Rafael da Silva Moraes

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA ACREDITAÇÃO DE FERRAMENTAS DESTRUIDORAS DE PARTES DE COLUNAS UTILIZADAS EM POÇOS DE PETRÓLEO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UBERLÂNDIA, 2010

RAFAEL DA SILVA MORAES

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA ACREDITAÇÃO DE FERRAMENTAS DESTRUIDORAS DE PARTES DE COLUNAS UTILIZADAS EM POÇOS DE PETRÓLEO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel O. Vilarinho

UBERLÂNDIA – MG

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

M827p Moraes, Rafael da Silva, 1986-
Proposição de metodologia para acreditação de ferramentas destruidoras de partes de colunas utilizadas em poços de petróleo [manuscrito] / Rafael da Silva Moraes. - 2010.
203 f. : il.

Orientador: Louriel O. Vilarinho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Ferramentas abrasivas - Teses. 2. Petróleo - Teses. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.92

Agradecimentos

À Petrobrás pelos recursos de equipamento e consumíveis utilizados na dissertação.

Ao Capes pela bolsa de estudos.

Ao Laprosolda, FEMEC e UFU pela disponibilização de infraestrutura física para o desenvolvimento dos trabalhos.

Ao meu orientador pelo apoio e paciência.

Aos colegas pelo suporte que deram.

Sumário

Resumo viii
Abstract ix
Lista de Símbolos x
Lista de Figuras xiv
Lista de Tabelas xxiii
CAPÍTULO I 1
INTRODUÇÃO 1
CAPÍTULO II 6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6
2.1. Princípios de perfuração de poços de petróleo 6
2.2. Brocas de perfuração 10
2.3. Operações especiais 13
2.4. A operação de destruição 17
2.4.1. A operação 17
2.4.2. Parâmetros 20
2.4.3. A ferramenta de destruição 23
2.5. Casos práticos da operação de destruição 27
2.6. Normas associadas 31
2.7. Equipamentos (patentes) e ferramentas (geometria, dimensões e tipos) 34
CAPÍTULO III 38
METODOLOGIA EXPERIMENTAL 38
3.1. Visão geral 38
3.2. Ensaio para recebimento de consumíveis 39
3.2.1. Gravimetria 40
3.2.2. Processamento e Análise de Imagens dos consumíveis 42
3.3. Ensaio de produção 45
3.3.1. Processamento e análise de imagens da placa de teste brasado 45
3.3.2. Ensaio de Impacto Izod Modificado 47
3.4. Ensaio simulativo 49
3.4.1. Dinamômetro 53
3.4.2. Ensaios a serem realizados 61
CAPÍTULO IV 64
RESULTADOS E DISCUSSÃO 64
4.1. Recebimento de consumíveis 64

4.1.2. Análise gravimétrica 64
4.1.2. Análise de imagens das varetas 65
4.2. Ensaios de Produção 77
4.2.1. Processamento e Análise de Imagens do corpo de prova brasado 77
4.2.2. Ensaio de Impacto de Izod Modificado 83
4.3. Ensaio Simulativo 89
4.4. Definição dos padrões de aceitabilidade 104
CAPÍTULO V 106
CONCLUSÃO 106
CAPÍTULO VI 108
PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS 108
CAPÍTULO VII 110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 110
ANEXO A 115
MANUAL DE OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE SIMULAÇÃO DE FERRAMENTAS DESTRUIDORAS EM POÇOS DE PETRÓLEO 115
A.1 Considerações gerais de segurança 115
A.2 Descrição do sistema 118
A.2.1 Geral 118
A.2.2 Fresadora 118
A.2.2.1 Dinamômetro 119
A.2.2.2 Reservatório de fluído 120
A.2.2.3 Resistência elétrica para aquecimento 120
A.2.3 Quadro de controle dos motores (QCM) da fresadora 121
A.2.4 Central de controle e aquisição 122
A.3 Operação 123
A.3.1 Iniciando o sistema 123
A.3.2 Fixando a placa de teste 124
A.3.3 Fixando o dinamômetro 125
A.3.4 Enchimento da cuba 126
A.3.5 Ligando o QCM da fresadora 127
A.3.6 Selecionando a temperatura 127
A.3.7 Selecionando a rotação 128
A.3.8 Movimentando os eixos 130
A.3.9 Zerando o sinal do dinamômetro 130

A.3.10 Desligando o equipamento 130
A.4 Manutenção 130
ANEXO B 133
RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS PARA ENSAIO DE PRODUÇÃO DE CADA AMOSTRA ANALISADA 133
ANEXO C 140
VARIAÇÃO DA CARGA APLICADA AO LONGO DO TEMPO DURANTE ENSAIO SIMULATIVO PARA CADA AMOSTRA ESTUDADA 140
ANEXO D 173
PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE IMPACTO IZOD MODIFICADO 173

MORAES, R. S. 2010. **Proposição de Metodologia para Acreditação de Ferramentas Destruidoras de Partes de Colunas Utilizadas em Poços de Petróleo.** 203 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Resumo

As operações de exploração e produção de óleo e gás mobilizam somas gigantescas de recursos econômicos e humanos e, portanto, requerem uma grande margem de sucesso. Após ser analisada a viabilidade de exploração de um poço quanto à possível quantidade de petróleo armazenada, se dá início a perfuração. Entretanto, mesmo que inicialmente um poço possa ser altamente viável, ele pode sofrer certos imprevistos que o inviabiliza após certo tempo. Para retomar a operação é necessário realizar a operação de destruição, que visa a desobstrução do poço. Esta operação conta com a utilização de ferramentas especiais, geralmente, de carbonetos de tungstênio, denominadas de ferramentas destruidoras. Dados os altos custos envolvidos, passa a ser essencial que esta ferramenta cumpra com suas funções, ou seja, que ela não falhe e desobstrua o poço. Neste contexto, é de suma importância a garantia da qualidade da fabricação desta ferramenta, que é um processo de brasagem de uma vareta que contém carboneto de tungstênio em uma matriz de alpaca (liga de Cu-Zn-Ni). Desta forma, este trabalho objetiva propor uma avaliação do desempenho e realizar a acreditação de ferramentas destruidoras de partes de colunas utilizadas em poços de petróleo, através da avaliação da matéria-prima (consumíveis), do processo de fabricação e do produto resultante. Para isto foram utilizadas rotinas computacionais, ensaios gravimétricos, de impacto e simulativos. Os resultados mostraram que o processamento e análise de imagens para avaliação de consumíveis se mostraram eficazes. A gravimetria se mostrou adequada para distinguir a porcentagem de massa do carboneto de tungstênio e da alpaca do consumível. O ensaio de impacto de Izod modificado se mostrou eficiente para analisar o tipo de fratura e o local da fratura do depósito brasado. O ensaio simulativo evidenciou a seleção de granulometria e rotação mais apropriada para ser utilizada na operação de destruição em poços de petróleo.

Palavras-chave: Petróleo, Brasagem, Ferramentas Destruidoras, Carbonetos de Tungstênio.

MORAES, R. S. 2010. **Proposition of Methodology for Accreditation of Destruction Tools of Column Parts Used in Oil Wells,** 203 f. MSc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia/MG, Brazil.

Abstract

Exploration and production of oil and gas mobilize large sums of economic and human resources and, therefore, require a reasonable success perspective. Once an oil-well exploration is analyzed and its viability is demonstrated, the drilling starts. However, even the oil well is initially viable; it can suffer odds events that could stop the exploration. Then, in order to restore the oil production, it is necessary to proceed to the destruction operation, which aims to clean up the well. This operation requires special tools, normally with tungsten carbides, so-called destruction tools. Due to the high costs involved in oil exploration, it is essential that these tools fulfill their functions, i.e., they do not fail and clean up the oil well. Within this context, it is important to assure the quality of manufacturing the destruction tools, which is carried out by brazing process of a stick made of tungsten carbide in a alpaca matrix (alloy of Cu-Zn-Ni). Therefore, this work aims to propose a methodology for accreditation of destruction tools of column parts used in oil wells, through the assessment of consumables, manufacturing process (brazing) and the final tool (simulative test). Computational routines were developed, as well as gravimetric, impact and simulative tests. The results showed that image processing and analyses are effective in the consumable assessment. Gravimetry showed capable of distinguish mass percentage of tungsten carbide and alpaca in the stick (consumable). The modified Izod impact test is a suitable approach for analyzing the fracture shape and local of the brazed deposit. The simulative test highlighted the carbide granulometry and tool rotation that is more appropriated for using during the destruction operation of oil wells.

Keywords: Oil, Brazing, Destruction Tools, Tungsten Carbides, Crushed Carbides.

Lista de Símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	American Bureau of Shipping
ACI	American Concrete Institute
AGA	American Gas Association
AGMA	American Gear Manufacturers Association
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ANP	National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (Brazil)
ANSI	American National Standards Institute
AODC	Association of Offshore Diving Contractors
API	American Petroleum Institute
APPEA	Australian Petroleum Production & Exploration Association
AS	Australian Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
AWWA	American Water Works Association
BS	British Standards
CAN	Canadian Standards
CSA	Canadian Standards Association
C_B	Custo das brocas
C_H	Custo horário da sonda de perfuração
C_M	Custo métrico
CSWIP	Certification Scheme for Welding and Inspection Personnel (UK)
D	Densidade
DIA	Diâmetro da broca
DIN	German Institute for Standardization

DMAC	Diving Medical Advisory Committee (North Europe)
DNV	Det Norske Veritas (Norway)
DPVOA	Dynamically Positioned Vessel Owners Association (now IMCA)
DS	Danish Standard
EEMUA	Engineering Equipment & Materials Users' Association
EN	European Norm
g	Aceleração da gravidade
g_p	Pressão de saída (Kg/galão)
h	Desgaste da broca
IADC	International Association of Drilling Contractors
ICEL	Industry Committee for Emergency Lighting (UK)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEE	Institution of Electrical Engineers (UK)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (US)
IGE	IGEM Standard (UK)
ILO	International Labor Organization
IMO	International Maritime Organization
IP	Institute of Petroleum (Now Energy Institute – UK)
IS	Indian Standard
ISA	International Society of Automation (US)
ISO	International Organization for Standardization
LRS	Lloyds Register (UK)
m	Massa medida
m_{am}	Massa total da amostra
m_{WC}	Massa de carboneto
MIL	Military standard (US)
M_p	Intervalo perfurado

MSE	Energia mecânica específica
MSS	Manufacturers Standardization Society (US)
N	Rotação em RPM
NACE	National Association of Corrosion Engineers (US)
NEMA	National Electrical Manufacturers Association (US)
NEN	Netherlands Standardization Institute
NFPA	National Fire Protection Association (US)
NOHSC	National Occupational Health and Safety Commission (Australia)
NORSOK	Norwegian Competitive Position on the Continental Shelf
NORDTEST	Organization for testing in the Nordic countries (SAUS)
NS	Norwegian Standard
NZS	New Zealand Standard
OCIMF	Oil Companies International Marine Forum
OGP	International Association of Oil & Gas Producers
OIAC	Offshore Industry Advisory Committee (formerly Oil Industry Advisory Committee) (UK)
OIML	International Organization of Legal Metrology
OMHEC	Offshore Mechanical Handling Equipment Committee
OSD	Offshore Safety Division (UK HSE)
P_{ar}	Massa ao ar
P_{ag}	Massa na água
P_{am}	Densidade real da amostra
P_{alpaca}	Densidade da alpaca
P_c	Peso da lama (Kg/galão)
P_{WC}	Densidade do carboneto
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers (US)
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturers Association (US)
t_p	Tempo gasto perfurando

t_m	Tempo gasto manobrando
UKOOA	UK Offshore Operator Association (Now UK Oil & Gas)
UL	Underwriters Laboratories (US)
V	Volume
V_{ld}	Volume do liquido deslocado pela amostra
V_{am}	Volume da amostra
X	Porcentagem em volume de carboneto
W	Força aplicada na operação
WHO	World Health Organization

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Produção de energia no Brasil por insumos em ktoe - quilotonelada de óleo equivalente (1 ktoe = 11,63 GWh) 2
Figura 2. 1 – Ilustração de uma sonda de perfuração 7
Figura 2. 2 – Broca de perfuração utilizando fluído de perfuração (lama) (Halliburton, 2010) 9
Figura 2. 3 – Cabeça de broca do tipo drag de diamantes naturais (Smith *Technologies*, 2010) 11
Figura 2. 4 – Cabeça de broca do tipo drag modelo Standard PDC Bits (Smith *Technologies*, 2010) 11
Figura 2. 5 – Cabeça de broca do tipo drag do tipo TSP (China Suppliers, 2010)..... 11
Figura 2. 6 – Cabeça de broca do tipo *roller* cone do tipo tricônica modelo *Gemini* (*Smith International*, 2010) 12
Figura 2. 7 – Cabeça de broca do tipo roller cone do tipo tricônica modelo Shamal TNG (*Smith International*,2010) 12
Figura 2. 8 – Representação da operação de destruição em poços de petróleo para remoção de uma coluna de perfuração onde em (a) mostra a broca de destruição descendo com a rotação acionada ao encontro da coluna, em (b) a broca triturando o “peixe” até o momento em que possua a forma necessária para ser pescado, em (c) a coluna de perfuração pronta para ser removida pelo processo de pescaria, (d) mostra a ferramenta retirando o “peixe” do poço..... 19
Figura 2. 9 – Broca com insertos de carboneto de tungstênio (Gasoil, 2010). 23
Figura 2. 10 – Amostra de varetas de WC-Co (Kutrite, 2008). 25
Figura 2. 11 – Exemplo de amostra de varetas de WC-Co, onde (a) mostra a vista “superior” e (b) mostra a vista “inferior” (Kutrite, 2008)..... 26
Figura 2. 12 – Padrão de hierarquia utilizado para distinguir nível de documentos de regulamentações por responsáveis (Adaptado de Caporali et AL, 2005) 33
Figura 2.14 – Esquemático da ferramenta de destruição desenvolvida por Reynolds, Carter e Yukon (1988) 34
Figura 2. 13 – Número de normas utilizadas por órgão regulamentador na área petrolífera 35
Figura 2.15 - Esquemático da ferramenta de destruição desenvolvida por Lynde e Harvey (1989) 36
Figura 2.16 - Esquemático da ferramenta de destruição desenvolvida por Gilbert e Stronach (1991) 37
Figura 3. 1 – Sequência e esquemático da metodologia utilizada 39
Figura 3. 2 – Comparação entre as dimensões dos carbonetos estudados onde, (a) representa a granulometria fina e (b) representa a granulometria grossa. 40
Figura 3. 3 – Dispositivo e lâmpada utilizada para aquisição da imagem variando-se os graus de visualização da vareta de WC-Co. 44
Figura 3. 4 – Visualização da parte “inferior” da vareta de WC-Co , mostrando a superfície ausente de carbonetos. 44
Figura 3. 5 – Configuração necessária para captura da imagem, sendo necessário um ponto luminoso e câmera no lado oposto. 46

