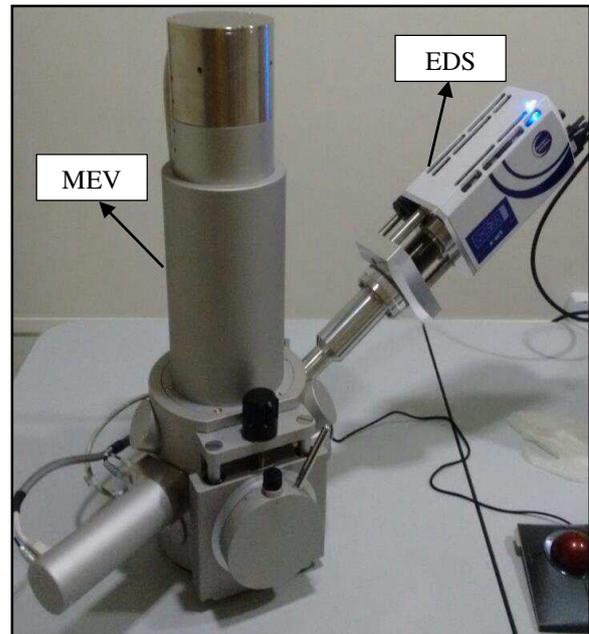
A análise microestrutural das amostras foi conduzida com o auxílio de um microscópio ótico Olympus BX 51M, disponível no laboratório de Metalografia (LABMET) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (Figura 37).

A observação ao microscópio ótico permitiu caracterizar a microestrutura ao longo da seção transversal, fornecendo uma visão geral sobre a microestrutura e morfologia ao longo da extensão do revestimento até o substrato. Para evidenciar de forma mais consistente as microestruturas, as amostras foram analisadas também por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) Shimadzu VEGA 3 SBH e por análise química pela técnica de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) utilizando o equipamento OXFORD Instruments X-act apresentado na Figura 38 também disponível no LABMET da UFCG.

Figura 37 – Microscópio ótico Olympus BX 51M.



Figura 38 – Microscópio Eletrônico de Varredura Shimadzu VEGA 3 SBH e EDS OXFORD Instruments X-act.



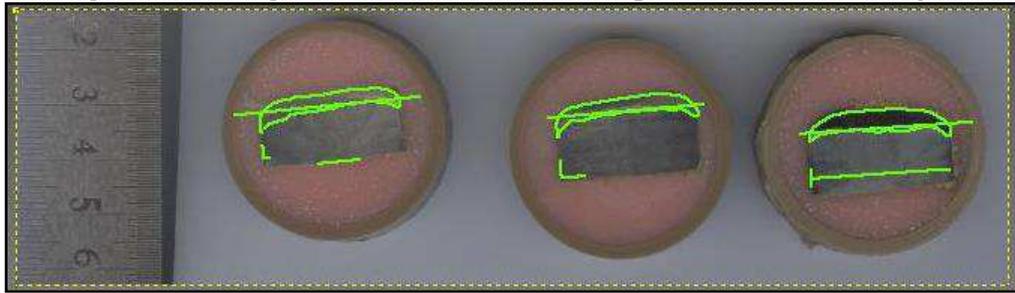
(Fonte: Autoria própria).

5.5.4 – Análise de diluição

A diluição representa um parâmetro crucial no desempenho em serviço de soldas de recobrimento. Como o material do revestimento possui composição química e propriedades mecânicas bastante distintas do substrato (soldas dissimilares), a diluição ocasiona uma mudança dessas características. Assim sendo, quanto maior for a diluição, mais distante estará as propriedades do revestimento em relação às propriedades da liga original (YAEDU, 2003).

A medição da diluição foi realizada através da análise de proporção das áreas, utilizando-se as imagens das seções transversais dos cordões de recobrimento. Neste caso obteve-se, utilizando máquina digital, uma macrografia da secção transversal de cada amostra. As imagens foram importadas para o programa Autodesk Inventor, onde foi traçada a linha neutra e delineadas as áreas de interesse, e na sequência, o programa calcula as áreas requisitadas. A Figura 39 revela as imagens das amostras analisadas.

Figura 39 – Imagem das amostras utilizadas para a análise de diluição.



(Fonte: Autoria própria).

5.5.5 – Perfil de microdureza

O perfil de microdureza revela os valores de microdureza ao longo da seção transversal do depósito e possibilita uma avaliação prévia da variação das propriedades do revestimento ao longo de sua seção transversal. Com estas medições é possível avaliar indiretamente a influência dos parâmetros de processo sobre a diluição (TAKEYAMA, 2005).

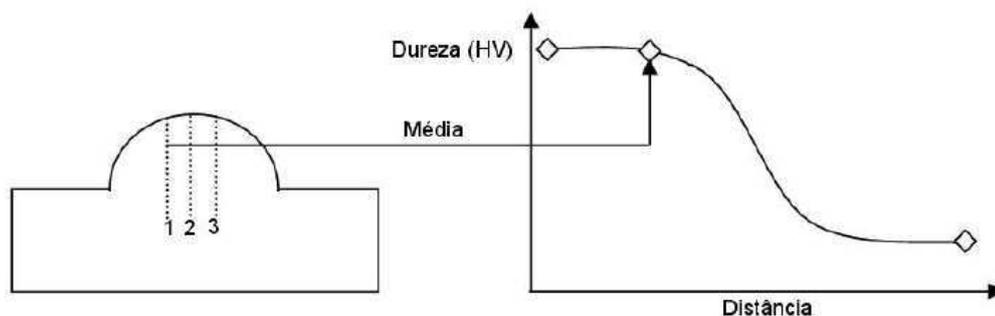
Os perfis de microdureza foram levantados com um Microdurômetro Future – Tech MODELO FM – 700 (Figura 40), utilizando-se um penetrador Vickers (pirâmide de diamante de 136°) e uma carga de 500 g (HV 0,5). Após a focalização e o ajuste da interface revestimento / baquelite, através do sistema ótico do microdurômetro, foram feitos 3 perfis de 15 a 20 identificações por amostra, com espaçamento entre os perfis de 500 μm e entre identificações de 250 μm , conforme representação esquemática apresentada na Figura 41. Foi considerada como a microdureza de cada ponto a média das medidas das 3 linhas horizontais da superfície externa dos três grupos, conforme pode ser observado na Figura 41 (ABNT, 1981).

Figura 40 – Microdurômetro Future – Tech MODELO FM – 700, utilizado na análise do perfil de microdureza.



(Fonte: Autoria própria).

Figura 41 – Representação esquemática da medição do perfil de microdureza.



(Fonte: ABNT, 1981).

5.6 – Ensaio de campo

O ensaio de campo é fundamental para a análise de como se comporta a aplicação dos depósitos em situação real de trabalho, ou seja, de acordo com a aplicação de campo é possível avaliar a perda de massa dos martelos revestidos em comparação com os martelos originais (sem revestimento). Para tanto, conforme já mencionado, foram construídos 58 martelos trituradores para a condução dos trabalhos de laboratório e ensaio de campo, onde conforme descrito na Tabela 5.3. Para o ensaio de campo foram preparados 40 martelos revestidos e mais 8 martelos não revestidos. O objetivo do ensaio é comparar as amostras revestidas com os

martelos no estado original, e por fim, avaliar qual liga e processo de soldagem é tecnicamente mais viável para a aplicação prática.

Após a preparação dos martelos os mesmos foram pesados em uma balança Filizola com precisão de 1 g. Na sequência, os martelos foram balanceados, retirando material em caso de excesso, caso necessário.

A Figura 42 ilustra a disposição dos martelos antes da montagem no moinho triturador. O arranjo da montagem do conjunto rotor (martelos, discos e tirantes) está descrito na Tabela 10 e evidenciado na Figura 28.

Figura 42 – Preparação e disposição dos martelos trituradores antes da montagem no moinho.



(Fonte: Autoria própria).

O teste de campo foi realizado para uma produção de 2.700 toneladas de sucata de bateria triturada. No final do ensaio os martelos foram retirados do equipamento e pesados a fim de medir o peso após desgaste e, conseqüentemente, a variação de massa.

6.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

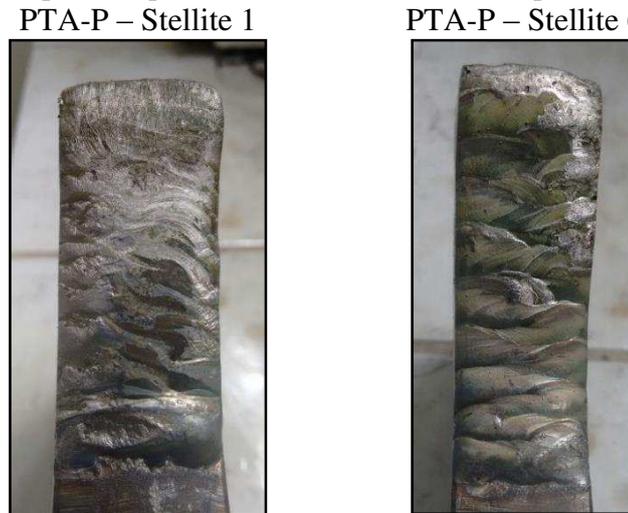
6.1 – Aspecto geral e geometria do cordão

A Figura 43 revela que a aparência superficial dos revestimentos é de boa qualidade. Foram observados cordões de solda contínuos e uniformes, sem a presença de trincas superficiais. No entanto, para o processo SMAW verificou-se a presença de alguns respingos e este fato pode ter sido ocasionado devido a umidade do eletrodo e/ou limpeza da área a ser soldada. O controle dos parâmetros de soldagem – excesso de corrente e distância do eletrodo a peça – também podem ter influenciado na presença de respingos, pois trata-se de um processo puramente manual. Para o processo PTA-P, os cordões são também de boa qualidade, exibindo um revestimento com maior uniformidade dimensional e sem a presença de porosidades e trincas. Estes resultados são semelhantes aqueles obtidos por D’Oliveira, Vilar e Feder (2002); Santos, Paredes; D’Oliveira (2003); Tigrinho (2005). A Figura 44 apresenta os martelos soldados pelo processo PTA-P.



(Fonte: Autoria própria).

Figura 44 – Aspecto superficial dos revestimentos depositados por PTA-P.



(Fonte: Autoria própria).

Na Tabela 14 estão apresentados dados referentes à geometria dos cordões, medidos em suas respectivas seções transversais para as amostras SMAW e PTA-P, e os desvios dimensionais encontrados para os depósitos revestidos com o processo SMAW e PTA-P. A largura do cordão, em todas as amostras, foi bastante uniforme. Este fato ocorreu devido a deposição do revestimento ter seguido exatamente a largura do martelo, que no caso é de 25 mm. Para as amostras soldadas com o processo SMAW, percebe-se os seguintes desvios padrão percentual: desvio padrão percentual de 2% para a largura dos cordões; de 18% para a profundidade dos cordões e de 26% para o reforço dos cordões. Para as amostras revestidas com o processo PTA-P, percebe-se os seguintes desvio padrão percentual: 2% para a largura dos cordões; 64% para a profundidade dos cordões e de 26% para o reforço dos cordões. Para ambos os processos, os resultados de penetração e reforço mostraram um desvio bastante acentuado. Este fato pode ter ocorrido devido a utilização de processos manuais, onde a operação fica muito susceptível a habilidade do soldador, sendo assim, é prudente que se tenha uma grande cautela na manutenção dos parâmetros de soldagem.

Tabela 14 – Dimensões médias da geometria do cordão para as amostras SWAW e PTA-P.

Ligas - Processo	Largura do cordão – W (mm)	Profundidade do cordão – D (mm)	Reforço do cordão – H (mm)
Stellite 1 - SMAW	25,32	0,74	2,37
Stellite 6 - SMAW	24,71	0,61	1,99
Stellite 21 - SMAW	25,57	0,51	3,31
Stellite 1 - PTA-P	24,31	0,13	3,52
Stellite 6 - PTA-P	25,03	0,35	5,13
Desvio padrão percentual para o processo SMAW	2%	18%	26%
Desvio padrão percentual para o processo PTA-P	2%	64%	26%

(Fonte: Autoria própria).