Figura 3.6 – Placa de teste brasado que é estudada a distribuição dos carbonetos após o processo sendo mostrados respectivamente os de carbonetos de granulometria fina e grossa 47
Figura 3. 7 – Sequência de preparação da amostra que consiste a partir de uma placa de teste brasada retira uma amostra com as suas respectivas dimensões necessárias 48
Figura 3.8- Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM) (ARANTES, 2001) 49
Figura 3.9 – Fresadora modificada: 01 – Parte inferior onde se localiza o reservatório de fluídos; 02 – Motor responsável pela movimentação do eixo y; 03 – Cuba; 04 – Dinamômetro; 05 – Braço principal responsável pela movimentação x e z. 51
Figura 3. 10 - Central de controle e aquisição: 01 – Botão de parada de emergência; 02 – botão de acionamento da central; 03 – tela de visualização da interface gráfica. 51
Figura 3.11 - QCM da Fresadora: 01 – Chave de acionamento do QCM da fresadora; 02 – botão de parada de emergência; 03 – mostrador analógico de tensão; 04 – mostrador analógico de corrente; 05 – botões para acionar e desligar o motor responsável pela rotação; 06 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo x; 07 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo y; 08 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo z; 09 – botões para acionar e desligar o motor responsável pela bomba; 10 – botões para acionar e desligar a resistência elétrica; 11 – chave de seleção do automático / desligado / manual da resistência elétrica; 12 – mostrador da chave respectiva desligada; 13 – mostrador da chave respectiva ligada. 52
Figura 3.12 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 8 horas com 10 V de entrada e carga de 15 kgf com outros equipamentos desligados (período noturno) com um aumento do valor do sinal mantendo-se a carga constante 54
Figura 3.13 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 8 horas com 5 V de entrada e carga de 15 kgf com outros equipamentos desligados (período noturno) com pouca variação do valor do sinal mantendo-se a carga constante 55
Figura 3.14 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 4 horas com 5 V de entrada e carga de 15 kgf com outros equipamentos ligados (período diurno) 55
Figura 3. 15 – Célula de carga HBM MB35. 56
Figura 3. 16 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 8 horas com 5 V de entrada e carga de 170 kgf com outros equipamentos ligados (período diurno) mostrando uma ótima estabilidade dos dados 56
Figura 3. 17 – Instalação do dinamômetro no equipamento de ensaios de tração e compressão, onde (a) mostra o equipamento e (b) o detalhe da instalação 57
Figura 3. 18 – Visualização do programa utilizado para a aquisição dos dados 58
Figura 3. 19 – Comportamento das curvas de calibração 59
Figura 3. 20 – Visualização do esquemático da rotina computacional utilizada para controle e operação do sistema 61
Figura 3. 21 – Esquemático do corpo de prova utilizado 63
Figura 4. 1 - Porção da imagem a ser analisada com seus respectivos contornos superior e inferior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina 66
Figura 4. 2 - Frequência de cada contorno superior e inferior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina 67

Figura 4. 3 - Histograma dos mesmos gerados dos contornos superiores e inferiores da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina 67
Figura 4. 4 - Probabilidade acumuladas do contorno superior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina 68
Figura 4. 5 - Probabilidade acumuladas do contorno inferior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina 68
Figura 4. 6 - Porção da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa 69
Figura 4. 7 - Freqüência de cada contorno superior e inferior da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa 69
Figura 4. 8 - Histograma dos mesmos gerados dos contornos superiores e inferiores da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa 70
Figura 4. 9 - Probabilidade acumuladas do contorno superior da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa 70
Figura 4. 10 - Probabilidade acumuladas do contorno inferior da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa 71
Figura 4. 11 – Representação gráfica da variável p_rel apresentando seu valor médio e seus limites inferiores e superiores de cada amostra dos dois tipos de granulometria tendo o valor de referência de 70 unidades para a variável 75
Figura 4. 12 – Representação gráfica da variável difZ apresentando seu valor médio e seus limites inferiores e superiores de cada amostra dos dois tipos de granulometria tendo o valor de referência de 50 unidades para a variável 76
Figura 4. 13 – Resultados do processamento de imagem para a primeira amostra de granulometria fina com resolução de 3264 x 2448 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 78
Figura 4. 14 - Resultados do processamento de imagem para a primeira amostra de granulometria fina com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 79
Figura 4. 15 – Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 25 sendo (a) e (b) para a segunda amostra de granulometria fina e primeira amostra de granulometria grossa respectivamente das imagens com resolução de 800 por 600 pixels. 80
Figura 4. 16 - Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 75 sendo (a), (b), (c) e (d) para a segunda amostra de granulometria fina, terceira de granulometria fina, a primeira de granulometria grossa, segunda de granulometria grossa respectivamente das imagens com resolução de 800x 600 pixels 81
Figura 4. 17 - Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 100 para a segunda amostra de granulometria fina da imagem com resolução de 800x600 pixels 81

Figura 4. 18 - Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 50 para a segunda amostra de granulometria grossa da imagem com resolução de 800x600 pixels 82
Figura 4. 19- Resultado do processamento de imagem terceira amostra de granulometria grossa sendo (a) e (b) com o valor de *Matriz Scan* de 75 e 100 respectivamente das imagens com resolução de 800 por 600 pixels 83
Figura 4. 20 - Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 100 sendo (a) e (b) para a primeira e segunda amostra de granulometria grossa respectivamente das imagens com resolução de 800 por 600 pixels..... 83
Figura 4. 21 – Resultado gráfico da energia absorvida pelo impacto de Izod por cada amostra analisada 85
Figura 4. 22 – Corpos de prova de granulometria fina após o impacto sendo (a), (b) e (c) da primeira amostra; (d), (e) e (f) da segunda amostra e (g), (h) e (i) da terceira amostra..... 86
Figura 4. 23 - Corpos de prova de granulometria grossa após o impacto sendo (a), (b) e (c) da primeira amostra; (d), (e) e (f) da segunda amostra e (g), (h) e (i) da terceira amostra ... 87
Figura 4. 24 – Vista superior do metal de base (a) e do metal de adição (b) do segundo corpo de prova da primeira amostra de granulometria fina 88
Figura 4. 25 – Vista superior do metal de base (a) e do metal de adição (b) do terceiro corpo de prova da terceira amostra de granulometria fina 88
Figura 4. 26 – Vista superior do metal de base (a) e do metal de adição (b) do terceiro corpo de prova da terceira amostra de granulometria grossa 89
Figura 4. 27 – Força registrada para o primeiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 92
Figura 4. 28 – Força registrada para o segundo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 92
Figura 4. 29 – Força registrada para o terceiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 93
Figura 4. 30 – Força registrada para o quarto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 93
Figura 4. 31 – Força registrada para o quinto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 94
Figura 4. 32 – Força registrada para o sexto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 94
Figura 4. 33 – Força registrada para o sétimo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 95
Figura 4. 34 – Força registrada para o oitavo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 rpm..... 95
Figura 4. 35 – Evolução gráfica do desgaste do primeiro corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria grossa com rotação de 75 rpm 96
Figura 4. 36 – Evolução gráfica do desgaste do segundo corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria grossa com rotação de 75 rpm 96
Figura 4. 37 – Evolução gráfica do desgaste do terceiro corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria fina com rotação de 75 rpm 97
Figura 4. 38 – Evolução gráfica do desgaste do quarto corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria fina com rotação de 75 rpm 97
Figura 4. 39 – Evolução gráfica do desgaste do quinto corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria grossa com rotação de 150 rpm 97

Figura 4. 40 – Evolução gráfica do desgaste do oitavo corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria grossa com rotação de 150 rpm 98
Figura 4. 41 – Evolução gráfica do desgaste do sexto corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria fina com rotação de 150 rpm 98
Figura 4. 42 – Evolução gráfica do desgaste do sétimo corpo de prova contra a amostra de brasada de granulometria fina com rotação de 150 rpm 98
Figura 4. 43 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 100
Figura 4. 44 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 100
Figura 4. 45 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 100
Figura 4. 46 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 101
Figura 4. 47 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 101
Figura 4. 48 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 101
Figura 4. 49 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 102
Figura 4. 50 – Primeiro ensaio com o depósito brasado de granulometria grossa com 75 rpm de rotação..... 102
Figura 4. 51 – Corpo de prova ao término do primeiro ensaio com depósito brasado de granulometria fina com rotação de 75 rpm..... 103
Figura A. 1 – Fresadora modificada: 01 – Parte inferior onde se localiza o reservatório de fluídos; 02 – Motor responsável pela movimentação do eixo y; 03 – Cuba; 04 – Dinamômetro; 05 – Braço principal responsável pela movimentação x e z. 119
Figura A. 2 - Esquemático do reservatório de fluídos..... 120
Figura A. 3 - QCM da Fresadora: 01 – Chave de acionamento do QCM da fresadora; 02 – botão de parada de emergência; 03 – mostrador analógico de tensão; 04 – mostrador analógico de corrente; 05 – botões para acionar e desligar o motor responsável pela rotação; 06 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo x; 07 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo y; 08 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo z; 09 – botões para acionar e desligar o motor responsável pela bomba; 10 – botões para acionar e desligar a resistência elétrica; 11 – chave de seleção do automático / desligado / manual da resistência elétrica; 12 – mostrador da chave respectiva desligada; 13 – mostrador da chave respectiva ligada. 121
Figura A. 4 - Central de controle e aquisição: 01 – Botão de parada de emergência; 02 – botão de acionamento da central; 03 – tela de visualização da interface gráfica.~ 122
Figura A. 5 – Iniciando o sistema pelo Measurement & Automation..... 123
Figura A. 6 – Programa de controle da fresadora. 124
Figura A. 7 – Programa de controle da fresadora. 125
Figura A. 8 – Dispositivos de fixação do dinamômetro. 126
Figura A. 9 – Programa de controle da fresadora. 127
Figura A. 10 – Programa de controle da fresadora mostrando a opção para controle de temperatura. 128

Figura A. 11 – Programa de controle da fresadora mostrando a opção para controle de rotação..... 129
Figura A. 12 – Cabeamento das resistências para aquecimento do fluido. 132
Figura B. 1 - Resultados do processamento de imagem para a primeira amostra de granulometria fina com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 134
Figura B. 2- Resultados do processamento de imagem para a segunda amostra de granulometria fina com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 135
Figura B. 3- Resultados do processamento de imagem para a terceira amostra de granulometria fina com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 136
Figura B. 4- Resultados do processamento de imagem para a primeira amostra de granulometria grossa com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 137
Figura B. 5- Resultados do processamento de imagem para a segunda amostra de granulometria grossa com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 138
Figura B. 6- Resultados do processamento de imagem para a segunda amostra de granulometria grossa com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan* 139
Figura C. 1 – Força registrada para o primeiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 141
Figura C. 2 – Força registrada para o segundo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 141
Figura C. 3 – Força registrada para o terceiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 142
Figura C. 4 – Força registrada para o quarto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 142
Figura C. 5 – Força registrada para o quinto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 143
Figura C. 6 – Força registrada para o sexto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 143
Figura C. 7 – Força registrada para o sétimo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 144

Figura C. 8 – Força registrada para o oitavo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 144
Figura C. 9 – Força registrada para o primeiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 145
Figura C. 10 – Força registrada para o segundo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 145
Figura C. 11 – Força registrada para o terceiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 146
Figura C. 12 – Força registrada para o quarto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 146
Figura C. 13 – Força registrada para o quinto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 147
Figura C. 14 – Força registrada para o sexto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 147
Figura C. 15 – Força registrada para o sétimo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 148
Figura C. 16 – Força registrada para o oitavo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 75 RPM 148
Figura C. 17 – Força registrada para o primeiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 149
Figura C. 18 – Força registrada para o segundo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 149
Figura C. 19 – Força registrada para o terceiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 150
Figura C. 20 – Força registrada para o quarto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 150
Figura C. 21 – Força registrada para o quinto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 151
Figura C. 22 – Força registrada para o sexto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 151
Figura C. 23 – Força registrada para o sétimo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 152
Figura C. 24 – Força registrada para o oitavo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 152
Figura C. 25 – Força registrada para o primeiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 153
Figura C. 26 – Força registrada para o segundo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 153
Figura C. 27 – Força registrada para o terceiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 154
Figura C. 28 – Força registrada para o quarto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 154
Figura C. 29 – Força registrada para o quinto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 155
Figura C. 30 – Força registrada para o sexto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 155

Figura C. 31 – Força registrada para o sétimo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 156
Figura C. 32 – Força registrada para o oitavo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 75 RPM 156
Figura C. 33 – Força registrada para o primeiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 157
Figura C. 34 – Força registrada para o segundo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 157
Figura C. 35 – Força registrada para o terceiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 158
Figura C. 36 – Força registrada para o quarto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 158
Figura C. 37 – Força registrada para o quinto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 159
Figura C. 38 – Força registrada para o sexto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 159
Figura C. 39 – Força registrada para o sétimo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 160
Figura C. 40 – Força registrada para o oitavo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 160
Figura C. 41 – Força registrada para o primeiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 161
Figura C. 42 – Força registrada para o segundo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 161
Figura C. 43 – Força registrada para o terceiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 162
Figura C. 44 – Força registrada para o quarto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 162
Figura C. 45 – Força registrada para o quinto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 163
Figura C. 46 – Força registrada para o sexto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 163
Figura C. 47 – Força registrada para o sétimo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 164
Figura C. 48 – Força registrada para o oitavo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria grossa com 150 RPM 164
Figura C. 49 – Força registrada para o primeiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 165
Figura C. 50 – Força registrada para o segundo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 165
Figura C. 51 – Força registrada para o terceiro teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 166
Figura C. 52 – Força registrada para o quarto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 166
Figura C. 53 – Força registrada para o quinto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 167

Figura C. 54 – Força registrada para o sexto teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 167
Figura C. 55 – Força registrada para o sétimo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 168
Figura C. 56 – Força registrada para o oitavo teste do primeiro ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 168
Figura C. 57 – Força registrada para o primeiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 169
Figura C. 58 – Força registrada para o segundo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 169
Figura C. 59 – Força registrada para o terceiro teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 170
Figura C. 60 – Força registrada para o quarto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 170
Figura C. 61 – Força registrada para o quinto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 171
Figura C. 62 – Força registrada para o sexto teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 171
Figura C. 63 – Força registrada para o sétimo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 172
Figura C. 64 – Força registrada para o oitavo teste do segundo ensaio da placa de depósito brasado de granulometria fina com 150 RPM 172
Figura D. 1 – Visualização lateral e frontal da preparação, respectivamente representados por (a) e (b), para retirada da amostra 175
Figura D. 2 – Evolução do tempo (em segundos) para remoção de das amostras de cada placa de teste 178
Figura D. 3 – Variação do desgaste de cada eletrodo utilizado pra remoção das amostras de cada placa de teste 179

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 - Parâmetros de Perfuração de Brocas Roller Cone com Insertos de Carboneto de Tungstênio 14
Tabela 2. 2 – Parâmetros utilizados na operação de destruição segundo os manuais de execução. 20
Tabela 2. 3 - Dureza dos carbetos de tungstênio segundo a variação da composição de Co e dimensões (SAITO, IWABUCHI, SHIMIZU, 2005) - adaptada 24
Tabela 2. 4 – Tensão de ruptura transversal em relação a dimensão do carbeto e sua composição (YANG, SENDA, OHMORIB, 2003) 24
Tabela 2. 5 – Características da alpaca (Coksa,2010) 24
Tabela 2.6 – Relação de normas utilizadas na indústria petrolífera e de gás natural (Caporali, 2005) 32
Tabela 3. 1 – Dimensões das granulometrias estudadas 40
Tabela 3. 2 – Valores de massa, volume e densidade dos carbonetos de tungstênio estudados mensurados. 41
Tabela 3. 3 – Valores da carga empregada com as respectivas médias dos dados adquiridos para a aquisição utilizando o equipamento de ensaios mecânicos. 59
Tabela 3. 4 – Curvas de calibração e R2 para cada ensaio realizado 60
Tabela 3. 5 – Medição dos corpos de prova de aço 1045 temperados selecionados de forma aleatória 63
Tabela 4.1 – Resultados da gravimetria apresentando os valores de porcentagem de massa dos carbonetos em cada amostra por cada granulometria, sendo P_{ar} a massa media em ar e $P_{água}$ a massa media em água 65
Tabela 4. 2 – Resultados da análise de imagem da 1ª amostra de consumível de granulometria fina 72
Tabela 4. 3 – Resultados da análise de imagem da 2ª amostra de consumível de granulometria fina 72
Tabela 4. 4 – Resultados da análise de imagem da 3ª amostra de consumível de granulometria fina 73
Tabela 4. 5 – Resultados da análise de imagem da 1ª amostra de consumível de granulometria grossa 73
Tabela 4. 6 – Resultados da análise de imagem da 2ª amostra de consumível de granulometria grossa 74
Tabela 4. 7 – Resultados da análise de imagem da 3ª amostra de consumível de granulometria grossa 74
Tabela 4. 8 – Valores médios e os desvios padrões das variáveis p_rel (Densidade relativa da normal padrão dos contornos) e difZ (Resultado da Transformada Rápida de Fourier) .. 75
Tabela 4. 9 – Energia absorvida em cada teste realizado por amostra 84
Tabela 4. 10 – Valores médios e desvios padrões das energias absorvidas pelas amostras 85
Tabela 4. 11 – Região da fratura localizada em cada consumível por cada amostra, sendo zona de ligação representada por ZL e zona do metal de adição representado por ZMB 88
Tabela 4. 12 - Ensaios 1 e 2 (rotação de 75 rpm e a granulometria grossa) com respectivos corpos de prova e valores de massa medidos após cada teste 90
Tabela 4. 13 - Ensaios 3 e 4 (rotação de 75 rpm e a granulometria fina) com respectivos corpos de prova e valores de massa medidos após cada teste 90