6.2 – Diluição

Segundo Tigrinho (2005), quanto maior a diluição, maiores serão as mudanças das propriedades do revestimento em relação ao especificado originalmente para o material de aporte. Geralmente o material do substrato é menos nobre que o material do revestimento, com relação às propriedades exigidas para a finalidade na qual ele está sendo aplicado, e, por isso, um maior nível de diluição significa deterioração das propriedades do revestimento.

A Tabela 15 resume os valores de diluição obtidos nos revestimentos para cada condição de consumível e processo de soldagem e também foram comparados com os valores de diluição obtidos por Foltran (2000). Os resultados obtidos para o processo SMAW, com Stellite 1 e 6, foram semelhantes aos valores encontrados por Foltran (2000). No entanto, para o processo PTA-P tais valores foram diferentes dos resultados obtidos por aquele autor. Este fato ocorreu devido a divergência dos parâmetros de soldagem utilizados nesta pesquisa e os que foram aplicados por Foltran (2000).

Tabela 15 – Resultados obtidos de diluição (%) para todas as condições testadas.

Liga - Processo	Região			*Diluição	**Diluição
	A	B	A + B	% d	% d
Stellite 1 - SMAW	22,87	12,20	35,07	35%	30,8%
Stellite 6 - SMAW	19,69	11,10	30,78	36%	27,9%
Stellite 21 - SMAW	17,87	7,37	25,24	29%	----
Stellite 1 - PTA-P	82,76	7,74	90,50	8,6%	4,8%
Stellite 6 - PTA-P	122,63	12,54	135,17	9,3%	6,9%

(Fonte: *Autoria própria e **Foltran, 2000).

Percebe-se uma diferença entre os resultados de diluição do processo SMAW quando comprado com o processo PTA-P. Ou seja, analisando os revestimentos com as ligas Stellite 1, 6 e 21 para o processo SMAW obteve-se uma diluição média de 33%. Enquanto que para o processo PTA-P e ligas Stellite 1 e 6 a média da diluição foi de apenas 9%. Este fato é totalmente esperado pois o processo PTA-P possui uma maior concentração de energia. Sendo assim, as altas temperaturas só chegam onde realmente é necessário, ocasionando, uma zona de fusão muito concentrada, favorecendo para uma menor diluição.

O processo de soldagem SMAW proporcionou valores de diluição bastante semelhantes mesmo quando se tem a variação das ligas, conforme observado na Tabela 15, sendo o mínimo valor de 29% e o máximo de 36%. Os depósitos executados com a liga Stellite 21 apresentou o menor valor de diluição, assim como uma menor profundidade do cordão de solda quando comparado com as demais ligas.

O processo de deposição por PTA-P proporcionou valores de diluição bastante semelhante, mesmo quando se tem a variação das ligas. Conforme indicado na Tabela 15, o mínimo valor foi de 8,6% e o máximo de 9,3%. A média dos valores de diluição obtidos para as ligas com o processo SMAW (33%) é 267% vezes superior à média obtida para o processo PTA-P (9%).

De acordo com Gomes, Henke e D'Oliveira (2012) e também Gholipour, Shamanian e Ashrafizadeh (2011), a diluição das ligas Stellite, ocasionada pela difusão do ferro, aumenta a tenacidade, reduz a dureza e também a resistência à corrosão em muitos ambientes corrosivos. Segundo Xiaojun (2002), grandes quantidades de ferro estão associadas a elevadas diluições. Tal fato também ocorreu nesta pesquisa. A camada de difusão de ferro foi medida do substrato até o revestimento. As medições foram efetuadas a partir de onde se percebeu o decréscimo na curva do espectro do ferro até atingir valores regulares (pequenas variações) deste elemento no espectro do revestimento. Verifica-se na Tabela 16 que existe uma relação direta entre a difusão

de ferro e a diluição, isto é, quanto maior os níveis de diluição maior foi a camada de difusão do ferro. Este fato ocorreu tanto para as amostras com SMAW quanto as depositadas pelo processo PTA-P. As Figuras 45, 46 e 47 revelam o espectro dos elementos químicos do substrato ao revestimento nas seguintes condições: Stellite 1–SMAW, Stellite 6–SMAW, Stellite 21–SMAW, respectivamente. Para as amostras PTA-P os resultados seguiram também a mesma análise das amostras com o processo SMAW, tendo para maiores valores de diluição uma elevação na camada de difusão do ferro. As Figuras 48 e 49 mostram a difusão do ferro ao longo do substrato até o revestimento para as condições Stellite 1 - PTA-P e Stellite 6, respectivamente.

Tabela 16 – Comparação entre os valores médios de diluição e a camada de difusão e ferro.

Liga-Processo	Diluição (%)	Camada de difusão do ferro (µm)
Stellite 1 – SMAW	35	110
Stellite 6 – SMAW	36	110
Stellite 21 – SMAW	29	80
Stellite 1 – PTA-P	8,6	50
Stellite 6 – PTA-P	9,3	80

(Fonte: A autoria própria).

Figura 45 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 1-SMAW.

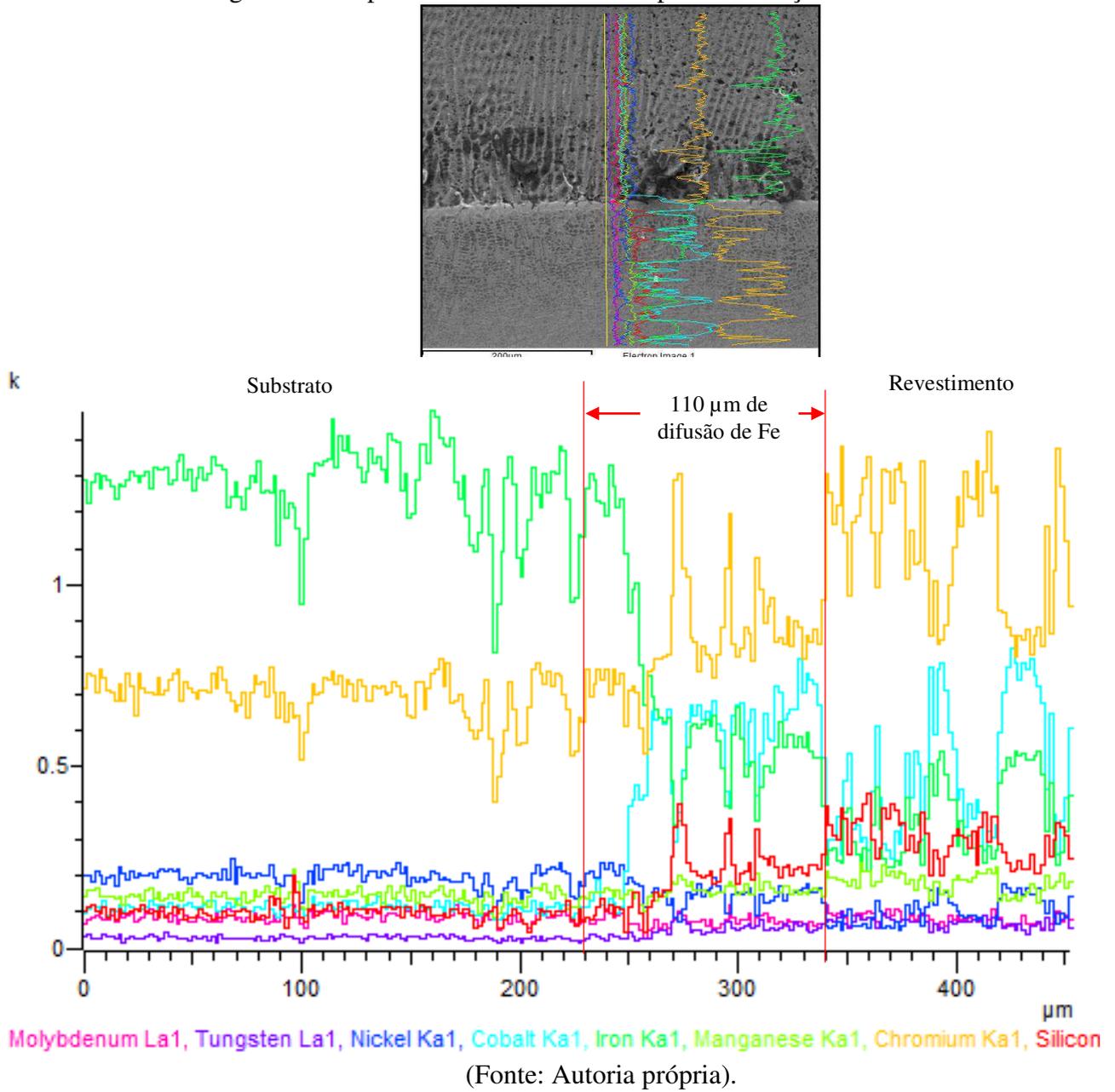
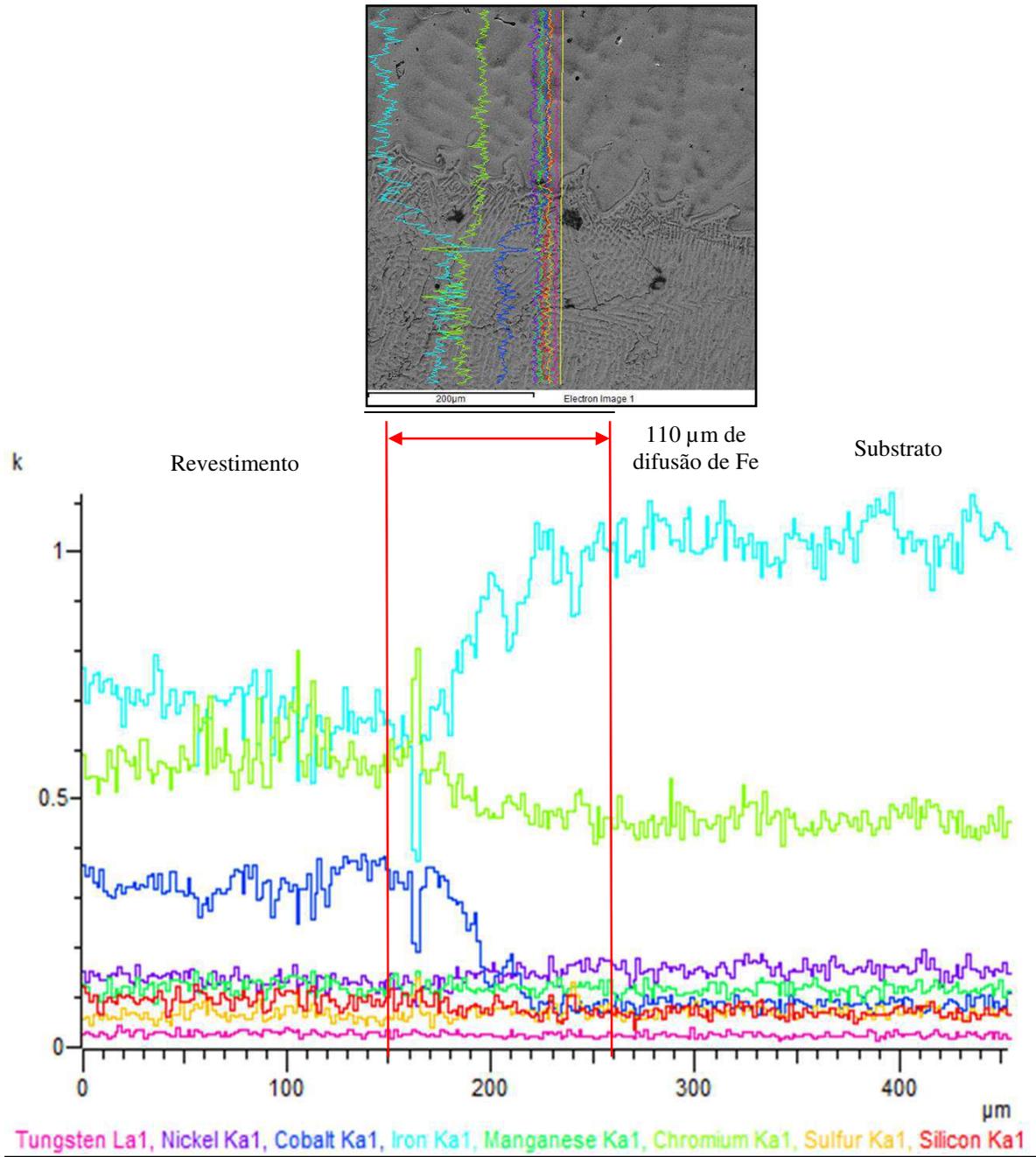
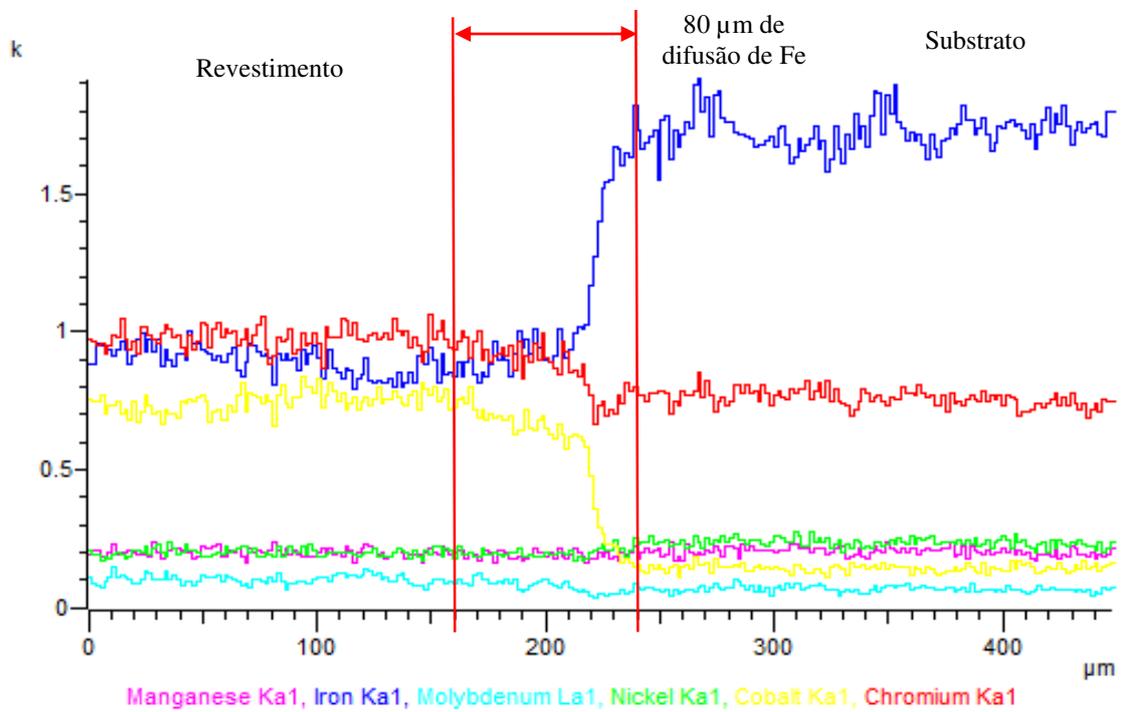
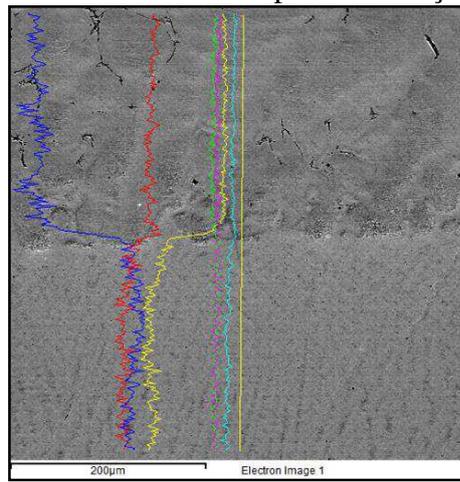


Figura 46 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 6-SMAW.



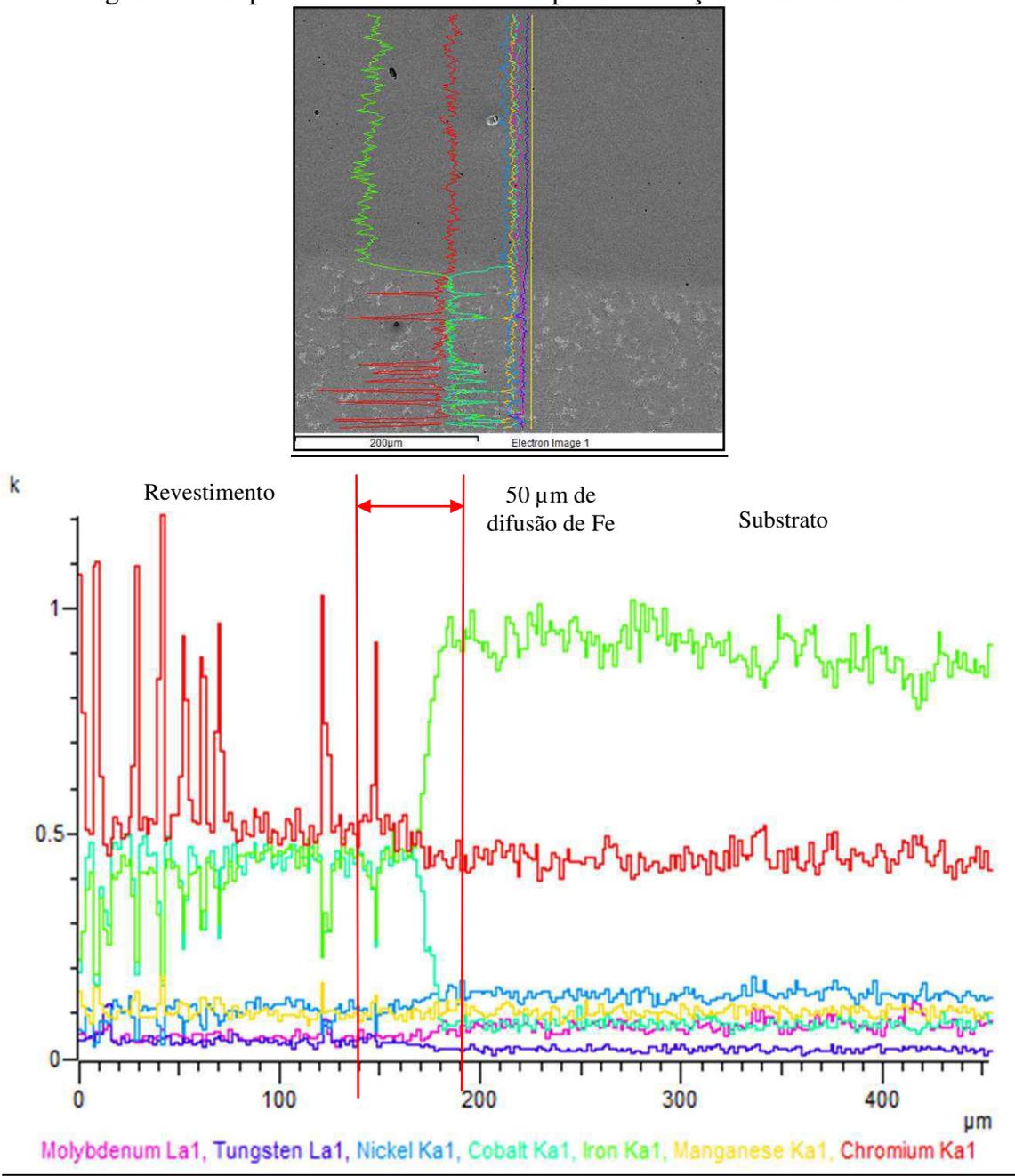
(Fonte: Autoria própria).

Figura 47 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 21-SMAW.



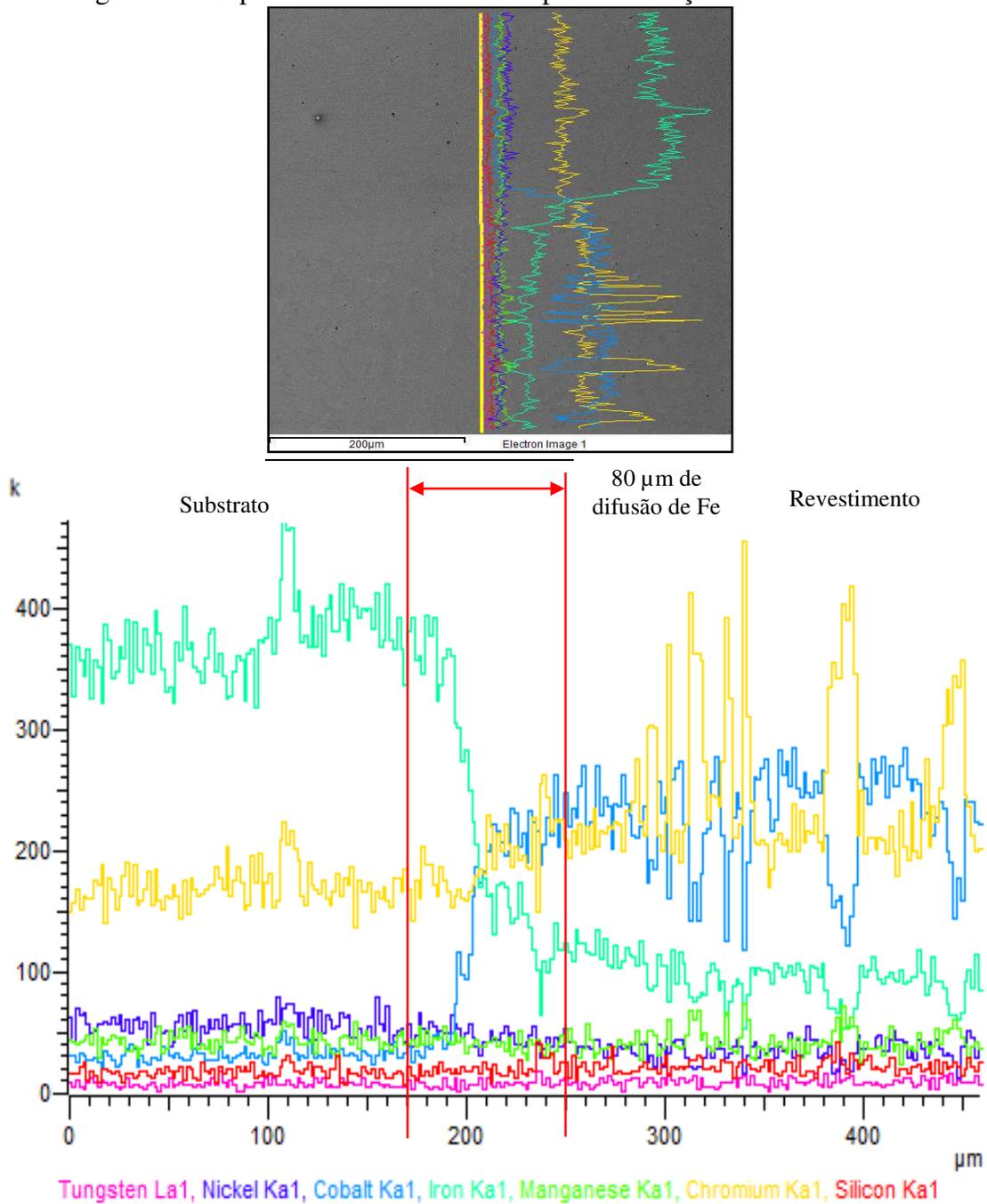
(Fonte: Autoria própria).

Figura 48 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 1-PTA-P.



(Fonte: Autoria própria).

Figura 49 – Espectro da difusão do ferro para a condição Stellite 6-PTA-P.



(Fonte: Autoria própria).

6.3 – Perfil de microdureza

Os valores de dureza de um revestimento é função de sua microestrutura e de sua composição química, sendo estas dependentes dos parâmetros do processo de soldagem, uma vez que estes afetam a taxa de solidificação e o nível de diluição (BLAU, 1992).

A Figura 50 revela o perfil de microdureza levantado para cada depósito. A interpretação deste gráfico auxiliará a identificar como variam as propriedades do revestimento ao longo da sua seção transversal para cada tipo de liga e processo de soldagem. Como existe uma grande variação na geometria do cordão, o número de impressões sobre cada camada variou entre 20 a 25 indentações.