Tabela 4. 14 - Ensaios 5 e 6 (rotação de 150 rpm e a granulometria grossa) com respectivos corpos de prova e valores de massa medidos após cada teste 91
Tabela 4. 15 - Ensaios 7 e 8 (rotação de 150 rpm e a granulometria fina) com respectivos corpos de prova e valores de massa medidos após cada teste 91
Tabela 4. 16 – Matriz de correlação da evolução do desgaste dos ensaios..... 99
Tabela 4. 17 – Variação média dos valores de massa do corpo de prova e da placa de teste do depósito brasado, sendo G75 e G150 para ensaio com granulometria grossa e velocidade de rotação de 75 e 150 rpm, respectivamente, e F75 e F150 para ensaio com granulometria fina e velocidade de rotação de 75 e 150 rpm, respectivamente 103
Tabela D. 1 – Propriedades físicas dos materiais utilizados como eletrodos (Metals Handbook, 1998) 174
Tabela D. 2 – Parâmetros utilizados com o eletrodo de tungstênio..... 175
Tabela D. 3 – Parâmetros utilizados com o eletrodo de cobre eletrolítico. 176
Tabela D. 4 – Variação da massa do eletrodo de cobre eletrolítico após a remoção de cada amostra..... 176
Tabela D. 5 - Variação da massa do da placa de teste após a remoção de cada amostra 177
Tabela D. 6 – Tempo gasto para remoção de cada amostra por granulometria..... 178

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Esta é a era do petróleo. Na sociedade moderna dificilmente encontra-se um ambiente, produto ou bem que não contenha compostos derivados do petróleo ou que não seja direta ou indiretamente produzido a partir do petróleo. Sendo este de origem natural, não renovável e de ocorrência limitada, o petróleo movimenta bilhões de dólares diariamente em uma atividade industrial gigantesca, empregando milhares de trabalhadores, técnico e cientistas. Isto por precisar de ferramentas como ciência, tecnologia, engenharia, administração, finanças, fatores sociais, ecologia, recursos humanos que são essenciais para o desempenho da indústria petrolífera (FAPESP, 2004).

Mobilizam-se somas gigantescas de recursos econômicos e humanos para sustentar as operações de exploração e produção de óleo e gás, insumos industriais que marcaram indelevelmente o século XX e transformaram de modo definitivo, a vida da humanidade, a ponto de transformarem-se em bens estratégicos para a segurança nacional dos mais importantes países do mundo. Deter reservas de óleo e gás e dominar tecnologias para produzi-las é, igualmente, fator critico de desenvolvimento para países periféricos e emergentes. Recursos consideráveis são alocados para o seu desenvolvimento e pesquisa, fazendo surgir, diariamente, tecnologias e equipamentos mais sofisticados para a descoberta, extração, transporte e refino do petróleo.

Ao longo dos anos a produção de energia no Brasil manteve-se praticamente constante em relação à utilização de energias renováveis. A produção baseada na energia nuclear teve início na década de 90 tendo uma tímida representação, quando comparada as

demais fontes. Já a produção de energia com a utilização do petróleo teve aumento significativo ao longo dos anos se igualando na década de 90 e na década seguinte tendo uma representação muito mais significativa. A Figura 1.1 mostra a evolução da produção de energia pelos insumos correspondentes (IEA, 2009 – adaptado).

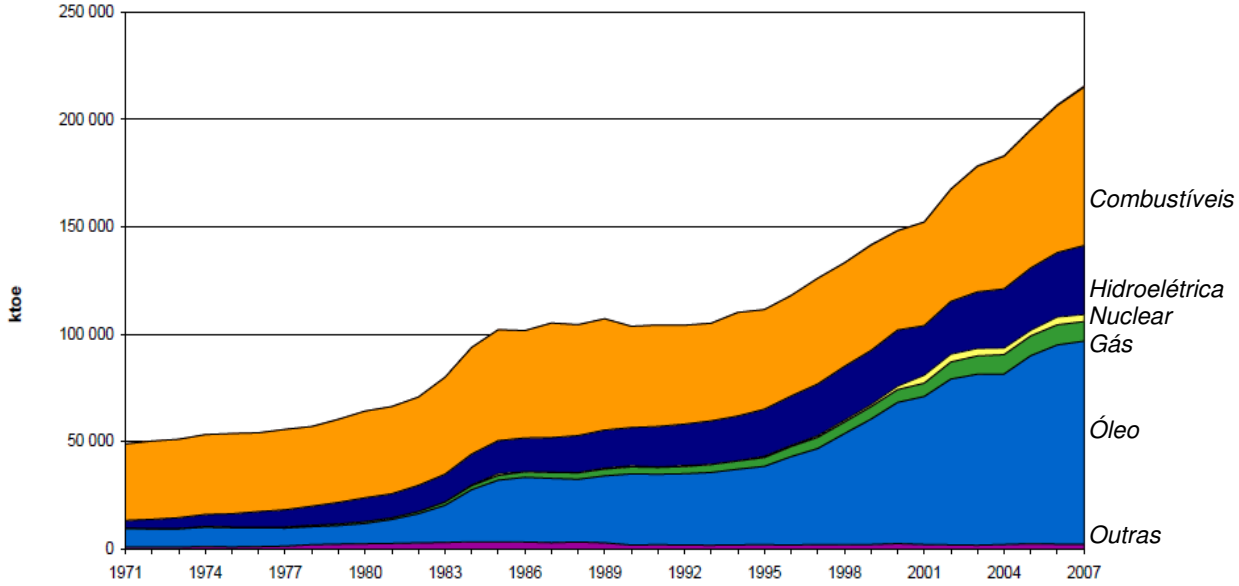


Figura 1.1 – Produção de energia no Brasil por insumos em ktoe - quilotonelada de óleo equivalente (1 ktoe = 11,63 GWh)

Mesmo sendo um insumo de importância nacional, sua exploração depende de diversos fatores. Em sua grande maioria são fatores econômicos que prevalecem. Então quanto mais rápido se der o início da prospecção dos poços, maior retorno de investimento será obtido. Por outro lado, enormes jazidas podem ser abandonadas indefinidamente ou para futuras explorações devido aos atrasos que ocorrem nos projetos.

Após ser analisada a viabilidade de exploração de um poço quanto à possível quantidade de petróleo armazenada, se dá inicio a perfuração. O tempo desta perfuração varia de acordo com profundidade e tipo de rochas encontradas que se encontra a jazida a ser explorada. Após uma análise destas variáveis verifica-se a viabilidade econômica do poço a ser explorado. Entretanto, mesmo o poço inicialmente sendo altamente viável pode ocorrer certos imprevistos que o tornam inviáveis após certo tempo. Tempo este sendo variável em relação a cada poço, analisando-se sua possível capacidade produtiva e profundidade. O aumento do tempo em questão pode ocorrer devido a obstrução do poço por algum material ou equipamento da operação de perfuração que tenha se desprendido e posicionado-se no poço de tal forma que impeça o avanço da perfuração.

Independente do que ocasionou a interrupção do avanço, o processo necessita ser parado para que o poço seja desobstruído. A primeira tarefa é tentar realizar a operação de pescaria, onde se procura remover o chamado “peixe”- peça a ser removida-, agarrando-o com ferramentas especiais e puxá-la. Todavia, esta operação nem sempre é bem-sucedida, passando-se para uma segunda tarefa denominada de operação de destruição ou lavagem da parte presa, para poder retornar a primeira tarefa (LYNDE, 1994).

Estas operações não são desejadas. Isto porque estas atividades aumentam consideravelmente o tempo de exploração, o que pode inviabilizar o poço ou diminuir consideravelmente o retorno esperado da exploração. Assim, quanto mais rápida e eficiente a operação de destruição for, mais interessante continua sendo a exploração do poço de petróleo. Esta operação, essencialmente, depende da habilidade e experiência dos envolvidos na operação. Isto porque, não há uma norma ou regulamento padrão para esta operação, mesmo sendo de extrema importância, ou seja, não se é possível hoje acreditar[1] empresas ou organismos que garantam esta operação (PLACIDO *et al.*, 2008).

Uma componente de extrema importância desta operação é a ferramenta destruidora. Com certas características similares as brocas de perfuração, as ferramentas destruidoras normalmente são mais robustas. Estas ferramentas são elaboradas e produzidas para destruir ou triturar o suficiente do “peixe”, para posterior tentativa de pescaria ou não.

As ferramentas de destruição são constantemente recuperadas, ou recebem manutenção ou até mesmo produzidas no local que será empregada. Entretanto, os resultados finais com estas ferramentas são bastante diversificados. Uma vez que elas funcionam ora com ótimos resultados e em outros momentos quebram ou chegam ao fim de vida de forma bastante acelerada, o que é neste caso altamente indesejado. Isto ocorre devido à falta de homogeneidade na elaboração destas ferramentas o que afeta diretamente no seu desempenho (PLACIDO *et al.*, 2008).

A ferramenta de destruição é constituída basicamente de uma haste metálica, podendo ser oca ou não. Esta normalmente é elaborada apenas com partes fixas, revestida de materiais resistentes ao desgaste abrasivo. Os materiais que são empregados são feitos geralmente de carbonetos de tungstênio, que é um material de alta resistência mecânica e elevada dureza. Alguns autores (PIRSO; LETUNOVITS; VILJUS, 2003; SAITO; IWABUCHI; SHIMIZU, 2006; LUYCKX; SACKS; LOVE, 2005) - demonstraram que esta dureza depende das dimensões dos carbonetos. Esta dureza é inversamente proporcional à quantidade de

---

[1] *Pela ABNT NBR ISO/IEC 17011:2005, define-se “acreditação” como um sistema de avaliação e certificação da qualidade de serviços/produtos.*

cobalto no material em relação a sua dureza, ou seja, quanto maior a dimensão do carboneto para uma mesma porcentagem de cobalto menor a dureza.

O revestimento da ferramenta destruidora é depositado, geralmente, através do processo de brasagem por chama de forma manual através da utilização varetas de carboneto de tungstênio em uma matriz de alpaca (liga de cobre, níquel e zinco) como material de adição.

Diversos problemas necessitam ser enfrentados para que a ferramenta destruidora seja produzida de forma adequada. Problemas como a granulometria desejada, varetas de carbonetos de tungstênio com distribuições não uniformes, são alguns dos problemas que podem acarretar em uma má confecção da ferramenta destruidora. Esta dificuldade de preparação da ferramenta pode ocasionar trocas antes do tempo necessário, devido até mesmo a falta de confiabilidade da mesma, ou diminuir consideravelmente a velocidade de perfuração (PLACIDO *et al*., 2008).

Pozas (2003) mostrou que durante uma visita à plataforma SS48 no campo de Coral, notou que um dos maiores empecilhos ao bom andamento da perfuração dos poços é a falta de informações sobre o estado da broca. Em um evento ocorrido durante a visita, a coluna foi retirada totalmente do poço e foi observado que havia um problema com o jato da broca. Se o sondador soubesse que este era o problema talvez não tivesse sido necessário retirar toda a coluna do poço e, desse modo, tempo e dinheiro seriam economizados. Mostrando que o conhecimento mais amplo das atribuições da broca ajuda a evitar eventos inesperados, na manobra da sonda ou ainda na otimização da perfuração.

O intervalo do custo diário de uma sonda de perfuração de poços de petróleo é da ordem de U$ 500 a U$ 700 mil, segundo Sermão (2009). Segundo Oliveira (2008) este valor após o afretamento realizado pela Petrobrás deve variar entre U$ 400 a U$ 450 mil, enquanto o mercado fala de U$ 600 a U$ 700 mil. Este valor menor segundo Oliveira reflete ao investimento de US$ 8 bilhões para 12 sondas de perfuração para o ano de 2017. Levando em consideração que em média o processo de destruição leva de um a três dias, reduzir o tempo do processo de destruição e/ou prever com maior certeza de tempo, faria com que houvesse uma considerável economia de recursos na perfuração de petróleo.

Dificuldades nas definições de um experimento e qualificação de um procedimento para o desenvolvimento da ferramenta, certificação de um consumível e a fim de se obter uma forma comparativa de modo seguro, rápido e com repetibilidade para avaliar novos procedimentos e consumíveis são os problemas de confecção que estão supostamente ligados a vários fatores operacionais. Assim neste trabalho é proposta uma metodologia para a criação de um sistema de avaliação e certificação da qualidade de ferramentas

destruidoras, ou seja, é proposta uma metodologia para acreditação de ferramentas destruidoras de partes de colunas utilizadas em poços de petróleo.

Neste sentido procurou-se estabelecer uma cadeia de ensaios e procedimentos com o objetivo de qualificar desde o recebimento dos consumíveis através da análise de imagens e testes gravimétricos; criar e avaliar ensaios padrão de produção através de testes de impacto de Izod modificado, além de ensaios simulativos operacionais. Assim, o objetivo global do projeto foi estudar a viabilidade e desenvolver metodologias para qualificar procedimentos de fabricação e de aceitabilidade de consumíveis e desenvolver um ensaio simulativo para comparar desempenho de ferramentas de destruição. Assim, as três metas seguintes foram propostas, observando a visão geral do trabalho foram:

a) Propor um ensaio padrão de recebimento de consumíveis para brasagem;

b) Propor um ensaio padrão de produção (do material já brasado após o consumível qualificado);

c) Propor um ensaio padrão para simular a operação de destruição dos objetos aprisionados no poço (“peixe”) em condições laboratoriais (simulação física).

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A perfuração de poços de petróleo segue uma série de procedimentos e sequência de etapas muito bem ordenada que devam ser executadas de forma concisa para que o tempo de execução total seja o menor possível.

As etapas podem ser definidas, de forma simples e generalizadas, como prospecção, perfuração, avaliação da formação, completação e extração.

Neste trabalho, a etapa de perfuração, será descrita com maiores detalhes, por ser uma etapa fundamental para entendimento do trabalho. Isto porque, a operação de perfuração e destruição possui diversas características próximas e, quando necessária, a segunda completa a primeira num contexto indireto.