Observa-se que, os perfis de microdureza permanecem constante até uma certa distância da extremidade. Na sequência, inicia-se um decréscimo até atingir a região de interface, onde os valores caem bruscamente até alcançar uma região mista (revestimento e substrato). Após o fim da interface percebe-se uma região mais homogênea (substrato) e sem grandes variações de dureza. As consequências geradas na região de interface, tais como variações no tamanho dos grãos e na microestrutura estão fortemente interligadas a composição química dos materiais e também aos parâmetros do processo de soldagem utilizados. A Tabela 17 mostra os valores médios de microdureza para os revestimentos realizados nesta pesquisa e também a comparação com os valores obtidos por Foltran (2000).

Conforme esperado, percebe-se uma maior média de dureza para os revestimentos soldados com a liga Stellite 1, seguida da liga Stellite 6, e por fim, a menor média de dureza encontrada foi para os depósitos executados com a liga Stellite 21. A dureza das ligas da Stellite é predominantemente oriunda de carbonetos dispersos em uma solução sólida menos dura. Sendo assim, as ligas com maiores teores de C proporcionam os maiores valores de dureza, conforme pode ser confirmado. A dureza das ligas também está relacionada com a cinética de solidificação e da extensão da diluição do metal-base (ANTONY, 1983).

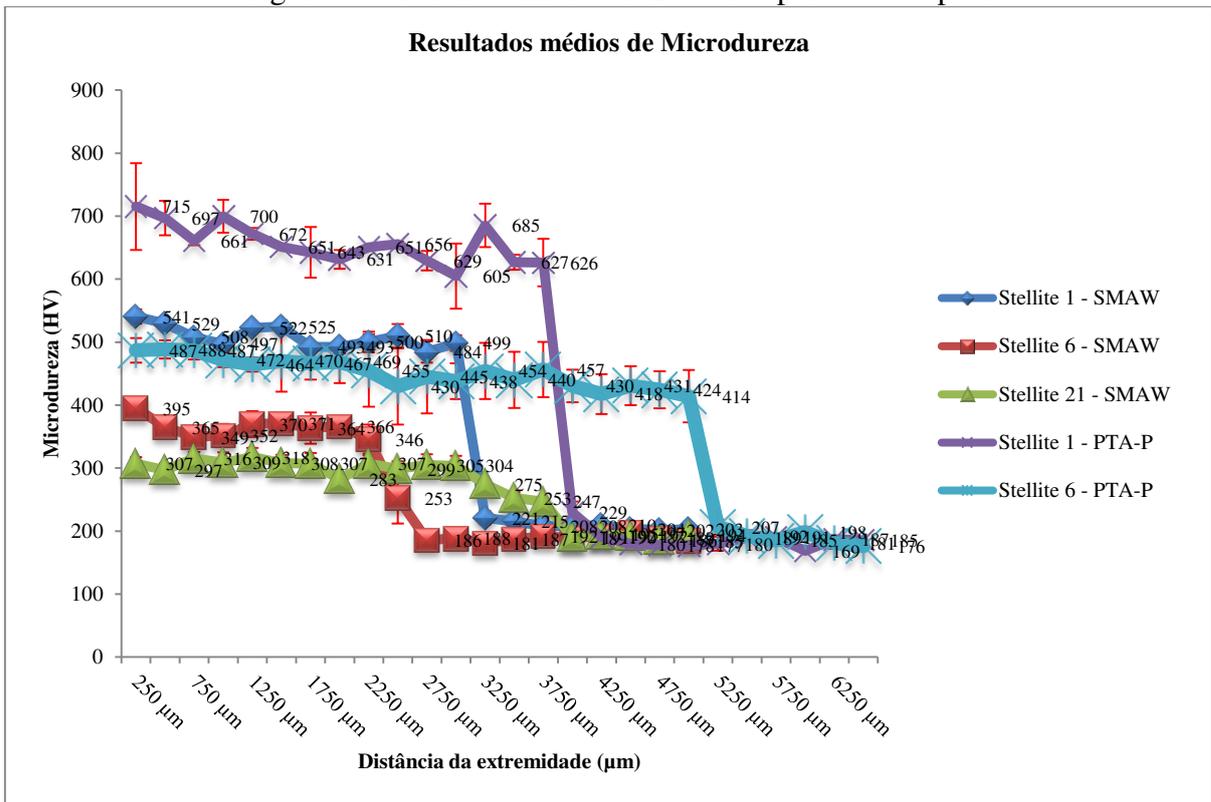
As ligas soldadas pelo processo PTA-P resultaram uma maior média de dureza quando comparada com as ligas soldadas por SMAW. Este fato se justifica pois a diluição média no processo SMAW foi 3,7 vezes maior do que a média de diluição para o processo PTA-P. Uma outra justificativa pode ser atribuída a maior taxa de resfriamento do processo PTA-P quando comparado com o processo SMAW, ou seja, quando se tem uma maior velocidade de resfriamento há uma menor difusão de ferro e também de outros elementos que favorecem no aumento da diluição.

Tabela 17 – Valores médios de microdureza dos revestimentos.

Liga-Processo	*Microdureza (HV)	**Microdureza (HV)
Stellite 1 – SMAW	508	566
Stellite 6 – SMAW	364	370
Stellite 21 – SMAW	305	-
Stellite 1 – PTA-P	657	707
Stellite 6 – PTA-P	452	460

(Fonte: *Autoria própria e **Foltran, 2000).

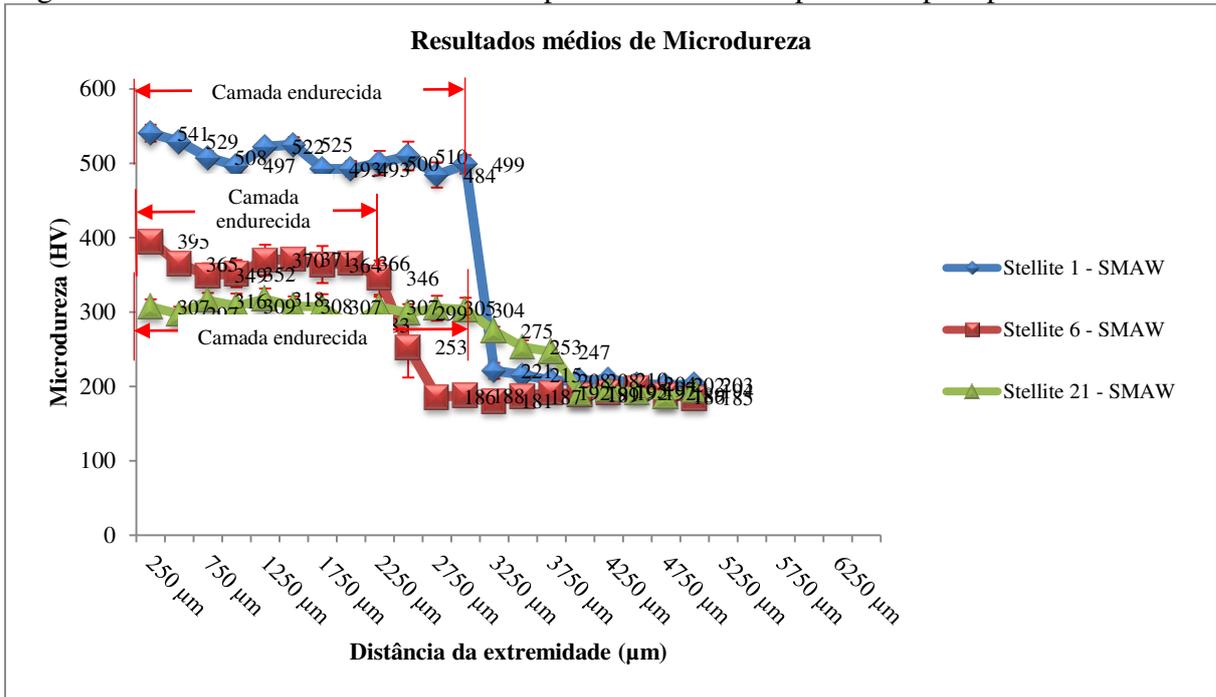
Figura 50 – Perfil de microdureza obtido para cada depósito.



(Fonte: Autoria própria).

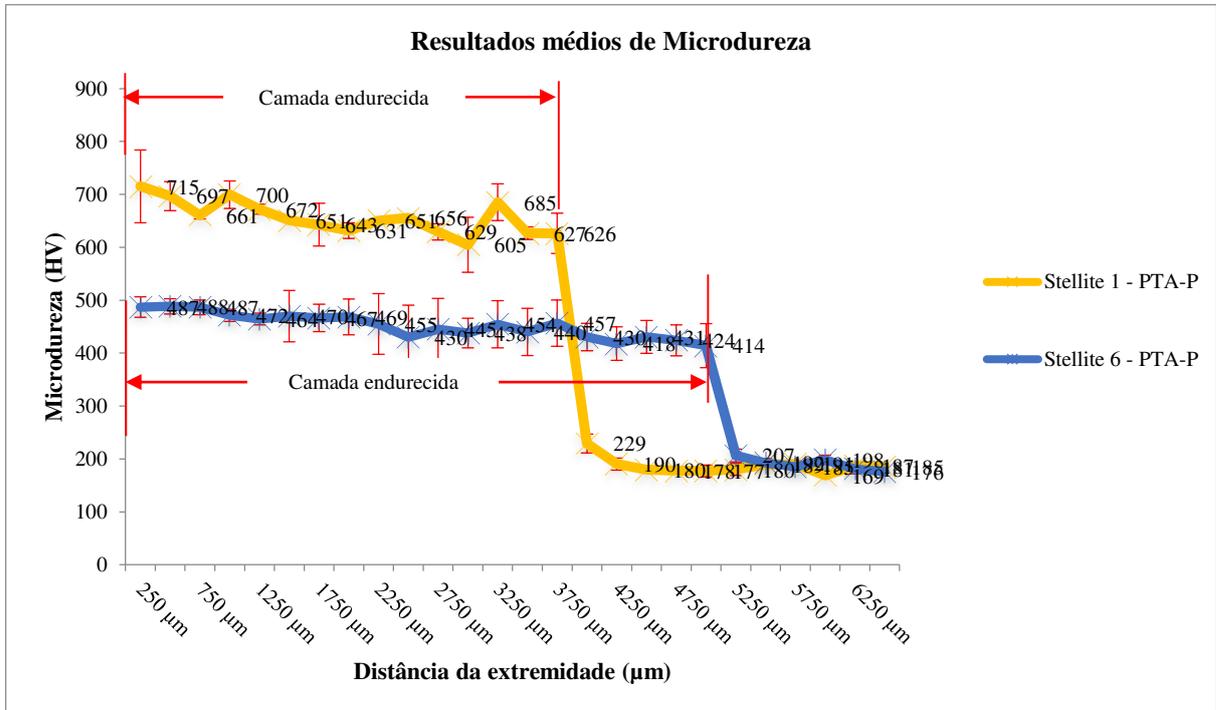
Para as amostras depositadas pelo processo SMAW e PTA-P percebe-se, da análise dos gráficos das Figuras 51 e 52 que existe uma relação entre a camada endurecida (distância da extremidade até a interface) e os resultados obtidos pelas medidas do reforço do cordão (perfil geométrico do cordão). A Tabelas 18 e 19 mostram a comparação destes resultados para as amostras SMAW e PTA-P, respectivamente.

Figura 51 – Perfil de microdureza obtido para as amostras depositadas pelo processo SMAW.



(Fonte: Autoria própria).

Figura 52 – Perfil de microdureza obtido para as amostras depositadas pelo processo PTA-P.



(Fonte: Autoria própria).

Tabela 18 – Comparação entre os valores médios do reforço do cordão e camada endurecida para as amostras do processo SMAW.

Liga-Processo	Reforço do cordão	Camada endurecida
Stellite 1 - SMAW	2,37 mm	3,00 mm
Stellite 6 - SMAW	1,99 mm	2,25 mm
Stellite 21 - SMAW	3,31 mm	3,00 mm

(Fonte: Autoria própria).

Tabela 19 – Comparação entre os valores médios do reforço do cordão e camada endurecida para as amostras do processo PTA-P.

Liga-Processo	Reforço do cordão	Camada endurecida
Stellite 1 – PTA-P	3,52 mm	3,75 mm
Stellite 6 – PTA-P	5,13 mm	5,00 mm

(Fonte: Autoria própria).