2.1. Princípios de perfuração de poços de petróleo

Dois métodos de perfuração são possíveis: a percussão e rotativo. No método a percussão, as rochas são golpeadas por uma broca pontiaguda de aço com movimentos alternados ocasionando fraturamento ou esmagamento. Periodicamente é preciso remover os detritos cortados pela broca, o que é conseguido através da descida no poço de um tubo equipado com uma alça na sua extremidade superior e uma válvula na inferior (caçamba). Isto provoca a entrada na caçamba dos detritos, que são retirados do poço. Este processo,

por suas características, é muito limitado, atingindo profundidades máximas entre 200 e 250 metros (LIMA, 2001).

O segundo método é a perfuração rotativa que é realizada com a utilização de uma sonda de perfuração, conforme mostrada na Figura 2.1. Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e do peso aplicado a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas), tubos semiflexíveis de peso intermediário entre os tubos de perfuração e os comandos, equipamentos submarinos de cruzamento diversos, tubos de perfuração (tubos de paredes menos espessas) e outros.

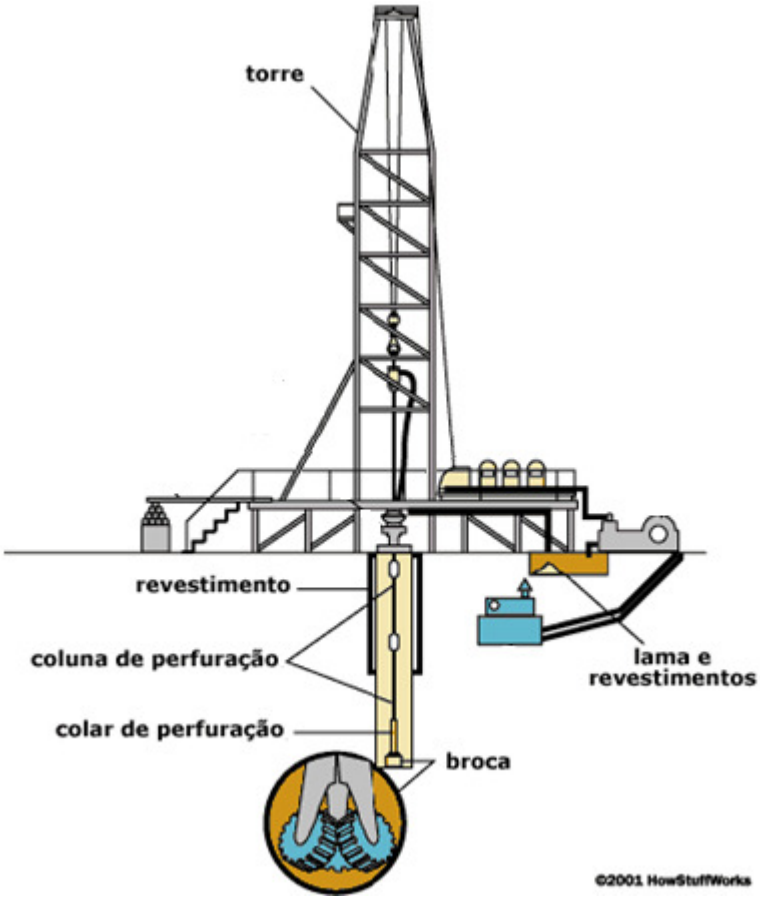


Figura 2. 1 – Ilustração de uma sonda de perfuração

Os fragmentos da rocha são removidos continuamente, através de um fluido de perfuração (lama). Esse fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração, através da cabeça de injeção (*swivel*) e retorna à superfície pelo espaço anular, formado pelas paredes do poço e pela coluna. Ao atingir determinada profundidade, a

coluna de perfuração é retirada do poço e é descida uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca.

O anular entre os tubos do revestimento e as paredes do poço é cimentado, com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo então, com segurança, o avanço da perfuração. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é de novo descida no poço, tendo, na sua extremidade, uma nova broca, de diâmetro menor que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração (SILVA e SANTOS, 2008).

Segundo Corrêa (2003), as fases de perfuração de um poço de petróleo são, sucintamente, definidas como: tudo condutor, a fase de superfície, a fase intermediária e a fase final ou de perfuração, descritas a seguir.

A primeira operação em um poço é a descida de um tubo condutor, que são tubos de grandes diâmetros – variando de 20 a 30 polegadas – para conduzir a lama de perfuração, que retorna do fundo do poço, para os tanques de lama. Com brocas de 26 ou 36 polegadas estes tubos podem estar assentados por cravação ou perfurando, até uma profundidade segura, dependendo das formações superficiais e cimentados até a superfície.

Concluída a fase do tubo condutor, é instalada a base guia permanente, onde irá ser imposto o *Blow out prevetion* (BOP) e acunhado o revestimento que será descido na fase denominada de superfície. Iniciando a perfuração do poço a broca de perfuração é conectada num sub, para evitar o desgaste da rosca do comando logo acima, o qual é conectado aos outros comandos, que irão dar o peso sobre a broca. Entre os comandos, estabilizadores são colocados, para evitar que o poço desvie o mínimo possível da vertical e acima destes comandos ficam localizados os tubos de perfuração. À medida que o poço vai adquirindo uma maior profundidade, os comandos e tubos são conectados. Para dar movimentação de rotação (provido pela mesa rotativa) a broca, acima deste conjunto fica conectada o *Kelly* (haste quadrada). Inicia-se a perfuração com todos esses sistemas conectados, começando pela injeção de lama. A Figura 2.2 mostra uma broca de perfuração com a utilização do fluído de perfuração.

A fase da superfície é perfurada, geralmente, com brocas variando de 44,45 a 66,04 centímetros. Então é descido um revestimento de aço especial de 34 a 50,8 centímetros. Após a cimentação é instalado o BOP, para garantir a segurança do poço.

A fase intermediária prossegue com o teste do BOP e a perfuração com brocas menores que variam de 31 a 44,5 centímetros, conforme seja o revestimento a ser assentado nesta fase. Ao ser atingido certa profundidade, o poço é perfilado e em seguida condicionado para descer e cimentar o revestimento intermediário. Este revestimento é ancorado na superfície no conjunto da base permanente. O BOP é novamente testado, após a pega do cimento, com pressões de 10.000 psi.

Figura 2. 2 – Broca de perfuração utilizando fluído de perfuração (lama) (Halliburton, 2010)

Diminuindo mais uma vez o diâmetro da broca, agora entre 21,6 a 32,0 centímetros, tem-se a fase final ou de produção. É realizada mais uma vez o revestimento dentro do poço. Caso seja necessária a continuação da perfuração, esta é realizada com uma broca menor com 19 centímetros até o fim do poço. O poço é então perfilado, com todos os perfis que possam indicar se há zonas de óleo ou gás. Nesta fase é que se pode definir se o poço tem chance de ser produtor ou não.

Conjugando-se os perfis das fases anteriores e os desta, podem ser programados testes das formações para melhor avaliar a potencialidade de produção do poço.

No caso de poço produtor, poderá ser descido um revestimento de 17,8 centímetros, com os mesmos procedimentos anteriores, que funcionará como revestimento de produção, ou então em profundidade inferior, onde será assentado em cunhas especiais, sendo então chamado de *linner*.

Ainda na fase final ou de produção pode ser programado um teste de formação de longa duração para determinar a real produtividade do poço. Estes testes são feitos com uma coluna, na qual se colocam dois *packers* (vedadores de borracha infláveis, sob pressão), para isolar o intervalo a ser testado, tendo entre eles uma série de tubos perfurados, por onde penetrará o fluído da formação, quando se abrir uma válvula que

permite a entrada dos fluidos para dentro da tubulação e, quando necessário, surgindo na superfície, onde será direcionado para tanques para tal fim.

O revestimento de produção não é descido e o poço é tamponado com o deslocamento de pastas de cimento (tampões), quando classificado como seco, através da tubulação de perfuração, posicionadas em profundidades estudadas, a fim de isolar zonas que possam produzir qualquer tipo de fluído. Desse modo o número de tampões varia de acordo com a quantidade de zonas a serem isoladas.

O poço é perfurado em diversas fases, cujo número depende das características das rochas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. Geralmente, o número das fases de um poço é de três ou quatro, podendo chegar a oito, em determinados casos (BAKER HUGHES, 2002).

Segundo Rocha (2008), torque, arraste e flambagem são resultados diretos de uma série de fatores que incluem trajetória do poço, coluna de perfuração, diâmetro do poço, tipo de revestimento, limpeza do poço, fluído de perfuração e tipo de completação. Limitações devido ao arraste, torque e flambagem podem ocorrer tanto na fase de perfuração quanto na completação de poços direcionais. Normalmente essas grandezas são parâmetros de controle baseadas na experiência do operador. Uma vez que não há uma ciência exata para a operação.

2.2. Brocas de perfuração

Um dos componentes mais básicos de uma coluna da perfuração são as brocas. Sua seleção depende de diversos fatores, que incluem a qualidade de limpeza do poço e os tipos de formações a serem atravessadas.

Existem vários tipos de brocas, embora sejam classificadas de acordo com suas partes cortantes, que podem ser móveis (*roller cone bit*) ou não (*drag bit*).

A inexistência das partes móveis pode ser considerada uma vantagem quando comparada as brocas *roller cone*. Isto porque as brocas com partes móveis danificam com maior dificuldade. As brocas do tipo *drag* podem ser agrupadas em: integral com lâminas de aço, diamantes naturais e diamantes artificiais (PDC – *Polycrystalline Diamond Compact* e TSP – *Thermally Stable Polycrystalline*). As Figuras 2.3 a 2.5 mostram respectivamente os três últimos de brocas citadas.

Figura 2. 3 – Cabeça de broca do tipo drag de diamantes naturais (Smith *Technologies*, 2010)

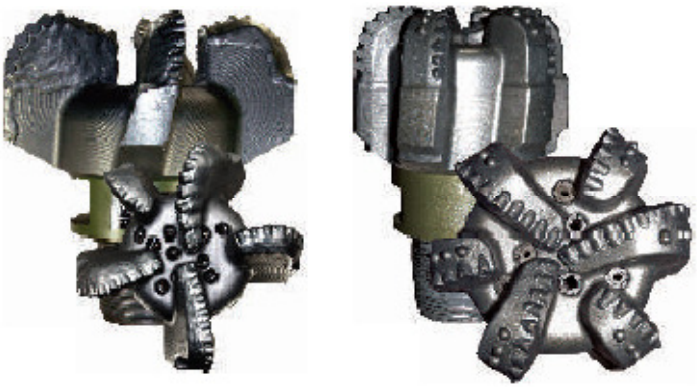


Figura 2. 4 – Cabeça de broca do tipo drag modelo Standard PDC Bits (Smith *Technologies*, 2010)

Figura 2. 5 – Cabeça de broca do tipo drag do tipo TSP (China Suppliers, 2010)

É importante destacar que nem todas as brocas classificadas como partes não móveis usam o araste como principio de corte. Como por exemplo, as brocas de diamante natural trabalham por esmerilhamento.

As brocas com partes móveis podem perfurar um número maior de tipos de formações quando comparada com a PDC. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram brocas *roller* cone de modelos diferentes. Entretanto, prefere-se o uso de brocas do tipo *drag* (PDC ou de diamante) em função do custo diário. Em geral, esses tipos de broca também apresentam um melhor desempenho em seções de formação uniformes. São aplicadas em formações macias, firmes, não muito duras, não-abrasivas e que não sejam pegajosas (*gummy*), para evitar o enceramento da broca.

Figura 2. 6 – Cabeça de broca do tipo *roller* cone do tipo tricônica modelo *Gemini* (*Smith International*, 2010)

Figura 2. 7 – Cabeça de broca do tipo roller cone do tipo tricônica modelo Shamal TNG (*Smith International*,2010)

Em formações mais duras, que geram maior calor durante a perfuração, a broca com insertos do tipo TSP são escolhidas, em vista que o calor destrói a ligação entre os diamantes e a liga de cobalto utilizada nas brocas de PDC.

A escolha da broca de perfuração não é escolhida apenas com base na formação que será trabalhada e também nas condições operacionais. A Tabela 2.1 apresenta um exemplo das condições operacionais que limitam a aplicabilidade das brocas do tipo *roller* cone com insertos (ROCHA, 2008).

Como as brocas de perfuração são uns dos itens mais onerosos na perfuração de um poço de petróleo, torna-se necessário um estudo cuidadoso, para aprimorar sua utilização. Para que sejam empregadas num número menor possível e com maior rendimento. (CORRÊA, 2003)

Segundo Rocha (2008), a broca de perfuração se desviar na direção lateral durante a perfuração é uma tendência natural. A mudança da direção do poço ocorre em consequência da rotação da coluna e da broca, ocorrendo normalmente para a direita. O desenho da trajetória do poço e o planejamento das operações de perfuração devem ser considerar esse fato, principalmente em áreas onde o *bit walk* (giro da broca) pode levar grandes desvios na trajetória.

2.3. Operações especiais

Durante a perfuração de um poço, podem ocorrer várias operações especiais, tais como: controle de *kicks*, operações de pescaria e testemunhagem. *Kick* é a perda de controle do fluido de perfuração. “Pescaria” na indústria do petróleo serve para designar a remoção de objetos que impeçam a continuidade da perfuração. A operação de testemunhagem é o processo de obtenção de uma amostra real da rocha de subsuperfície (CUNHA, 2002).

Destaca-se aqui a operação de pescaria. Onde na indústria do petróleo se utiliza o termo “peixe” para caracterizar objetos que impossibilitam o processo de perfuração de poços petróleo. Estes objetos podem ter se partido, caído ou tiver ficado dentro do poço. Logo, o termo “pescaria” designa a o processo de remoção do “peixe”.

Tabela 2. 1 - Parâmetros de Perfuração de Brocas Roller Cone com Insertos de Carboneto de Tungstênio

Tipo de Broca	IADC	Resistência Compressiva da Formação	Intervalo de Rotação		Intervalo de Aplicação para Motores	
			Peso	RPM	Peso	RPM
			(LBS/POL. Diam. Broca) (Deca Newton = LBS X 0,445)		(LBS/POL. Diam. Broca) (Deca Newton = LBS X 0,445)	
XT/XL/XS 00 a 05	415/417	*Very Soft-Low Compressive Strength*	1000-5000	160-70	1000-4000	300-80
XT/XL/XS 06 a 09	425/427	*Soft-Low Compressive Strength*	1500-500	160-70	1000-4000	300-80
XT/XL/XS 10 a 13	435/437	*Soft-Low Compressive Strength*	2000-5000	160-70	1000-4000	300-80
XT/XL/XS 14 a 17	445/447	*Soft-Low Compressive Strength*	2000-5000	140-60	1000-4000	250-80
XT/XL/XS 18 a 23	515/517	*Soft-Low Compressive Strength*	2000-6000	140-50	1000-4000	250-80
XT/XL/XS 24 a 27	525/527	*Soft-Medium Compressive Strength*	2000-6000	120-50	1000-4000	250-80
XT/XL/XS 28 a 33	535/537	*Soft-Medium Compressive Strength*	3000-7000	100-40	2000-3000	220-80
XT/XL/XS 34 a 39	545/547	*Soft-Medium Compressive Strength*	3000-7000	80-40	2000-3000	220-80
XT/XL/XS 40 a 45	615/617	*Medium-High Compressive Strength*	3000-7000	80-40	2000-3000	220-80
XT/XL/XS 46 a 51	625/627	*Medium-High Compressive Strength*	3500-7000	80-40	2500-3500	150-80

A necessidade de remover um equipamento perdido em poços é mais antiga que a indústria de perfuração. Antigamente, perfuradores usavam um gancho amarrado a uma corda para recuperar ferramentas de perfuração esquecidas por engano nos poços. O material e a operação são similares à arte dos pescadores batizando o processo de recuperar a ferramenta perdida de “pescaria” (MOORE, 1955). O museu de Louisiana, EUA, possui um equipamento de perfuração rotativa, incluindo ferramentas de “pesca”, usado para perfurar três poços de petróleo datado do ano de 1823. Um engenheiro francês desenvolveu o equipamento, e um escravo africano o construiu (BRANTLY, 1961).

O processo de pescaria é normalmente utilizado devido à prisão da coluna de perfuração, ruptura da broca ou queda de seus cones e/ou acessórios, onde estes são os casos mais típicos.

A utilização de materiais comuns, em geral aço carbono, nas hastes de bombeio devido ao seu baixo custo, nos poços maduros de petróleo localizado nos estados de Sergipe, Alagoas, Bahia e Rio Grande do Norte, os quais são submetidos a esforços mecânicos combinados do tipo tração-compressão-abrasão, adicionados ainda com a presença de ambientes agressivos (produção de petróleo em poços com presença de água, CO_2, H_2S, salinidade etc.), induz a degeneração drástica do material levando-o até a ruptura.

Este tipo de falha, que reduz substancialmente o tempo de vida em serviço das hastes, apresenta-se constantemente em períodos aleatórios e curtos, impossibilitando qualquer planejamento das equipes relacionadas com manutenção do sistema de produção. Os transtornos operacionais, a diminuição na produção do petróleo, a “energia” aplicada (alto custo) para recolocar o sistema em funcionamento com frequente substituição de materiais e/ou equipamentos, tem-se caracterizado como um grave problema da indústria do petróleo (BEZERRA, 2007).

Segundo Thomas (2001), a operação de pescaria pode ser realizada de diversas formas:

a) Pescaria de pequenos objetos

Remoção de pequenos objetos (cones, rolamentos de broas, pequenas ferramentas, parafusos, etc) utilizando magneto, subcesta ou cesta de circulação reversa como principais ferramentas.

b) Pescaria de elementos tubulares

Desenroscamento da coluna, quebra da coluna, queda da coluna poço e prisão da coluna, são as principais causas de pescaria de elementos tubulares. No caso do aprisionamento da coluna, primeiramente é necessário determinar o ponto de prisão para recuperar a porção livre da mesma. Após a determinação deste ponto, uma carga explosiva é descida e posicionada em frente à conexão logo acima do ponto de prisão. Em seguida, a

coluna é submetida a uma torção à esquerda (sentido de desenroscamento) e a carga é explodida. Com o impacto, a conexão se desenrosca e a coluna é retirada do poço. A coluna de pescaria é descida contendo na extremidade inferior uma ferramenta agarradora e percursores para permitir impactos no “peixe” para cima ou para baixo.

c) Pescaria de ferramentas descidas a cabo:

A ruptura de ferramentas descidas a cabo pode ocorrer e assim levar a uma operação de pescaria. Neste caso um arpão é utilizado, sendo descido no poço com uma coluna de tubos de perfuração. O cabo partido se enrosca às garras do arpão, enquanto a coluna de perfuração é rotacionada.

Muitos dos casos que necessitam da operação de pescaria podem ser evitados pelo planejamento cuidadoso da operação de operação de perfuração e sendo atento para os possíveis problemas que podem ocorrer.

As principais causas são:

1. Fadiga mecânica dos componentes da coluna de perfuração representa uma grande porção dos “peixes” e lixo deixados no poço. A mais comum localização da falha da coluna de perfuração é no tudo de perfurção, logo abaixo dos colares de perfuração, normalmente na base da junta da ferramenta da chaveta roscada. Também, colares de perfuração são conhecidos por falhas localizadas. De novo, a base da chaveta roscada é a localização mais comum. Estas falhas são possivelmente prevenidas pela execução de testes não-destrutivos nesses componentes priorizando trocá-los. Assim programas de testes não destrutivos estão sendo responsáveis por reduzir a operação de pescaria a mais de duas décadas.
2. Pressão diferencial por alongamento, cavidades na parede do poço e acumulação de cortes são alguns dos problemas que podem causar o aprisionamento da coluna de perfuração. Frequentemente quando a coluna de perfuração começa a ficar presa é necessário descomprimir as porções não presas da coluna de perfuração, remover esta porção, e retirar o “peixe” com uma ferramenta reforçada. Geralmente existem sinais de prever que a coluna de perfuração possivelmente pode ficar presa pelo alongamento da coluna. A equipe de perfuração deve estar sempre estar atentos para estes sinais e reagir rapidamente. Se estes sinais não são ignorados, a operação de pescaria pode ser evitada.
3. Componentes de brocas quebradas são deixadas para trás no poço quando a coluna de perfuração é removida e ferramentas manuais outros objetos que caem no poço constituem peças sem valor precisam ser removidas. Estes

componentes não podem ser usinadas em operações normais de perfuração. Elas talvez possam ser usinadas com brocas de metal ou outros instrumentos especiais que eventualmente transformam estas peças em pedaços. Tais itens podem ser difíceis de serem removidos.

4. Cabos e cabos de aço podem partir devido à ferramenta começar a ficar emperrada. Tais cabos podem ser removidos por ferramentas especiais de "pescaria".
5. Tubulações de produção após longos períodos de uso no poço podem corroer e se ternarem fracos. Quando tais tubulações são removidas durante as finalizações do poço, estas tubulações podem falhar mecanicamente. Programas que tem minimizado a corrosão nos poços de produção vêem diminuindo a necessidade de operação de "pescaria".

Esta operação de "pescaria" sempre é indesejada durante a perfuração do poço de petróleo. Isto porque resulta em consequências desastrosas a perfuração, tanto por atraso quanto condições mecânicas.

2.4. A operação de destruição

A operação de pescaria pode ser ocasionalmente mais complicada do que o esperado. O caso mais típico para realizar esta operação é para remoção de revestimentos, ferramentas presas, tubulações e outros itens similares de forma que impossibilitam a operação de pescaria de forma direta. A ferramenta de destruição reduz o item em peças pequenas que podem removidas pelo fluído de perfuração ou peças maiores serem pescadas (LYNDE, 1995). Desta forma, se faz necessário realizar a operação de destruição, que atua diretamente na parte presa ou obstruidora, para posterior repescagem. Uma vez sendo realizada a manutenção da mesma e havendo necessidade de realizar a operação de destruição a broca de perfuração é substituída pela de destruição e se inicia o processo (PARVEEN, 2010).

2.4.1. A operação

Para realizar esta operação é utilizado o mesmo equipamento utilizado durante a perfuração. Poucas modificações são necessárias, para realizar esta operação, sendo a mais significativa a troca da broca de perfuração pela de destruição.

Parveen (2005), em seu manual sobre as brocas de destruição, descreve os seguintes passos para a realização da operação.

I- Descer a broca até deparar com o "peixe". Realizar o *spud*[2] sobre o peixe, para as mesmas condições de perfuração.

II- Iniciar com baixa rotação.

III- Iniciar com baixa carga.

IV- Caso o "peixe" esteja rodando, realizar o *spud* de duas a três vezes.

V- Após um ou dois pés (60 ou 91,5 cm) diminuir ou desligar as bombas de fluído.

VI- Realizar novamente o *spud*. Aumentar a rotação usando a pressão normal da bomba de fluído, aumentando a carga.

VII- Repetir os passos III e IV após alguns pés.

A Figura 2.8 mostra, dividindo basicamente em quatro etapas, a operação de pescaria auxiliada pela operação de destruição que são descritas a seguir (BAKER HUGHES, 2002):

Etapa 1 – a broca realiza o movimento vertical descendente e rotacional em direção ao "peixe", que neste caso é representado por uma coluna de perfuração que apresenta um aspecto de quebrada e torcida; impossibilitando a pescaria (FIG.2.8a).

Etapa 2 – a parte superior do "peixe" é destruída num determinado comprimento (FIG.2.8b).

Etapa 3 – nesta a broca de destruição se afasta do "peixe" e termina o processo de destruição, uma vez que o objeto se encontra em condições de ser pescado (FIG.2.8c).

Etapa 4 – a ferramenta de pescaria é reposta no sistema, onde tem a finalidade de pinçar a peça e desobstruir o poço de petróleo (FIG.2.8d).

Esta operação pode ter cerca de 1 a 3 dias de operação. Como o valor diário de uma sonda de perfuração é da ordem de U$ 500 a U$ 700 mil (SERMÃO, 2009), qualquer perda de tempo evitada retorna valores positivos significativos.

Esta variação de tempo se dá pelas complicações que podem ocorrer durante a operação. Esta não segue uma norma, sendo utilizados os parâmetros utilizados sugeridos pelas empresas fabricantes destes equipamentos e terceirizadas que a realizam.

---

[2] *Este termo consiste, segundo o dicionário Oilgasglossary (2010), o movimento da broca de subir e descer uma pequena distância sem rotação.*

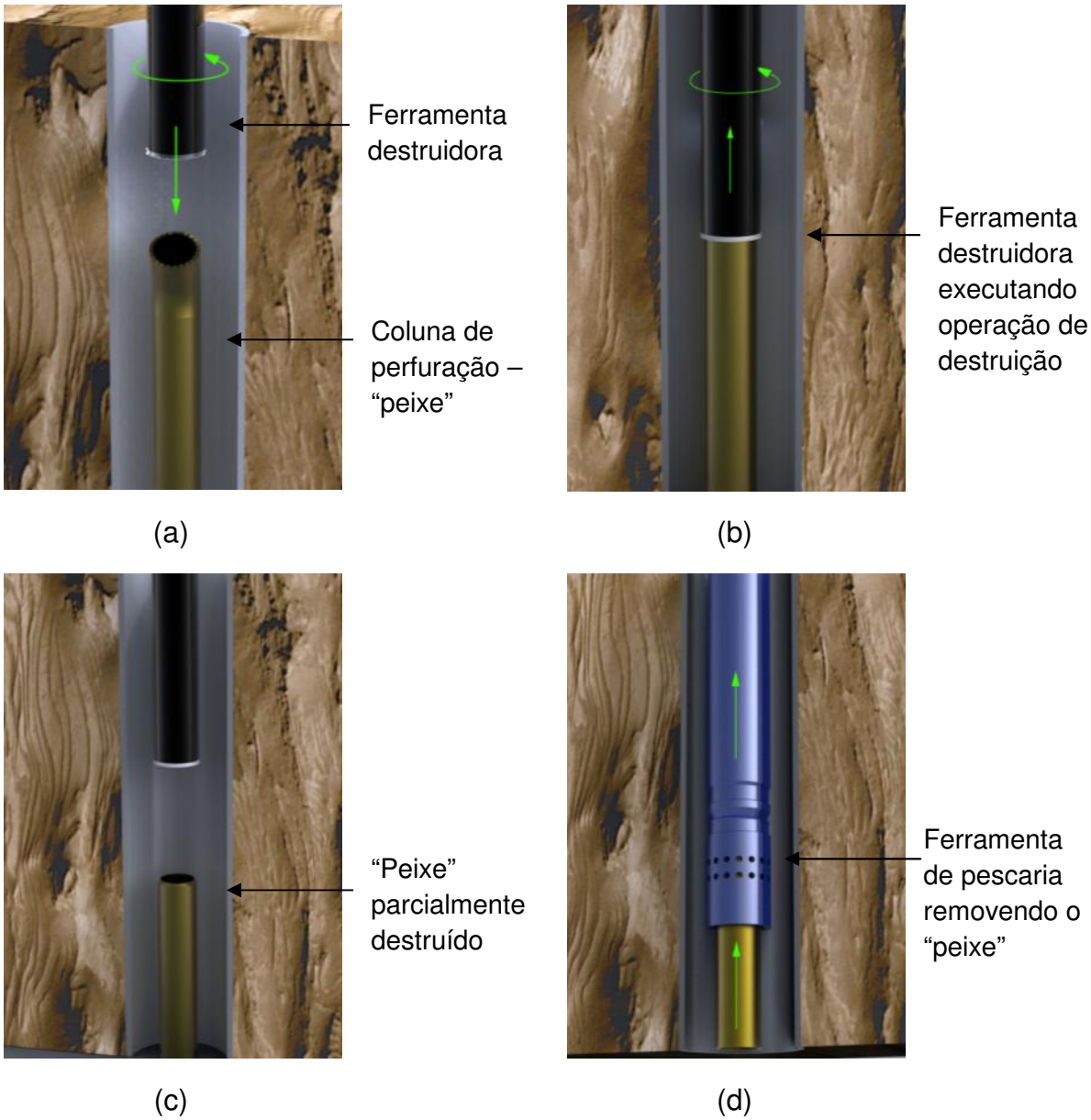


Figura 2. 8 – Representação da operação de destruição em poços de petróleo para remoção de uma coluna de perfuração onde em (a) mostra a broca de destruição descendo com a rotação acionada ao encontro da coluna, em (b) a broca triturando o “peixe” até o momento em que possua a forma necessária para ser pescado, em (c) a coluna de perfuração pronta para ser removida pelo processo de pescaria, (d) mostra a ferramenta retirando o “peixe” do poço

2.4.2. Parâmetros

A literatura técnica é escassa quanto aos parâmetros da operação de destruição. Foram realizadas pesquisas em sites de fabricantes, manuais, artigos e livros.

A maior parte do material encontrado é relatada nos manuais de operações das empresas. Os parâmetros utilizados, em sua maioria, se baseiam na rotação e força aplicada. A Tabela 2.2 mostra os valores sugeridos pelos fabricantes para esta operação.

Tabela 2. 2 – Parâmetros utilizados na operação de destruição segundo os manuais de execução.

Empresa	**Parâmetros**	
	Rotação (rpm)	**Carga (lbf)**
GSLM Ltda (2008)	100	10.000 – 50.000
Charminar (2010)	100	4.000 – 10.000
Parveen (2005)	60 – 100	4.000 – 6.000

A empresa Charminar (2010), em seu manual, relata que a rotação utilizada para uma boa operação normalmente é determinada pela intuição e experiência do operador. Quando usada uma broca pequena, cerca de 8 ½" de diâmetro, a rotação pode subir para 150 rpm, mas geralmente é mantida em cerca de 100 rpm para prevenir que a broca de perfuração saia da trajetória. Se for utilizado um maior valor de rotação pode ocorrer da broca ficar presa com o "peixe" e para se soltar é necessário aplicar uma grande força em sentido contrário ao utilizado primeiramente. Esta violentas condições podem gerar quebras nas juntas do equipamento e desgaste prematuro.

A seguir são apresentados alguns dos inúmeros modelos estabelecidos por diversos pesquisadores a necessidade de um estudo para entender como ocorre a penetração dentro dos poços de petróleo. Isto mostra a variabilidade dos modelos propostos e de como ainda precisa ser explorado.