6.4 – Caracterização microestrutural

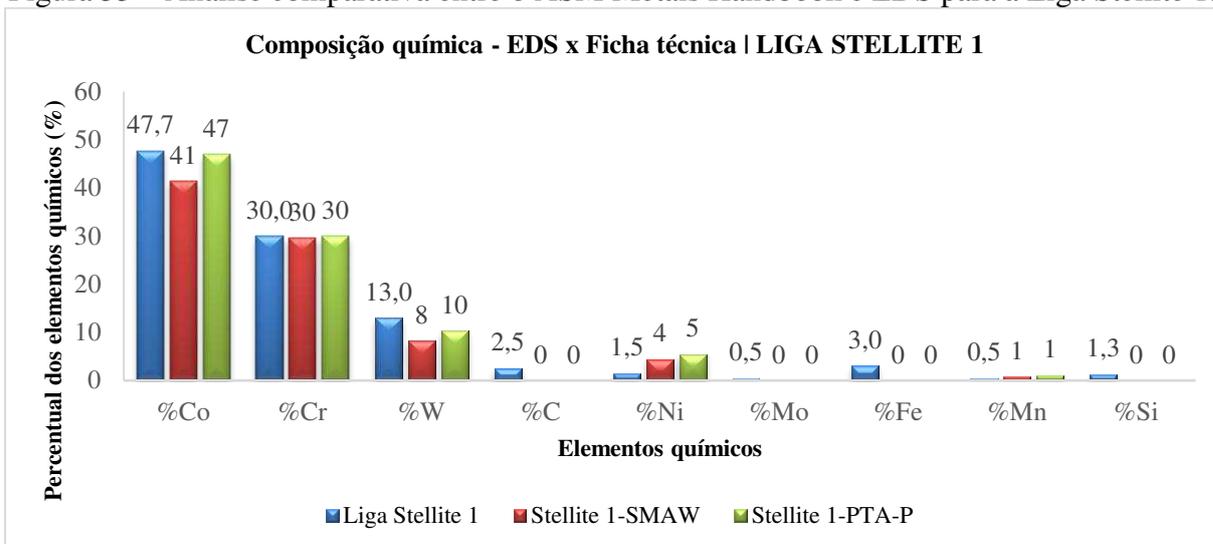
6.4.1 – Avaliação da composição química dos revestimentos

O gráfico da Figura 53 apresenta uma análise comparativa da composição química do revestimento da liga Stellite 1 obtida por EDS (amostras do metal de solda) com a fornecida pela ASM METALS HANDBOOK (1990). Percebe-se que os percentuais dos elementos químicos são bastante semelhantes. Neste caso apenas o carbono não foi possível analisar, pois a emissão dos dez primeiros elementos de baixo número atômico consiste de bandas na região de baixa energia, onde as perdas por absorção são grandes (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Uma análise análoga pode ser realizada observando-se os gráficos das Figuras 54 e 55, onde o estudo foi realizado considerando as ligas Stellite 6 e 21 respectivamente, ou seja, os resultados dos elementos químicos mais latentes (Cobalto, Cromo e Tungstênio) são convergentes com os valores encontrados no ASM METALS HANDBOOK (1990). No entanto, em ambas as ligas Stellite percebe-se uma modificação na concentração dos elementos de menor composição química, tais como o Ni e Mo. Este fato é também justificável, pois para elementos de baixa concentração o EDS não tem uma boa precisão.

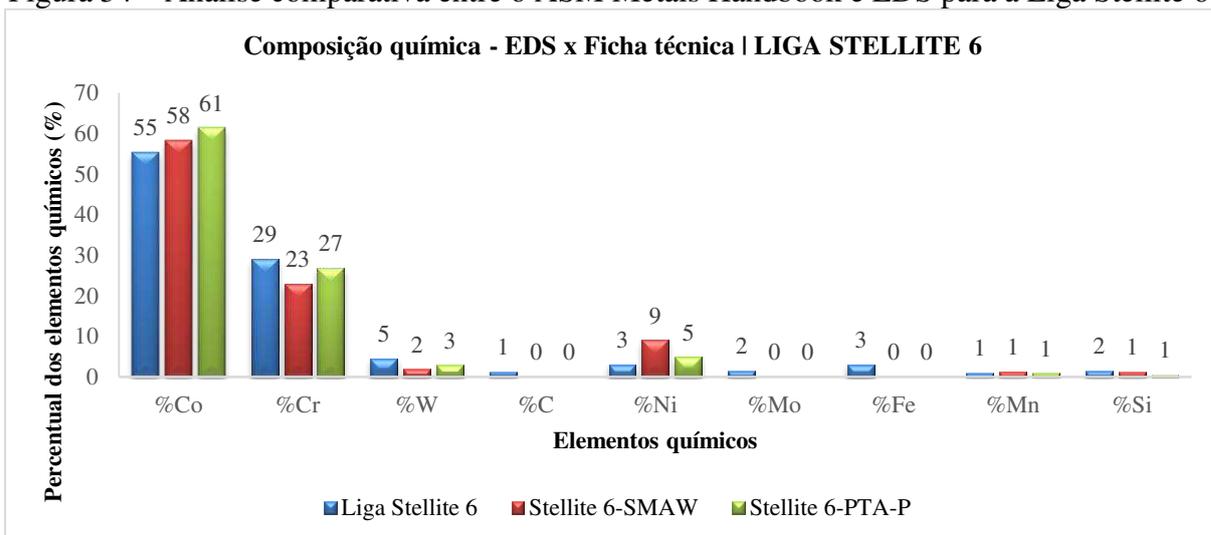
Apesar da empresa que realizou a aplicação do revestimento ter evidenciado os materiais e os equipamentos que foram utilizados nesta pesquisa. Os resultados comprovam que as ligas especificadas, de fato, foram utilizadas para a deposição do revestimento no substrato.

Figura 53 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para a Liga Stellite 1.



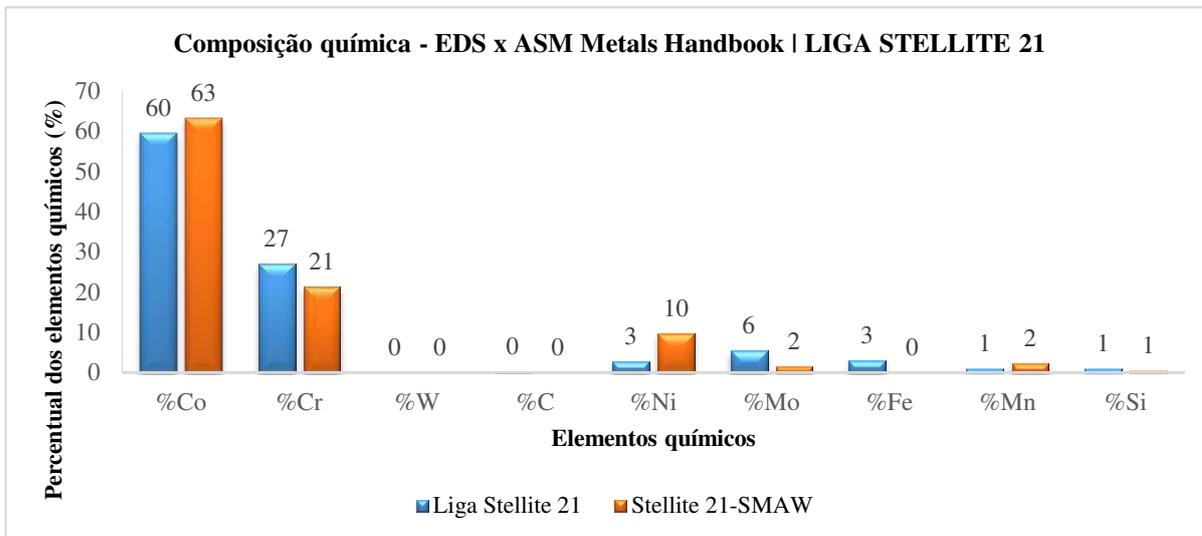
(Fonte: Autoria própria).

Figura 54 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para a Liga Stellite 6.



(Fonte: Autoria própria).

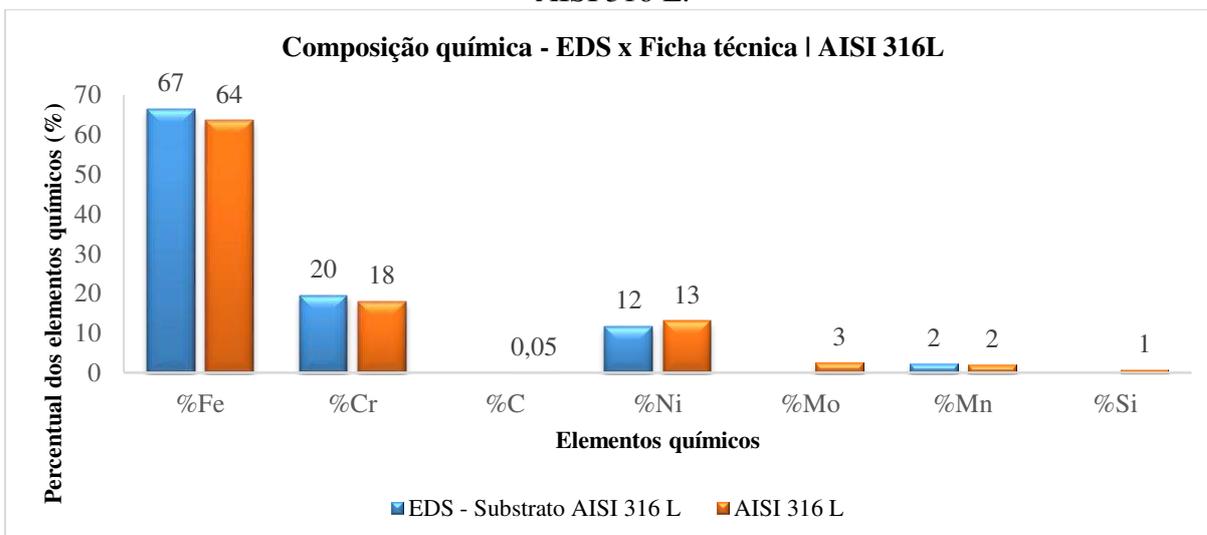
Figura 55 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para a Liga Stellite 21.



(Fonte: Autoria própria).

O gráfico da Figura 56 mostra os valores obtidos para a composição química do substrato, analisado também por EDS, quando comparado com os valores segundo ASM METALS HANDBOOK (1990). Sendo assim, percebe-se que a variação é bastante pequena entre os valores obtidos pelo EDS quando comparados com a ficha técnica do aço AISI 316 L. O que leva a crer que o substrato utilizado foi de fato o mesmo especificado para o projeto dos martelos trituradores.

Figura 56 – Análise comparativa entre o ASM Metals Handbook e EDS para o aço inoxidável AISI 316 L.



(Fonte: Autoria própria).