Algumas empresas adotam uma fórmula que determina a faixa que deve ser utilizada para cada broca e materiais que participam do processo. A Equação 2.1 necessita, como dados de entrada, os limites superiores e inferiores para velocidade de corte dos materiais e o diâmetro da broca utilizado.

$$Rotação = \frac{Velocidade_de_corte}{DIA \cdot \pi} \tag{2.1}$$

Utilizando a broca citada acima de 8 ½" de DIA (diâmetro da broca) e sabendo que a velocidade de corte para o carboneto de tungstênio usinar o aço é entre 3000 e 4000 polegadas por minuto (CHARMINAR, 2010), tem-se:

$$Rotação_mínima = \frac{3000}{85/8x3{,}14} = 111rpm$$

$$Rotação_máxima = \frac{4000}{85/8x3{,}14} = 148rpm$$

Outro parâmetro, muito importante e largamente utilizado, é o *rate of penetration* (ROP), ou seja, a taxa de penetração (CHARMINAR, 2010). Este tipo de análise pode ser realizada através de diversos modelos. Cada modelo explora a ROP se baseando em diversos parâmetros de entrada e saída. Um modelo bastante reconhecido é o de Bourgoyne & Young (1974). Este modelo é uma função de variáveis como compactação de sedimentos, peso aplicado, velocidade de rotação, força impacto, desgaste da ferramenta e pressão, mostrados pelas Equações 2.2 a 2.10. O modelo é matematicamente expresso por:

$$ROP = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \times f_6 \times f_7 \times f_8 \qquad 2.2$$

Onde de f_1 e f_8 expressa os diferentes efeitos na ROP. As fórmulas de f_1 a f_8 possuem constantes experimentais que variam a_1 a a_8. Onde as equações de f_1 a f_8 são expressas por:

$$f_1 = e^{2{,}303a_1} \qquad 2.3$$

$$f_2 = e^{2{,}303a_2(10000-D)} \qquad 2.4$$

$$f_3 = e^{2{,}303a_3D^{0{,}69}(g_p-9)} \qquad 2.5$$

$$f_4 = e^{2{,}303a_4D(g_p-P_c)} \qquad 2.6$$

$$f_5 = [\frac{\frac{w}{d_B}-(\frac{w}{DIA})t}{4-(\frac{w}{d})t}]a_5 \qquad 2.7$$

$$f_6 = (\frac{N}{60})a_6 \qquad 2.8$$

$$f_7 = e^{-a_7 \times h} \qquad 2.9$$

$$f_8 = (\frac{F_j}{1000})a_8 \qquad 2.10$$

Onde, D é a profundidade em pés, g_p a pressão de saída (Kg/galão), P_c peso da lama (Kg/galão), W a força aplicada na operação, DIA o diâmetro da broca, N a rotação em RPM, h o desgaste da broca e F_j é descrito anteriormente por Borgouyne & Young (1974). Já as funções f_1 a f_8 representam respectivamente, o efeito da perfuração da rocha, da profundidade, da pressão, do aumento da massa do fluído de perfuração, pela mudança da carga sobre a broca, da velocidade de rotação, do desgaste da broca e o impacto da força do jato utilizado.

Segundo Kaiser (2007), a ROP pode ser calculada baseada na força, diâmetro da broca e energia mecânica especifica como mostrado na Equação 2.11.

$$ROP = (2538 \times W)/(MSE \times DIA^2) \qquad 2.11$$

Onde W é a força aplicada na operação, DIA o diâmetro da broca e MSE é a energia mecânica específica, ou seja, que significa a quantidade de energia requerida por unidade de volume de rocha perfurada. Com essas três variáveis é possível verificar a taxa de penetração.

Outros autores como Caicedo e Calhoun (2005) e Vega, Vieira e Martins (2010) também procuram desenvolver modelos que se adéquem as necessidades presentes em cada caso estudado. Sendo assim, não há um modelo definitivo, que seja usado como principal.

Também é possível analisar através dos resultados das perfurações a condição que resultou na melhor condição de custo e beneficio. Isto é possível pela análise do custo métrico (C_M). A Equação 2.12 mostra a relação que pode ser feita na comparação entre brocas (THOMAS, 2001).

$$C_M = \frac{C_B + C_H \times (t_p + t_m)}{M_p} \qquad 2.12$$

Onde, C_M é o custo métrico, C_B o custo das brocas, C_H o custo horário da sonda de perfuração, t_p o tempo gasto perfurando, t_m o tempo gasto manobrando e M_p o intervalo perfurado.

A escolha do momento certo pra trocar a broca é baseada no acompanhamento do custo métrico em intervalos de tempo predeterminados. Quando este custo começar a aumentar é um bom indicativo da necessidade da troca de broca. Outros parâmetros que devem ser analisados para a retirada de uma broca são torque na mesa rotativa e a taxa de penetração.

2.4.3. A ferramenta de destruição

Com aspectos similares as brocas de perfuração, as de destruição são produzidas com materiais de alta resistência. Para esta operação normalmente são utilizadas brocas com insertos de carbonetos de tungstênio uma vez que na maior parte dos casos o material preso, o “peixe”, é constituído de material metálico de elevada dureza.

Um dos problemas que podem ser apontados está na broca utilizada nesta operação. Estas muitas das vezes recebem manutenções ou até mesmo produzidas na própria empresa que a utiliza. A Figura 2.9 mostra uma broca de WC-Co (carbonetos de tungstênio com adição de cobalto), sendo do tipo F e M que se diferenciam pela quantidade de material utilizado.

Figura 2. 9 – Broca com insertos de carboneto de tungstênio (Gasoil, 2010).

Os insertos de WC-Co são materiais de elevada dureza. Esta pode ser influenciada de acordo com a porcentagem de cobalto na composição do carboneto, assim como a sua dimensão. A Tabela 2.3 mostra os valores de dureza segundo Saito, Iwabuchi, Shimizu (2005) determinados em laboratório.

Assim como nos testes realizados por Yang, Senda, Ohmorib (2003), que tinham como objetivo de analisar o comportamento do desgaste e fricção dos carbonetos, seus testes mostraram que aumentando as dimensões dos grãos e mantendo a massa de cobalto o valor da dureza neste caso diminui. Com isto pode-se observar que há uma dependência

no tamanho do grão para analisar sua resistência. A Tabela 2.4 mostra os dados levantados a partir de testes realizados no laboratório.

Tabela 2. 3 - Dureza dos carbetos de tungstênio segundo a variação da composição de Co e dimensões (SAITO, IWABUCHI, SHIMIZU, 2005) - adaptada

Amostra n°	Dureza Vickers	Co (wt%)	Média da dimensão do WC (µm)
1	1647	6,41	2,18
2	1398	13,03	2,05
3	1228	16,83	2,43
4	1202	19,04	1,93
5	1056	21,56	2,39
6	1183	5,68	4,9
7	1061	17,87	5,03
8	949	14,51	6
9	871	19,49	5,93

Tabela 2. 4 – Tensão de ruptura transversal em relação a dimensão do carbeto e sua composição (YANG, SENDA, OHMORIB, 2003)

Material	Composição de Co		Dimensão do grão do carboneto (µm)	Dureza HV10	Tensão de ruptura transversal (Mpa)
	Massa %	Vol. %			
WC-6 %Co	6	10,1	1	1550	1620
WC-8 %Co	8	13,4	1,1	1420	1950
WC-11 %Co	11	18	1,2	1350	2180
WC-15 %Co	15	23,6	1,2	1150	2700
WC-20 %Co	20	30,6	1,3	920	2750
WC-20 %Co-c	20	30,6	1,5	890	2680

Para a manutenção das brocas de destruição são utilizadas varetas com insertos de carboneto de tungstênio em uma matriz de alpaca. Esta é constituída de uma liga níquel (Ni), cobre, (Cu) e zinco (Zn). Sua composição mais tradicional, segundo o fabricante Coksa (2010), é composta por 12% Ni e 23% Zn (restante Cu), levando a este material possuir as seguintes propriedades que podem ser vistas na Tabela 2.5.

Tabela 2. 5 – Características da alpaca (Coksa,2010)

Tipo	**K-704 Cu Ni 12 Zn 23**
Resistência a tração (Kg/mm^2)	47-70

Limite de elasticidade (Kg/mm^2)	36-60
Dureza Brinell	125-190
Condutividade elétrica I.A.C.S.	7

A alpaca, também conhecida como prata alemã, possui uma boa resistência aos meios corrosivos, devido à adição de Ni. Este material é o mais indicado também pela boa tenacidade do material, ou seja, a capacidade de absorver impactos durante a operação de destruição. Como foi dito anteriormente pode ser utilizada como parâmetro a carga aplicada da broca sobre o “peixe”. Esta carga podendo chegar 50.000 lbf, mesmo sendo mais usar entre a faixa de 2.000 a 5.000 lbf.

A Figura 2.10 mostra algumas varetas de alpaca com carbonetos de WC-Co. Estas varetas apresentam granulações variadas sendo utilizadas na recuperação, manutenção e produção de brocas destruidoras.

No caso destas varetas (que serão parte de estudo do caso) a sua produção foi realizada em fornos apoiadas em uma base. O que confere uma distribuição extremamente irregular ou inexistente dos WC-Co. O outro lado apresenta os carbonetos distribuídos de melhor forma, mesmo assim não podendo alegar homogeneidade em sua distribuição. As Figuras 2.11a e 2.11b mostram, respectivamente, a parte “superior” e “inferior” das varetas de WC-Co.

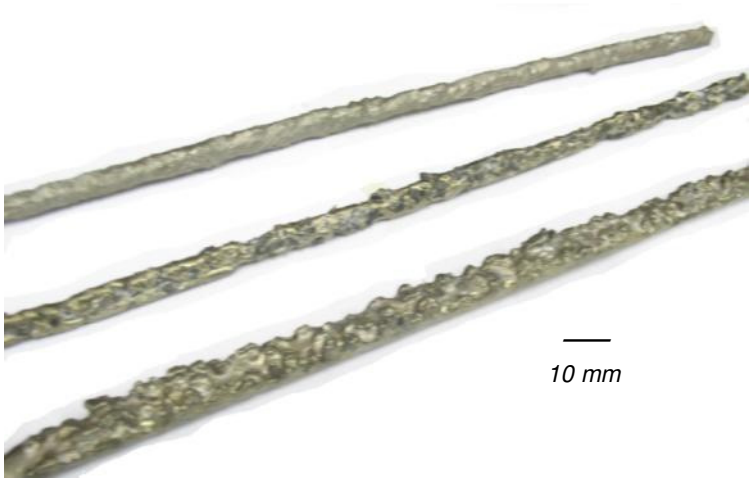


Figura 2. 10 – Amostra de varetas de WC-Co (Kutrite, 2008).

(a) (b)

Figura 2. 11 – Exemplo de amostra de varetas de WC-Co, onde (a) mostra a vista “superior” e (b) mostra a vista “inferior” (Kutrite, 2008).

A aplicação destas varetas sobre o substrato e consequente confecção da ferramenta destruidora, se dá através do processo de brasagem, ou seja, sem fusão do substrato, onde a adesão do material a peça é baseada principalmente em dois fatores a capilaridade do material de base e molhabilidade do material de adesão (ASM, 1993 e HAUSER, 2008).

Hauser (2008) mostra que, diretamente relacionado com a fabricação de ferramentas destruidoras, utilizar o processo de brasagem tem como vantagem a possibilidade de combinação de diferentes metais e não-metais, o fato de que materiais de espessuras diferentes podem ser utilizados e grandes áreas ou juntas podem ser utilizadas. Em contrapartida, o mesmo autor apresenta como limitações da brasagem a necessidade do material de base estar em bom estado e muito bem limpo, podendo necessitar remover o fluxo após a união, o fato do processo pode ser relativamente lento, dependendo das dimensões e do método de aquecimento, sendo altamente necessário cuidado no controle do processo.

Entretanto, mesmo se atentando aos cuidados citados nas limitações, para uma melhor confecção da broca esta operação apresenta resultados inconstantes em relação ao tempo total. Pozas (2003) mostrou que durante uma visita à plataforma SS48 no campo de Coral, notou que um dos maiores empecilhos ao bom andamento da perfuração dos poços é a falta de informações sobre o estado da broca. Em um evento ocorrido durante a visita, a coluna foi retirada totalmente do poço e foi observado que havia um problema com o jato da broca. Se o sondador soubesse que este era o problema talvez não tivesse sido necessário retirar toda a coluna do poço e, desse modo, tempo e dinheiro seriam economizados. Mostrando que o conhecimento mais amplo das atribuições da broca ajuda a evitar eventos inesperados, na manobra da sonda ou ainda na otimização da perfuração.

Tal assertiva reforça o comentário anteriormente realizado sobre o manual da empresa Parveen (2005), que trata sobre ferramentas de “pescaria” e destruição. Neste manual relata, em um de seus passos, que a operação deve ser realizada pelo o que o operador julgar melhor, ou seja, é altamente dependente de conhecimento particular, dificultando a criação e consolidação de um sistema global que possibilite a garantia da qualidade de ferramentas destruidoras e da sua não-falha em serviço. Desta forma, um sistema de acreditação que proponha solucionar tal impasse é de suma importância.

2.5. Casos práticos da operação de destruição

A literatura referente a casos práticos não é muito difundida. As poucas que foram relatadas e expostas aqui mostram a importância do conhecimento da operação e das suas respectivas ferramentas.

A empresa Welltonic (2010) apresenta algumas de atividades relacionadas com o a operação de pescaria e destruição. Estas atividades são relatadas dentro do período de 2002 a 2009, onde são relatados os objetivos e o modo de realização.

Em 2003, procurou-se retirar uma grossa camada de impureza retida no poço que provavelmente foi produzida pela utilização e solidificação do fluído de perfuração. De uma profundidade de 1401 m até a zona profunda da perfuração de 2800 m. Esta zona mais profunda estava retornando uma alta percentagem de água e era pretendido reperfurar o poço para uma zona que aumentasse a produção. Como resultados foram obtidos excelentes valores de ROP na remoção dessa camada e o incremento da produção foi o suficiente que não foi necessária a reperfuração do poço. A operação ocorreu com uma investida de 37 horas onde quase, numa extensão, de 1200 m do material foram removidos, resultando numa impressionante média de 32 m/h de ROP.

Também em outro caso no mesmo ano, a empresa teve o objetivo de remover o acúmulo de impurezas geradas pelo fluído de perfuração e mais 30 juntas de tubulação. Este poço apresentava um grande desvio e a as impurezas se encontravam entre a profundidade de 2600 e 2906 m. Tendo como finalidade incrementar a produção pela reperfuração depois da operação de remoção. A operação se mostrou difícil e eventualmente o motor e a broca requereram trocas devido os danos causados nos equipamentos causados pela operação. Ao mudar o material da broca, melhores resultados da ROP foram alcançados e a profundidade de 2906 m foi alcançada. Isso permitiu que o poço fosse reperfurado.

Em 2004, também ocorreu um caso em que o objetivo era recuperar o Plug superior e então o Plug inferior do Casing Monolock, que estavam presos na tubulação, para poder retomar acesso ao fundo do poço. Para recuperar o primeiro Plug foi necessário cimentar a parte superior do poço, onde foi perfurado em forma de cone. Após cerca de 44 horas de operação, foi possível recuperar o primeiro Plug. O segundo Plug foi recuperado utilizando Coiled Tubing[3] e fluído removendo a peça na primeira tentativa. No entanto, a total de tempo da operação levaram 5 dias.

Em 2005, enquanto ocorria a completação do poço notou-se que a subcesta que foi instalada abaixo deste ponto de completação estava presa porque a ferramenta de pescaria possuía um diâmetro maior do que o disponível para recuperar o objeto. Então o objetivo da operação era recuperar a subcesta sem danificar a completação e sem arriscar a integridade do poço. Foi decidido triturar a ferramenta de pescaria, entretanto durante a operação notou-se que a subcesta tinha uma tendência de sair da posição tornando praticamente impossível a operação. Para sanar este problema foi construído um entrelaçado de fios foram introduzidos na ferramenta de pescaria que fora conectado com a subcesta. Isso garantiu que a operação de trituramento pudesse ser realizada sem que a subcesta tivesse risco de cair. O trabalho foi o maior sucesso com a ocorrência de oito atividades de Coiled Tubing, onde foram recuperados 4 peças (2 Plugs e 2 ponteiras). Este trabalho teve como resultado adicional o conhecimento empregado nesta situação que proporcionou um significativo ganho tecnológico e para a empresa que evitou altíssimas perdas monetárias.

Em 2006 o caso foi de desobstruir a tubulação que tinha camadas de sulfato de bário, carbonato de cálcio, sulfato de estrôncio e sulfureto de zinco que estavam localizados numa profundidade de 6797 m para recuperar a produção. Inicialmente era impossível passar através dessas camadas, então estas foram atacadas quimicamente e batidas com uma ferramenta rotativa. Desta forma foi possível reverter a situação e retomar a produção.