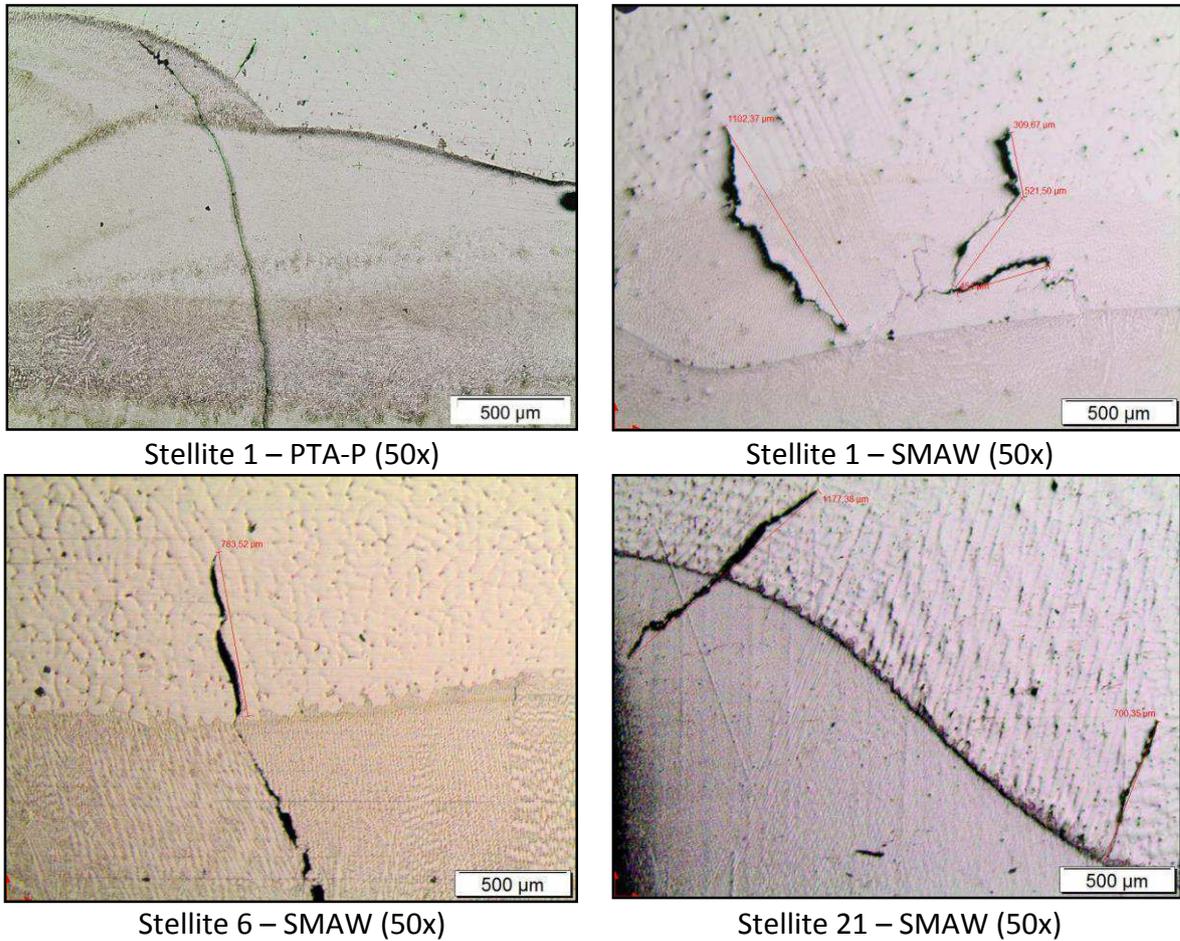
6.4.2 – Avaliação de defeitos de soldagem

Segundo Wainer (1992) as trincas de contração são causadas devido à baixa ductilidade ou, às vezes, ao baixo limite de escoamento do revestimento. Estas trincas podem propagar-se com trabalhos mecânicos para contornar as distorções. No entanto, tais descontinuidades não inviabilizam a aplicação do recobrimento, desde que, não se propague para o metal de base, e conseqüentemente, ocasione o destacamento do revestimento. Porém tais descontinuidades prejudicam a viabilidade da aplicação quando se deseja realizar a trituração de sucata de baterias, pois de acordo com o impacto do martelo na bateria, tais trincas podem propagar facilmente e ocasionar ineficiência ao processo de trituração devido o destacamento do revestimento.

As trincas de contração foram evidenciadas em todas as condições analisadas por microscopia óptica, exceto na condição Stellite 6 – PTA-P. Tais defeitos também estiveram presente nas pesquisas de Lin e Chen (2006) e também de Gholipour, Shamanian e Ashrafizadeh (2011). No entanto, não é possível afirmar que tais descontinuidades não estiveram presente em todas as amostras testadas em campo, pois houveram duas amostras com a condição Stellite 6 – PTA-P que apresentaram destacamento de uma parte do revestimento, entende-se que possivelmente este destacamento pode estar fortemente vinculado as trincas de contração. A Figura 57 ilustra as fotos das trincas em cada condição testada, este defeito de soldagem preocupa bastante a aplicação em soldas de recobrimento, já que, nesta pesquisa obteve-se 33% das amostras com uma parte do seu revestimento destacado.

Segundo Lin e Chen (2006) as trincas de contração são oriundas das tensões residuais devido a contração durante a etapa de solidificação, ou seja, as soldas de revestimento possuem coeficientes de expansão térmica diferentes entre o material a ser aplicado e o substrato, ocasionando assim tensões residuais. Todavia, é possível minimizar bastante o surgimento de trincas de contração efetuando um preaquecimento a uma temperatura de 50-150 °C seguido de um resfriamento lento (GENERAL GUIDELINES, 2007).

Figura 57 – Trincas de contração aparente nas seguintes condições testadas: Stellite 1 – PTA-P; Stellite 1 – SMAW; Stellite 6 – SMAW e Stellite 21 – SMAW.



(Fonte: Autoria própria).

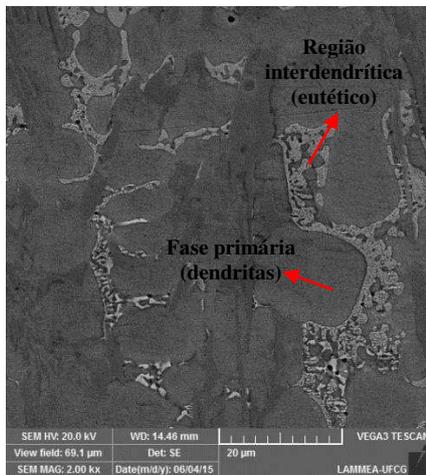
6.4.3 – Avaliação microestrutural

As microestruturas observadas através do microscópio eletrônico de varredura revelaram estruturas típicas de solidificação. A Figura 58 apresenta a micrografia para cada condição testada. Observa-se em todas as amostras dendritas primárias compostas por uma matriz rica em Co, circundadas pelo eutético, constituído de uma matriz rica em Co intercalada com carbonetos nas regiões interdendríticas. As ligas Stellite 1 e 6 diferem da liga Stellite 21 pois são originadas de uma composição quartenária a base de Co-C-W-Cr, com teor de carbono de 2,4% para a liga Stellite 1 e 1,2% para a liga Stellite 6, sendo assim, percebe-se uma ampla região de formação de carbonetos complexos quando comparada com a liga Stellite 21 que só possui 0,25 % de C.

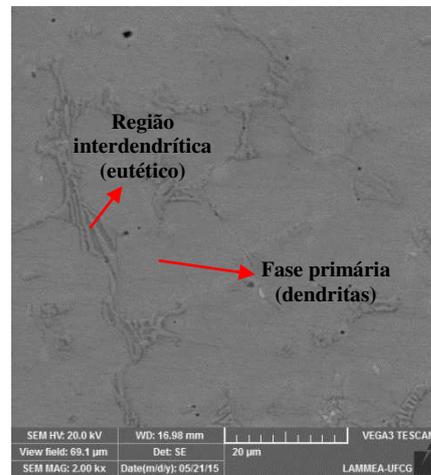
A liga Stellite 21 é composta por uma composição básica de Co-Cr-Mo, ou seja, no caso desta liga há uma substituição do tungstênio pelo molibidênio, quando comparada com as ligas

Stellite 1 e 6. Devido a sua liga ternária o elemento Mo é utilizado e não o W, neste caso tem-se um maior resistência a ambientes complexos, por exemplo: ácido sulfúrico, clorídrico ácido e gás ácido do que as ligas CoCrW, como Stellite 6 (DELORO STELLITE, 2015).

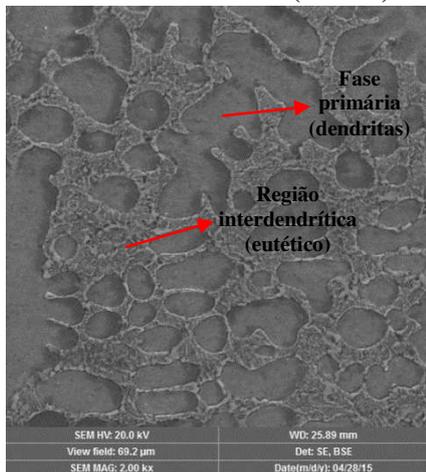
Figura 58 – Micrografia observada através do MEV para as seguintes condições testadas: Stellite 1 – PTA-P; Stellite 6 – PTA-P; Stellite 1 – SMAW; Stellite 6 - SMAW e Stellite 21 – SMAW.



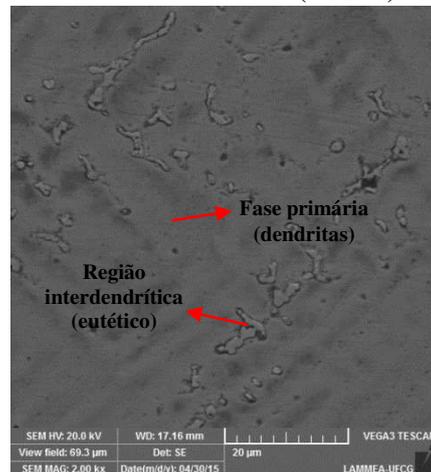
Stellite 1 – PTA-P (2000x)



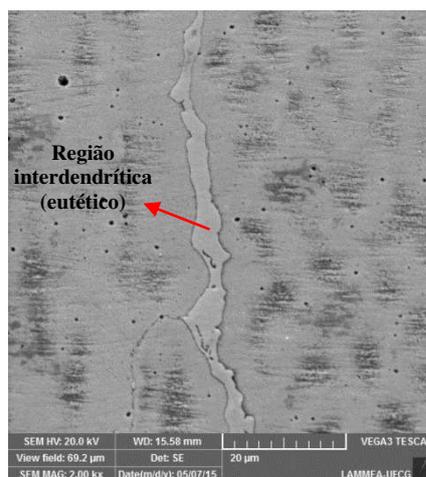
Stellite 6 – PTA-P (2000x)



Stellite 1 – SMAW (2000x)



Stellite 6 – SMAW (2000x)

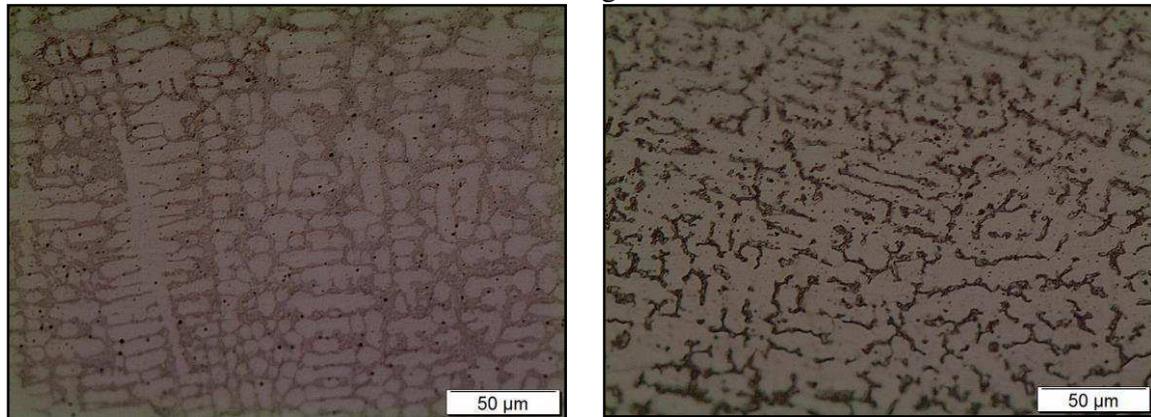


Stellite 21 – SMAW (2000x)

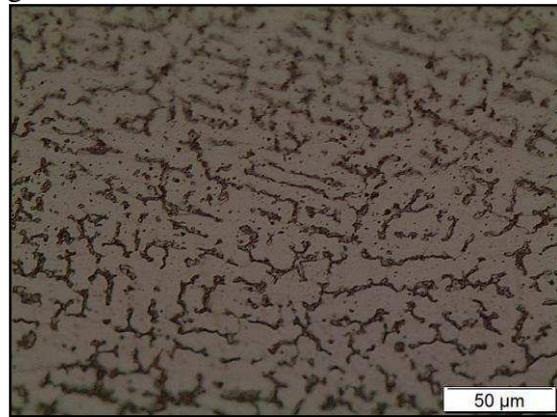
(Fonte: Autoria própria).

A microestrutura e propriedades mecânicas dos revestimentos duros são fortemente influenciadas pela diluição, bem como pela cinética de solidificação (FOLTRAN, 2000). Analisando a Figura 59 através do microscópio óptico, percebe-se uma microestrutura mais refinada para as amostras soldadas pelo processo PTA-P. Este fato ocorreu devido à alta velocidade de solidificação obtida pelo processo PTA-P, isto é, para maiores velocidades de solidificação obtém-se uma maior taxa de nucleação, e conseqüentemente, grãos e microestrutura mais fina.