Em 2007, o objetivo era retirar um braço centralizador da linha que foi perdido no buraco e estava obstruindo o acesso ao fundo do poço. Após várias investidas consecutivas foi possível ganhar uma vantagem sobre a obstrução, que foi destruída e disponibilizou total acesso ao fundo do poço que proporcionou um avanço na perfuração tendo como resultado um adicional de 3000 barris por dia (bpd) na produção.

---

[3] *Uma tubulação de extensor comprimento. A tubulação a principio é imposta num poço de perfuração. Dependendo do diâmetro da tubulação (1" a 4 ½") e da profundidade do poço pode alcançar de 2000 ft a 15,000 ft (610 a 4570 m).*

Alguns meses depois, ainda em 2007, o objetivo era reabrir um poço para possibilitar perfurações abaixo do *Plug* de contenção para a injeção de gás. O cliente inicialmente utilizou outra empresa que desperdiçou 15 dias, sendo abortada a operação por não apresentar resultados satisfatórios. Todos os especialistas e os melhores equipamentos foram utilizados nesta operação que levou 8 dias e 14 investidas de *coiled tubing*. Após triturar o Plug foi possível iniciar a injeção de gás.

Em 2008, foi realizada uma operação para remover uma camada de sulfato de bário existente na profundidade de 3610 a 4236 m, para poder recuperar acesso ao fundo do poço. A broca foi posicionada a profundidade inicial de 3610 m, dando início a operação. Esta tarefa despendeu 60 horas de intensa operação de destruição. Onde foi alcançado o esperado.

Em 2009, o objetivo era retirar camadas de sulfato de bário[4] localizadas a uma profundidade de 4200 m até 4370 m onde seria possível retomar a produção. A operação durou cerca de 12 horas das quais 4 horas foram de extrema dificuldade devido a dureza do material. Esta operação utilizou apenas uma broca. Após esta etapa foi recuperado o acesso total ao fundo do poço, onde foi retrabalhado e garantiu um aumento na produção.

Como dito anteriormente apenas foi apresentado pela empresa alguns dos casos citados e escolhidos dentro deste grupo os de maior interesse a serem apresentados. Por fim, pode-se analisar do menor conjunto de casos alguns casos que merecem alguns comentários sobre sua análise econômica. O caso mais importante a ser considerando, onde o tempo total foi relatado, é o de 2007 onde levou 23 dias no total para retomar as operações. Considerando que só a sonda de perfuração pode ter um valor diário de U$500 mil a U$700mil, esta operação causou uma perda de U$11,5 milhões a U$16,1 milhões. É dito que operações de pescaria despendem 25% dos custos mundiais de perfuração (SHORT, 1995).

Segundo Cearley (2010), a regra principal da operação de pescaria é “saber quando tirar”. Todos devem trabalhar juntos para decidir por quanto tempo continuar a operação. Diariamente o custo de operação da pescaria deve ser examinado com severidade e comparado com o valor de abandono do “peixe”. Alguns estudos são realizados para este fim.

A Petrobrás conduziu uma avaliação de 3000 serviços de pescaria nas cinco maiores áreas de atuação (CUNHA; D’ALMEIDA, 1996). Um elegante modelo de análise de risco foi utilizado; onde foram geradas oitenta funções de densidade distintas.

---

[4] *Material com origem da combinação química de bário, sulfato e oxigênio que forma uma cama da de difícil remoção.*

A BP *Exploration* examinou 209 incidentes de tubulação presa e desenvolveu um método que aspira disponibilizar uma análise muita efetiva do tempo de custo da operação de pescaria (SCHOFIELD *et al*, 1992). O método utiliza apenas quatro variáveis numa fórmula algébrica para determinar o proporção de custo.

Os engenheiros da Mitchell *Energy* disponibilizaram um plano operacional para partida ou brocas presas (ADKINS, 1993). Com os fatores de risco da pescaria foram propostas tabelas com custos práticos estimados. Este estudo foi feito baseado na área de operação e a profundidade do poço.

Short (1995) oferece recomendações para operações de pescaria em poços com profundidade de 1500 m ou mais profundos. Quando o custo da operação de pescaria é igual a metade do custo de perfuração até a mesma profundidade, o equipamento deveria ser descido no caso posso de petróleo.

Devido à apresentação de diversos modelos significativos e nenhum como sendo o certo, muita responsabilidade se dá a habilidade do operador. “Sempre escolha o operador da operação de pescaria com mais cabelos grisalhos”, foi citado por Cearley (1998). Conhecimento experimental tem sido sempre a chave do sucesso desta operação.

Existe uma importante análise que deve ser levada em consideração em qualquer operação de “pescaria”. Embora os atuais custos desta operação normalmente sejam menores quando comparado aos equipamentos de perfuração e outros investimentos no poço, se o “peixe” ou outros entulhos não podem ser removidos do poço em um tempo hábil, talvez seja necessário realizar um desvio no poço em volta do “peixe” ou entulho, ou perfurar outro poço. Assim, a economia da operação de “pescaria” e os outros custos incidentes do poço devem ser cuidadosamente e continuamente considerados enquanto a operação de “pescaria” ocorre. É muito importante saber até quando esta operação se mostra economicamente viável (*HANDBOOK OF PETROLEUM*, 1996).

A operação de pescaria é complexa e arriscada. Todos os membros da equipe da operação devem contribuir para o sucesso. O engenheiro deve aprovar a seleção das ferramentas e procedimentos, mantendo em mente o controle do poço e segurança. Se existirem reservas suficientes abaixo do peixe, pode ser mais barato retirar o “peixe”. Se for evidente que o poço está com baixo rendimento, pode ser conveniente abandonar do que perder uma considerável quantidade de dinheiro. A contabilidade deve manter o custo diariamente e projeções com qual alerta o pessoal de operações que decide qual curso adotarem.

2.6. Normas associadas

As normas são críticas para as definições técnicas de instalações da indústria de petróleo e gás, indiferente se são de caráter nacional, regional, internacional ou industrial. Boas normas promovem a exploração, desenvolvimento e operação mais fácil numa indústria de complexidade crescente e globalizada. A indústria do petróleo e gás faz uso de centenas de normas, em conjunto com um número ainda maior de especificações das empresas e projetos.

As regulamentações dessas indústrias são normalmente ditadas por organizações e associações nacionais, com algumas exceções internacionais como a ILO (International Labor Organization) e IMO (International Maritime Organization). Isso, de forma incogitável, resulta diferenças nas regulamentações através dos países em função das diferentes práticas e culturas, com potencial para pequenas e grandes tecnologias que podem ser aplicadas. Muitas organizações usam as normas seguindo um padrão que segue uma hierarquia (Figura 2.12).

Caporali et al (2005) levantaram um registro das normas ISO associadas à indústria petrolífera e de gás natural. Onde foi encontrado um total de 709 normas ISO relacionadas à produção de petróleo. Dentre elas estão os mais diferentes assuntos que podem ser vistos na Tabela 2.6. Esta foi apresentada com a finalidade de evidenciar a abrangência de normas empregadas quando se refere à produção de óleo e gás, sendo que nenhuma se refere especificamente a operação de destruição ou as brocas relacionadas a mesma.

O tópico de materiais, equipamentos e estruturas *offshore* para petróleo, petroquímica e gases naturais e industriais apresenta 25 normas ISO específicas para perfuração. Entretanto nenhuma norma foi estabelecida e/ou desenvolvida para a operação de pescaria e/ou destruição.

A International Association of Oil & Gas Producers (2010) realizando uma análise mais abrangente das normas relacionadas à produção de óleo e gás foi estabelecido um estudo onde relaciona todas as normas internacionais. Foram encontradas 1348 normas ao passo que 1140 dessas referências são diferentes entre si, no que consta pelo título. Nestes números a Rússia e a China não foram incluídas.

Dentre as 1140 normas, um pequeno número destas organizações representa 87% deste total. Isso mostra uma propagação abrangente destas organizações. Estas normas são decorrentes de 60 diferentes organizações de abrangência internacional, regional, nacional e industrial. Existe uma predominância das normas industriais (44%), então as nacionais (35%) e finalmente as internacionais (21%) numa análise global.

Tabela 2.6 – Relação de normas utilizadas na indústria petrolífera e de gás natural (Caporali, 2005)

Assuntos	Nº de ISO	%
Cilindros de gás	1	0,14
Informação e documentação	1	0,14
Secretaria Central da ISSO	1	0,14
Máquinas ferramenteiras	1	0,14
Papel e cortiça	1	0,14
Fotografia	1	0,14
Eixos para máquinas e acessórios	1	0,14
Conselho de administração técnico	1	0,14
Zinco e suas ligas	1	0,14
Química	2	0,28
Engrenagens	2	0,28
Diretivas ISO/IEC	2	0,28
Pallets para o método da unidade de carga de manuseio	2	0,28
Materiais de referência	2	0,28
Veículos terrestres	2	0,28
Combustível de minerais sólidos	2	0,28
Tratores e máquinas para agricultura e silvicultura	2	0,28
Pneus, aros e válvulas	2	0,28
Ferro fundido e ferro-gusa	3	0,42
Peneiramento e outros métodos de dimensionamento	3	0,42
Têxteis	3	0,42
Equipamentos de proteção e combate a incêndios	4	0,56
Navios e tecnologia marinha	4	0,56
Avaliação de conformidade	6	0,85
Medição de fluxo de fluidos em tubos fechados	10	1,41
Polias e cintas (incluindo Vee belts)	11	1,55
Rolamentos	13	1,83
Laboratório de objetos de vidro e instrumentos relacionados	15	2,12
Quantidades, unidades, símbolos, fatores de conversão	15	2,12
Ferramentas pequenas	15	2,12
Acessórios para tubos de metais ferrosos e metálicos	17	2,40
Aviões e veículos espaciais	19	2,68
Desenhos técnicos, definição do produto e documentação relata	23	3,24
Borracha e seus produtos	26	3,67
Produtos petrolíferos e lubrificantes	34	4,80
Refratários	37	5,22
Soldagem e processo aliados	38	5,36
Tecnologia da informação	40	5,64
Plásticos	43	6,06
Roscas	44	6,21
Acústica	52	7,33
Aço	58	8,18
Tintas e vernizes	69	9,73
Materiais, equipamentos e estruturas *offshore* para petróleo, petroquímica e gases naturais industriais	80	11,28
Total	709	100,00

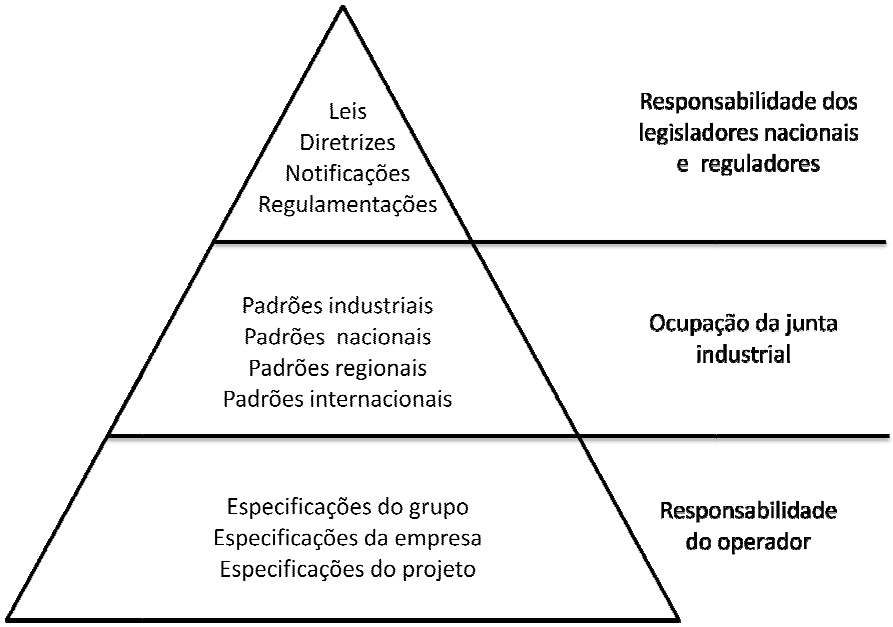


Figura 2. 12 – Padrão de hierarquia utilizado para distinguir nível de documentos de regulamentações por responsáveis (Adaptado de Caporali et AL, 2005)

As normas API destacam-se, com 225 referências, incluindo 49 normas do *Manual of Petroleum Measurement* (MPMS). A ISO disponibiliza 152 normas referenciadas pelos reguladores e 59 dessas provém do trabalho da ISO/TC 67.

Existe um conjunto de normas referenciadas pelas organizações que resguardam o mesmo assunto e deste modo acabam sendo duplicadas. Exemplos disso são no assunto de áreas de estrutura *offshore* e oleodutos.

Através de uma análise pelo nome de referência de cada norma selecionada das 59 organizações e associações com atribuições normativas, constou-se que também não é estabelecida nenhuma norma para a execução da operação de pescaria e/ou destruição em poços de petróleo. A Figura 2.13, mostra o número específico de normas utilizadas por cada órgão regulamentador na área petrolífera.

Apesar de não existirem normas estabelecidas para estas operações, são feitas pesquisas quanto à melhora da operação. Muitas destas pesquisas são feitas através de patentes onde fornecem informações sobre a operação e compromissos de aperfeiçoamento na produção e qualidade.

2.7. Equipamentos (patentes) e ferramentas (geometria, dimensões e tipos)

Devido à necessidade constante de novos equipamentos e pesquisas foram desenvolvidas ferramentas com a tarefa principal de servir ao propósito de remover diversos materiais de ambientes subterrâneos. Estas ferramentas possuem diversas formas, sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas com a finalidade de um maior desempenho. As várias brocas utilizadas têm diferentes tipos de arestas de corte. Algumas destas são lineares orientadas longitudinalmente no corpo da ferramenta. Em outras ferramentas, as lâminas de corte estão em relação ao eixo longitudinal da ferramenta. E em outras as laminas estão em espiral no corpo da ferramenta.

Reynolds, Carter e Yukon (1988) desenvolveram uma ferramenta (Figura 2.14) onde as lâminas de corte têm inclinação do eixo negativa, variando de 2 a 10 graus. As lâminas de corte com esta inclinação ficam dispostas na direção da rotação da ferramenta. Isso proporciona um melhor corte. Esta ferramenta é uniformemente, em sua estrutura de corte, revestida com carbonetos de tungstênio. Onde estes têm preferencialmente forma cilíndrica, com diâmetros variando entre 3,175 a 4,75 mm.

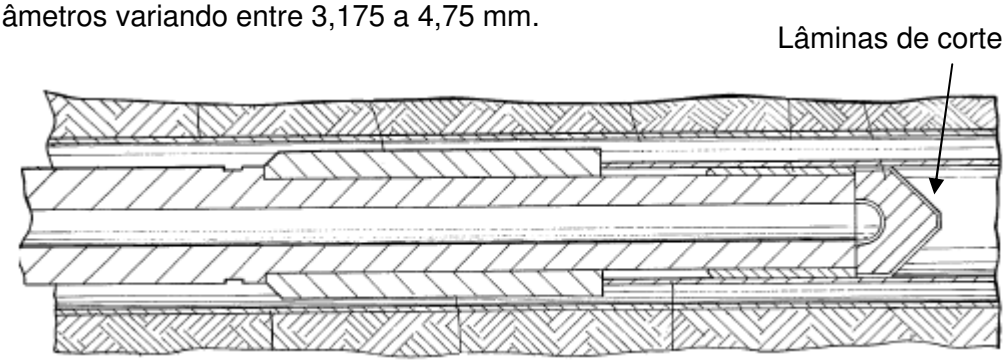


Figura 2.13 – Esquemático da ferramenta de destruição desenvolvida por Reynolds, Carter e Yukon (1988)

Lynde e Harvey (1989) criaram uma ferramenta (Figura 2.15), a qual possui lâminas de cortes alongadas ao longo do corpo cilíndrico da ferramenta que se estende até a parte inferior. Os elementos de corte com tamanho e forma pré-determinada são organizados de acordo com um padrão na porção inferior de cada lâmina onde a maioria se encontra em posição transversal estendendo até a parte inferior da ferramenta. Cada elemento de corte tem um possui um entalhe que direciona o avanço do cavaco produzido para facilitar o corte. Uma estrutura de carbonetos de tungstênio - de elevada dureza - é presa na superfície da face direita da lâmina para reforçar e auxiliar a operação.