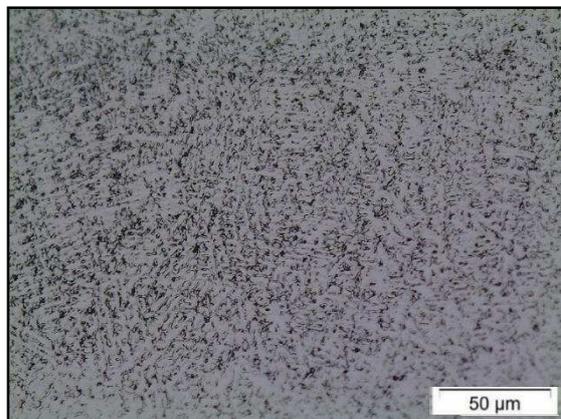
Figura 59 – Micrografias das condições testadas evidenciando os tipos de liga e processo de soldagem.



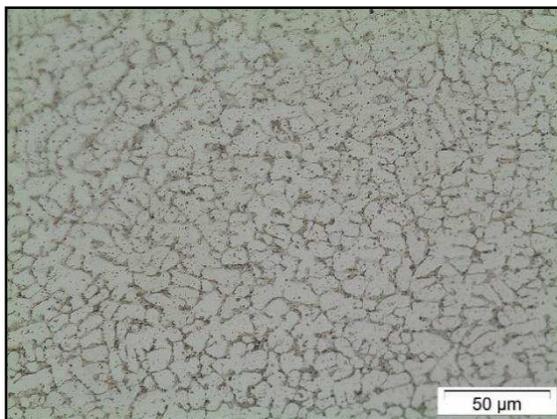
Stellite 1 – SMAW (500x)



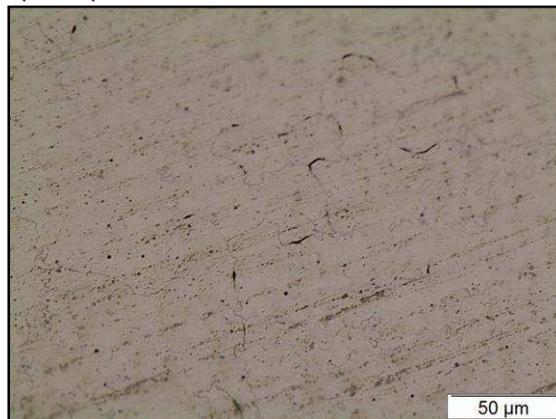
Stellite 6 – SMAW (500x)



Stellite 1 – PTA-P (500x)



Stellite 6 – PTA-P (500x)



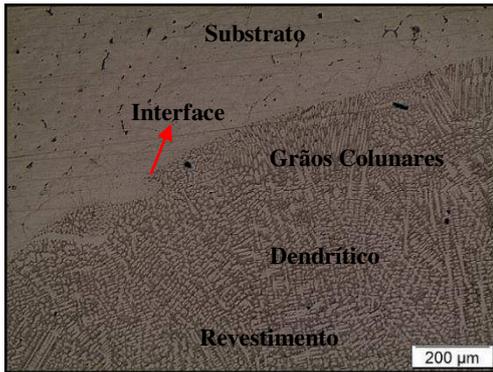
Stellite 21 – SMAW (500x)

(Fonte: Autoria própria).

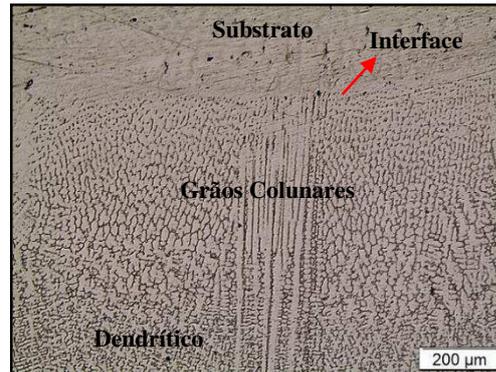
A Figura 60 ilustra as fotografias realizadas próximo a região de interface substrato-revestimento, percebe-se para as condições Stellite 1 – SMAW e Stellite 6 – SMAW uma região de grãos colunares, e na sequência, um crescimento dendrítico. No entanto, para as amostras soldadas pelo processo PTA-P não é perceptível a região de grãos colunares, ou seja, devido à cinética de solidificação mais acelerada (maior taxa de solidificação) para este processo, obtém-

se um crescimento dendrítico mais prematuro junto a interface, ou seja, o processo PTA-P é favorecido pela alta concentração de energia, bem como pelo baixo gradiente térmico, sendo assim, a temperatura na frente de solidificação é menor do que a temperatura de fusão da liga, favorecendo assim, o super resfriamento constitucional.

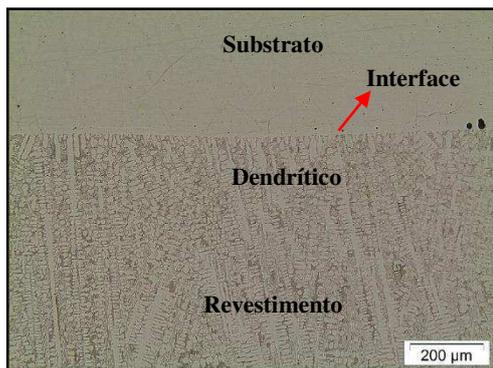
Figura 60 – Micrografias das condições testadas evidenciando as regiões presentes próximo a interface substrato-revestimento.



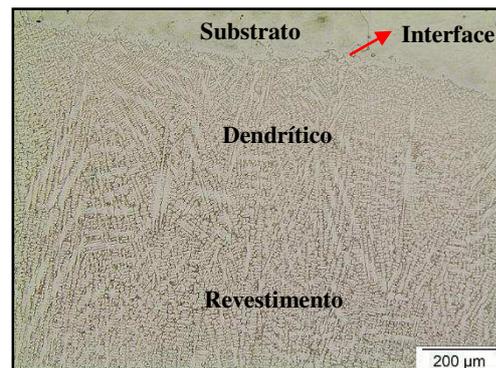
Stellite 1 – SMAW (100x)



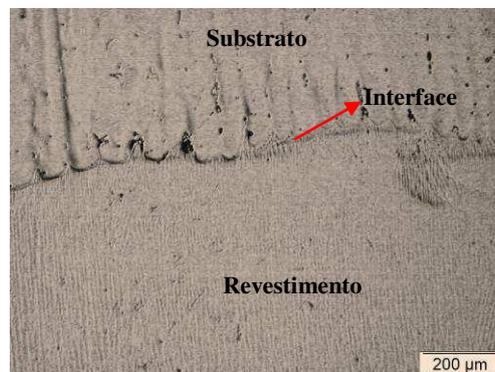
Stellite 6 – SMAW (100x)



Stellite 1 – PTA-P (100x)



Stellite 6 – PTA-P (100x)



Stellite 21 – SMAW (100x)

(Fonte: Autoria própria).

6.5 – Resistência ao desgaste

Os resultados da perda de massa obtido das 5 amostras revestidas com cada condição de consumível e processo de soldagem estão apresentados na Tabela 20. Percebe-se, que os revestimentos realizados com Stellite 6 – PTA-P obtiveram o melhor resultado para a redução da perda de massa (menor perda de massa – 180 g), seguidos pelos revestimentos feitos com Stellite 1 – SMAW e Stellite 6 – SMAW (ambos com perda de massa – 212 g), na sequência, o revestimento Stellite 21 – SMAW (perda de massa – 217 g). O pior resultado foi apresentado no revestimento Stellite 1 – PTA-P (perda de massa – 255 g). A Tabela 21 evidencia os resultados obtidos da redução percentual da perda de massa em relação a condição neutra, ou seja, sem aplicação de revestimento duro. Neste caso quanto maior a redução percentual de massa, melhor é a condição testada, ou seja, para maiores valores da redução percentual há uma diminuição na perda de massa, e conseqüentemente, a condição avaliada se torna mais eficiente.

Tabela 20 – Resultados da perda de massa para cada condição de liga e processo de soldagem.

Ligas - Processo	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Varição (g)
Stellite 1 – SMAW	4926	4713	212
Stellite 6 – SMAW	4824	4612	212
Stellite 21 – SMAW	4884	4666	217
Stellite 1 – PTA-P	4911	4656	255
Stellite 6 – PTA-P	5012	4832	180
AISI 316L	4765	4486	279

(Fonte: Autoria própria).

Tabela 21 – Resultados percentuais da redução da perda de massa para cada condição de liga e processo de soldagem.

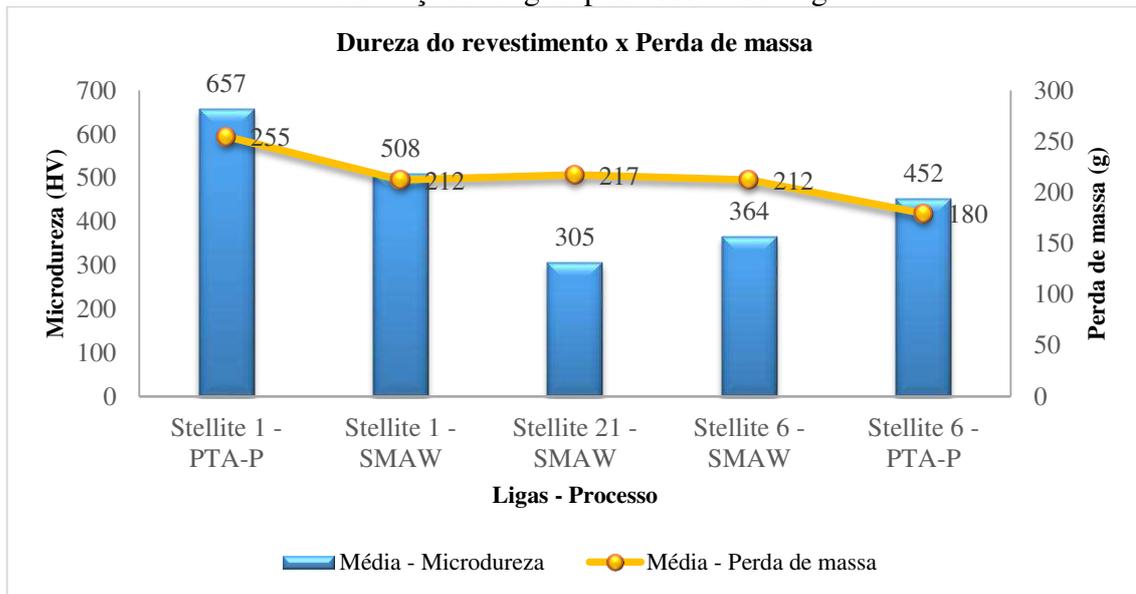
Ligas - Processo	Redução percentual de massa
Stellite 1 - SMAW	24%
Stellite 6 - SMAW	24%
Stellite 21 - SMAW	22%
Stellite 1 - PTA-P	9%
Stellite 6 - PTA-P	36%

(Fonte: Autoria própria).

O gráfico da Figura 61 compara os resultados obtidos de microdureza do revestimento e as respectivas perdas de massa para cada condição. O gráfico foi construído com os valores médios de microdureza na camada revestida para cada liga e o processo de soldagem avaliados

nesta pesquisa. Percebe-se que o aumento da dureza, aparentemente, provocou uma maior perda de massa, ou seja, a liga Stellite 1 com maiores valores de dureza, apresentou maiores valores de perda de massa também. Já os revestimentos depositados com a liga Stellite 6, com valores médios de dureza inferiores obteve menor perda de massa. No caso dos depósitos feitos com a liga Stellite 21 pelo processo SMAW, obteve-se a menor média de dureza, porém sua perda de massa foi praticamente idêntica a liga Stellite 6 pelo mesmo processo de deposição. Estes resultados são totalmente aceitáveis pois o mecanismo de desgaste da pesquisa em questão é impacto/martelamento, sendo assim, o aumento da dureza – para as ligas de cobalto – irá aumentar a resistência ao desgaste por abrasão, porém como o mecanismo de desgaste para martelos trituradores é por impacto o aumento da dureza proporciona uma queda na tenacidade, favorecendo para uma menor resistência com relação à esta propriedade. Este fato pode ser evidenciado mediante os resultados apresentados na Tabela 22, que mostra a quantidade de martelos, para cada condição de liga e processo de soldagem, que obteve uma parte da superfície de impacto destacada após o ensaio de campo. Percebe-se então que 33% das amostras revestidas tiveram uma parte da superfície de impacto destacada, ou seja, 13 amostras de um total de 40 revestidas apresentaram destacamento de uma parte do revestimento. A liga Stellite 1 obteve a maior parcela de contribuição para o destacamento do revestimento, isto é, das 13 amostras destacadas obteve-se 9 amostras com remoção de uma parte do revestimento, ocasionando assim, 69% das amostras destacadas. Já no caso da liga Stellite 6 o percentual de destacamento foi de 23% e para a liga Stellite 21 essa relação foi de 7,7%. Como já foi descrito anteriormente no tópico de “Avaliação microestrutural” e também evidenciado pela Figura 64, percebe-se que um maior refino da microestrutura apresentada pela amostra Stellite 6 – PTA-P, colaborou para uma maior tenacidade, e conseqüentemente, uma maior resistência ao desgaste por impacto. A mesma analogia não pode ser feita para a amostra Stellite 1 – PTA-P, pois neste caso, apesar da microestrutura mais refinada quando comparada com a condição Stellite 1 – SMAW, a dureza elevada desta condição testada – influenciada pela baixa diluição – resultou numa amostra de alta dureza superficial, porém com baixa tenacidade, prejudicando assim a aplicação para martelos trituradores de baterias. Além disso, percebe-se também através da Tabela 22 que as amostras com a condição Stellite 1 – PTA-P apresentaram uma maior quantidade de martelos com o revestimento destacado, sendo assim, esta condição se torna desfavorável para a aplicação na qual necessita de alta resistência ao impacto.

Figura 61 – Gráfico comparativo entre a microdureza do revestimento e a perda de massa para cada condição de liga e processo de soldagem.



(Fonte: Autoria própria).

Tabela 22 – Resultados do destacamento do revestimento para cada condição de liga e processo de soldagem.

Ligas - Processo	Quantidade	Percentual de destacamento
Stellite 1 - SMAW	3	23,08%
Stellite 6 - SMAW	1	7,69%
Stellite 21 - SMAW	1	7,69%
Stellite 1 - PTA-P	6	46,15%
Stellite 6 - PTA	2	15,38%
Total de amostras destacadas	13	
Total de amostras revestidas	40	
Percentual de destacamento total		33%

(Fonte: Autoria própria).

A Figura 62 ilustra algumas amostras que tiveram sua superfície de revestimento destacada após o ensaio de campo.

Figura 62 – Imagens de algumas amostras com a presença de destacamento do revestimento.



Stellite 1 – PTA-P (corpo de prova H)



Stellite 1 – PTA-P (corpo de prova A)

(Fonte: Autoria própria).

7.0 – CONCLUSÕES

A realização desta pesquisa permitiu concluir que:

- Para as condições testadas, os revestimentos que apresentaram os melhores valores de resistência ao desgaste, ou seja, com menor perda de massa, foram aqueles depositados com liga Stellite 6 utilizando o processo PTA-P;
- 33% dos martelos amostras apresentaram destacamento de uma parte do revestimento, e deste total, 69% ocorreu para os martelos revestidos com a liga Stellite 1 de maior dureza, demonstrando assim a limitação dos valores desta propriedade em aplicações em que se necessita de resistência ao impacto;
- A ausência de um preaquecimento influenciou fortemente para o surgimento de trincas, e conseqüentemente, para o destacamento das amostras;
- A dureza média da camada revestida foi maior para as amostras testadas com PTA-P, pois a diluição média no processo SMAW foi 3,7 vezes maior do que a média de diluição para o processo PTA-P;
- A diluição apresentada pelos depósitos executados pelo processo SMAW foi 267% maior do que aquelas depositadas pelo processo PTA-P demonstrando assim a maior eficiência de fusão deste processo;
- Todas as amostras apresentaram microestruturas constituídas de dendritas primárias compostas por uma matriz rica em Co, circundadas pelo eutético constituído destas mesmas fases com maior presença de carbonetos nas ligas com maiores teores de C (Stellite 1 e 6);
- A camada de difusão do ferro nos revestimentos apresentou-se diretamente proporcional ao nível de diluição obtido.

8.0 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Com o objetivo de avaliar possíveis melhorias na resistência ao desgaste dos martelos trituradores, propõe-se aplicar multicamadas do revestimento a fim de analisar a influência da quantidade de material depositado, bem como para minimizar o percentual de diluição;
- Realizar corpos de prova com a liga Stellite 6 - já que a mesma resultou melhores valores de resistência ao desgaste - porém neste caso modificando os parâmetros de soldagem a fim de estudar a influência dos mesmos na redução da perda de massa;
- Realizar um preaquecimento (50-150°C) a fim de minimizar as trincas de contração, e consequentemente, o destacamento dos revestimentos;
- As ligas a base de cobalto são de grande versatilidade, porém possui custo elevado, sendo assim, recomenda-se o desenvolvimento de ligas que apresentem boa resistência ao impacto e menos onerosa do que as ligas Stellite;
- Realizar teste de campo com as mesmas condições e mesmas ligas por um período mais prolongado de operação.

9.0 – REFERÊNCIAS

ABNT - **Materiais Metálicos - Determinação da Dureza Vickers (Método de Ensaio)**. [S.I.]: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1981. NBR 6672/81.

ANTONY, K.C. Wear Resistant Cobalt Base Alloys. **Journal of Metals** 35. Fevereiro de 1983. 52 p.

ASM METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section: Publication Information and Contributors**. Volume 1, 1990.

BAPTISTA, A. L. B.; NASCIMENTO, I. A. **Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: Spectru Instrumental Científico. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/soldadesgaste.pdf>>. Acesso em: 10/11/2012.

BLAU, P.J. **Microindentation hardness testing**. In: **Friction, Lubrification and Wear Technology**, v. 18, ASM handbook, ASM Internacional, 1992. p. 787-796.

BRACARENSE, A. Q. e FELIZARDO, I. **Processo de soldagem com eletrodo revestido (Coletânea de informações retirada de diversas bibliografias)**. Disponível em: <http://ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/ApostilaSMAW_02_Mais_completa.pdf> Acesso em: 08/12/2014.

BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MONDENESI, P. J. **Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3ª edição atualizada** – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

CARMONA, G. D. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2011.

CONDE, R.H. Recubrimientos resistentes al desgaste. **Boletín Técnico Conarco**, n. 85, dec. 1986. p. 2-20.

CORRÊA, E. O. **Avaliação da resistência ao desgaste de ligas desenvolvidas para solda de revestimento duro para uso sob condições altamente abrasivas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2005. 21 p.

CROOK, P. Cobalt and Cobalt alloys. In: **ASM Handbook - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10th. ed.** ASM Metals Park: Davis and Associates - ASM International, 1991. p. 195-199.

DAVIS, J. R. Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining. In: **ASM Handbook - Welding, Brazing and Soldering. 10th. ed.** ASM Metals Park: Davis and Associates - ASM International, 1993. p. 699–828.

DAVIES, V.H.; BOLTON, L.A. The mechanism of wear. **Weld Surfacing and Hardfacing**. The Welding Institute, Cambridge, U.K, 1980. p. 4-10.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DELORO STELLITE. **STELLITE[®] 21 ALLOY TECHNICAL DATA**. Disponível em: <
[http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Completed%20Data%20Sheets/Stellite%2021%20DS01-22208%20\(S%20R0808\).pdf](http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Completed%20Data%20Sheets/Stellite%2021%20DS01-22208%20(S%20R0808).pdf) > Acesso em: 07/07/2015.

DIAS, M. F. M.; GOMES, S. I. N. Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo a Baixa Tensão de Revestimentos Soldados por Arco Submerso. **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Uberlândia – MG, 2003.

D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; VILAR, R.; FEDER, C.G. High temperature behaviour of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings. **Applied Surface** **201**, 2002. p. 154-160.

EUTETIC do Brasil Ltda. **Manual de Aplicações em Soldagem**. 2ª edição. Outubro de 2009.

FOLTRAN, B. B. **Comparação dos revestimentos de superligas à base de cobalto (Co-Cr-W-C) depositados por eletrodo revestido, plasma por arco transferido e laser**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Universidade Federal do Paraná, 2000.

GAHR, K. Z. Microstructure and wear of materials. **Tribology series, v10**. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p.

GENERAL GUIDELINES FOR STELLITE HARDFACING ONTO STEEL SUBSTRATES. Disponível em: <
<http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Guidelines%20for%20hardfacing%20onto%20steels.pdf>>. Acesso em: 30/01/2015.

GHOLIPOUR, A.; SHAMANIAN, M.; ASHRAFIZADEH, F. Microstructure and wear behavior of Stellite 6 cladding on 17-4 PH stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**. Elsevier vol. 509, abril de 2011. p. 4905-4909.

GOMES, R. HENKE, S. D'OLIVEIRA, A. S. Microstructural Control of Co-based PTA Coatings. **Materials Research vol. 15 n° 5**. Scielo, junho de 2012.

KARDEC, A. NASCIF, J. **Manutenção – Função estratégica**. 4ª edição, Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013. 161 p.

KIM, S.; HAN, S.H.; PARK, J.K.; KIM, H.E. Variation of WC grain shape with carbon content in the WC-Co alloys during liquid-phase sintering. **Scripta Materialia, v.48**, setembro de 2003. p. 635-639.

LIN, W.C.; CHEN, C. Characteristics of thin surface layers of cobalto-based alloys deposited by laser cladding. **Surface & Coatings Technology**. Elsevier, 2006.

LUGSCHEIDER, E.; MORKRAMER, U. AIT-MEKIDECHE, A. Advances in PTA Surfacing. **Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference**. USA, 1991. p. 529-535.

MARCONI, M. **II Plasma ad Arco – II Processi PTA**. Plasma Team, 2002.

NILSSON, J.-O. Physical metallurgy of duplex stainless steels. In: Proceedings Duplex Stainless Steel 97. **5th World Conference, Maastricht, Holanda**, outubro de 1997. p. 73-82.

OLIVEIRA, M. A. **Estudo do processo plasma com alimentação automática de arame**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

OKUMURA, T.; CÉLIO, T. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1982.

PASCOALI, S.; ALARCON, O. **Introdução ao desgaste abrasivo**. Florianópolis, Santa Catarina, Agosto de 2004.

PAVELESCU, D.; ILIUC, I. **Wear**, **8**, Issue 2. Março-abril de 1965. p. 133-142.

PETER, A. E. Impact Wear of Materials. **Volume 2 Tribology series**. Editora Elsevier, 1986.

RABINOWICZ, E. Friction and wear of materials. **2a.Ed. New York: John Wiley e sons**, 1995. 315 p.

RAMALHO, J. P. **Revestimento por Soldagem**. Coleção Tecnologia SENAI – Soldagem. Senai-SP, 1997. p. 315-336.

ROYSE, F.S. **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de revestimentos de liga de cobalto utilizando o processo de soldagem TIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET, Rio de Janeiro, 2010.

RIBAS, P.R.F. et al. Fatores que afetam a resistência ao desgaste de aços e ferros fundidos utilizados em componentes mecânicos que trabalham em mineração. **São Paulo: Anais 57º ABM, 2002**. p. 1810-1819.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, UNESP, 2004.

RICHARDSON, R.C. The wear of metals by relatively soft abrasives. **Wear**, **nº11**, abril de 1968. p. 245-275.

SANTOS, R.L.C.; PAREDES, R.S.C.; D'OLIVEIRA, A.S.M. Otimização da deposição de revestimentos de cobalto com alto teor de carbono. **2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**, 2003.

SCOTT, D.; SCOTT, H. M. Proc. Conf. on Lubrication and Wear. **Paper nº 14, Oct. 1957, Inst. Mech. Eng.**, London.

TAKEYAMA, R. R. **Caracterização de revestimentos de Ligas à base de Co modificadas pela adição de carbonetos de tungstênio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TIGRINHO, J.J. **Superfícies enriquecidas por carbonetos de tungstênio depositados a plasma por arco transferido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TREVISAN, R. E.; BRANTIS, F. C. A. Efeito dos Parâmetros do Processo de Soldagem nas Propriedades do Revestimento. **ABS - XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**, outubro de 1993. p. 245-263.

YAEDU, A. E. **Influência do Substrato na Deposição de Stellite 1 com Plasma de Arco Transferido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

XIAOJUN, Z. **Effect of surface modification processes on cavitation erosion resistance**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.