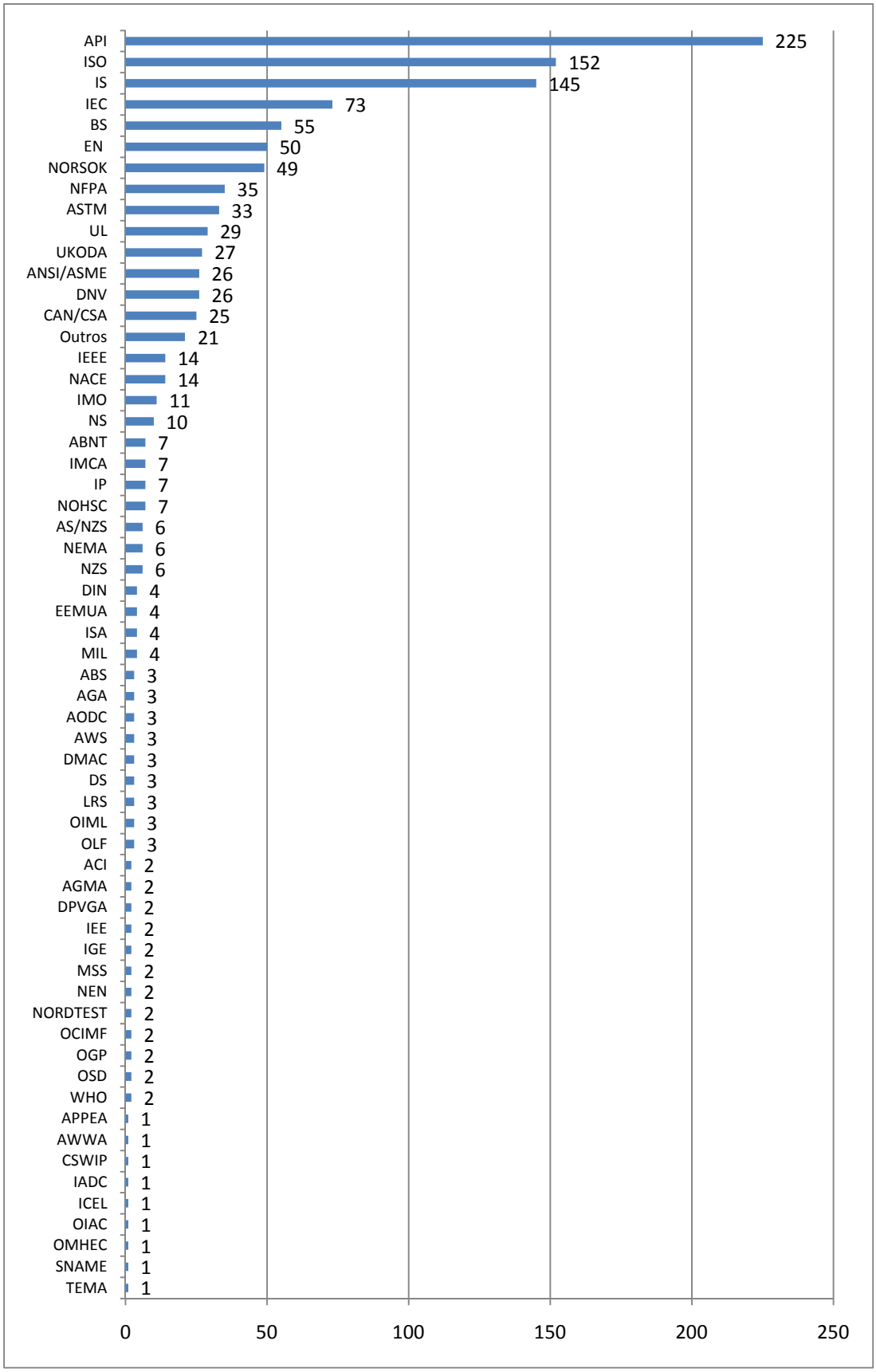


Figura 2. 14 – Número de normas utilizadas por órgão regulamentador na área petrolífera

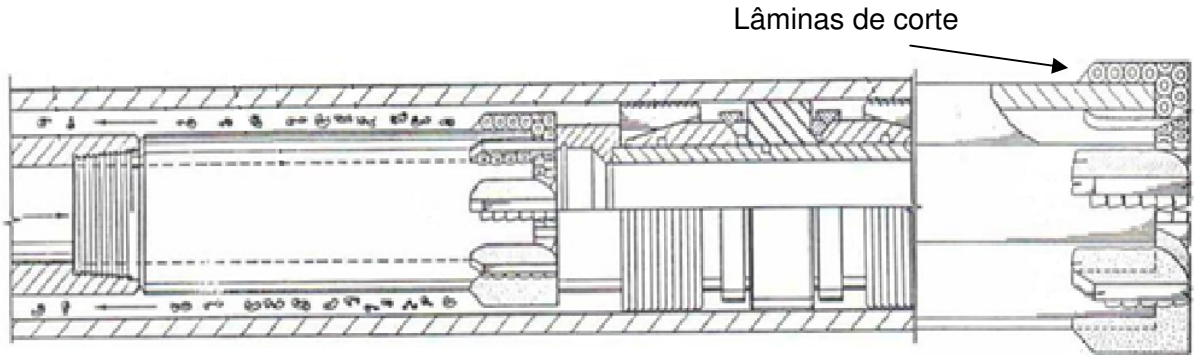


Figura 2.15 - Esquemático da ferramenta de destruição desenvolvida por Lynde e Harvey (1989)

Desal (1990) propôs uma modificação interessante a ser feita na ferramenta de destruição apresentada. As partes inferiores e superiores, que possuem as lâminas de corte, podem ser substituídas. Com isso a recuperação da ferramenta é mais promissora. Uma vez que, o autor sugere em seu trabalho, a brasagem possa ser realizada apenas onde estão as lâminas de corte, proporcionando uma melhor adesão do material utilizado (carbonetos de tungstênio). Desta forma a ferramenta não precisaria ir inteiramente para o forno, garantindo a sua integridade inicial, por não estar sujeita a altas temperaturas. Isso garante uma melhor recuperação da ferramenta e menos tempo desperdiçado com retrabalho.

A ferramenta (Figura 2.16) de Gilbert e Stronach (1991) tem em sua parte inferior seções com insertos de carbonetos de tungstênio. Dentro do corpo da ferramenta existe uma seção por onde passa o fluído pelo pistão, onde este é selado pelo engate interno da ferramenta e é liberado pela compressão da mola. Cada intervalo entre os espaços é uma alavanca tendo uma no eixo perpendicular ao eixo longitudinal do corpo da ferramenta, onde cada alavanca tem pelo menos uma parte revestida com carbonetos de tungstênio e a extremidade inferior de cada alavanca sendo essencialmente no mesmo plano da região revestida. O pistão é feito para com que seja orientado pela pressão do fluído através das alavancas que rotacionam o exterior radialmente então podendo expandir a superfície de corte da broca.

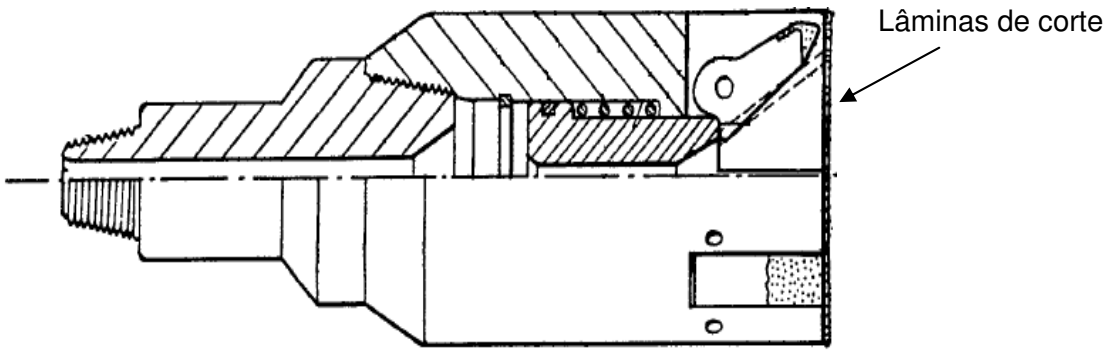


Figura 2.16 - Esquemático da ferramenta de destruição desenvolvida por Gilbert e Stronach (1991)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Visão geral

Sendo o objetivo do presente trabalho propor uma metodologia para acreditação de ferramentas destruidoras de partes de colunas utilizadas em poços de petróleo, foram propostos ensaios padrões para o recebimento dos consumíveis de brasagem, de produção para caracterização do processo e um ensaio que simule a operação de destruição da broca em condições laboratoriais.

Desta forma a metodologia foi dividida em três etapas, sendo analisadas na seguinte ordem: a matéria-prima (consumíveis), o processo de fabricação e o produto resultante. A Figura 3.1 mostra como foi dividida a metodologia estudada e suas características principais.

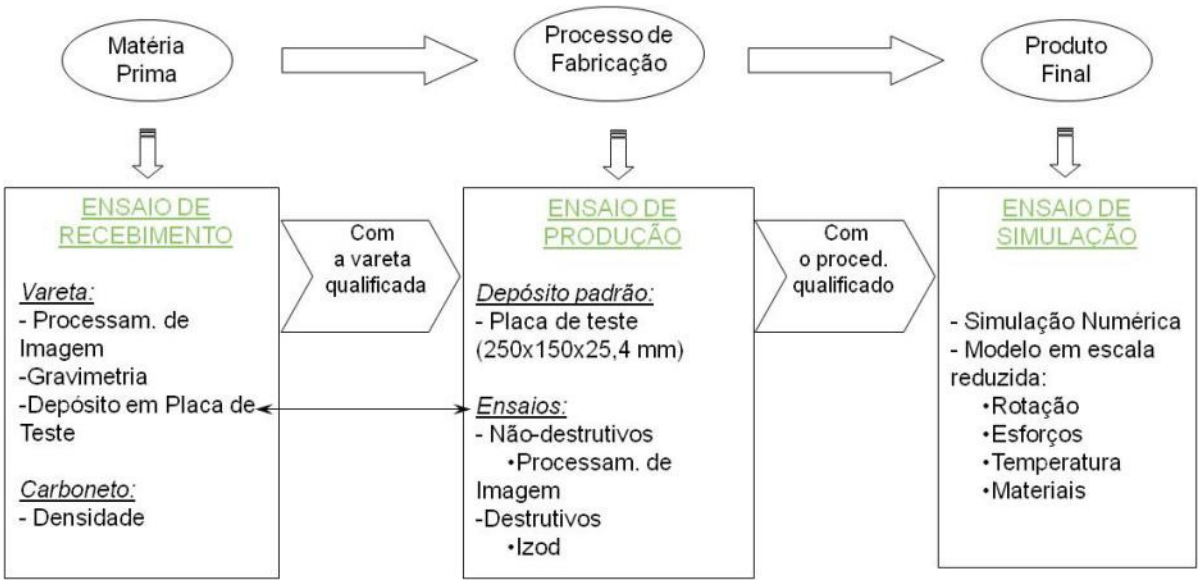


Figura 3. 1 – Sequência e esquemático da metodologia utilizada

3.2. Ensaio para recebimento de consumíveis

As varetas de WC-Co (Carboneto de tungstênio – cobalto) em matriz de alpaca são produzidas em fornos apoiadas numa base como uma forma. A parte "inferior" é conferida uma distribuição irregular dos carbonetos, em contra posição com a parte superior que possui uma distribuição, que pode ou não apresentar uma distribuição homogênea dos mesmos. Esta distribuição é importante para que quando aplicado o processo de brasagem para confecção ou manutenção das brocas de destruição possua homogeneidade da superfície de corte ao longo da ferramenta.

Inicialmente busca-se indicar neste trabalho um método de recebimento dos consumíveis para que os mesmos possam ser aprovados, e estabelecendo uma qualificação inicial do procedimento. Esta etapa tem como objetivo informar se o consumível será aceito ou não. Sendo aceito será possível passar para os demais testes que serão descritos a seguir. No campo, esta etapa pode representar alguns milhares de dólares não desperdiçados com consumíveis que não apresentam as características adequadas.

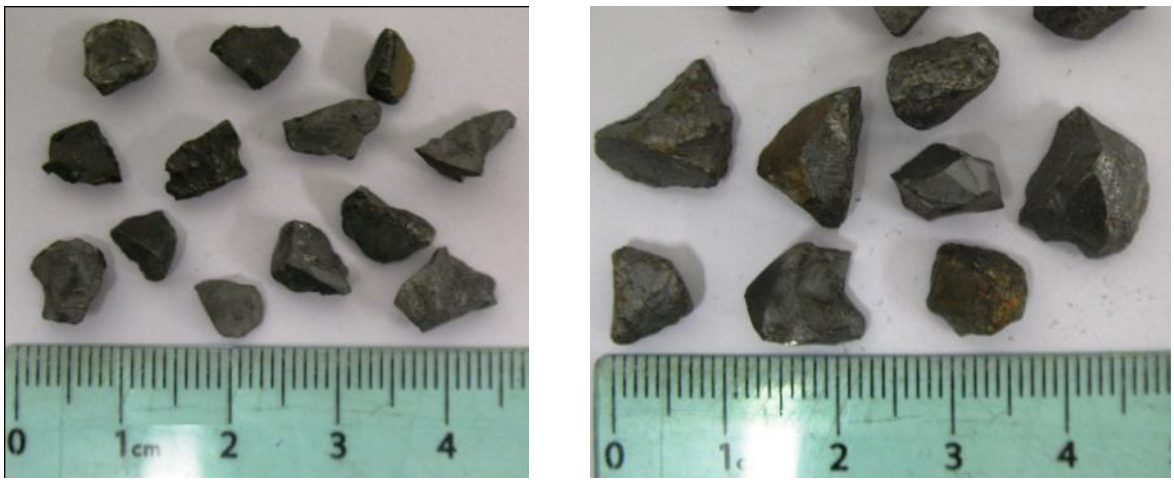
Por isso, para este trabalho, foram propostos dois métodos para aceitabilidade do recebimento dos consumíveis. O primeiro, a gravimetria, verifica as proporções de materiais, neste caso de WC-Co nas varetas. E o segundo, a análise de imagens, que proporciona informações quanto às características geométricas e distribuição de carbonetos nas varetas.

Para a realização desta etapa foram utilizadas seis varetas, as quais variam em dois grupos de três a granulometria. Sendo caracterizada pela tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Dimensões das granulometrias estudadas

Granulometria	Dimensões (mm)
Fina	2 a 4
Grossa	6 a 8

A Figura 3.2 mostra os carbonetos estudados. Nesta figura podem ser comparadas suas dimensões entre fina e grossa, respectivamente por Figura 3.2a e 3.2b. A geometria irregular dos carbonetos fornece tanto arestas de corte como partes mais lisas.



(a) (b)

Figura 3. 2 – Comparação entre as dimensões dos carbonetos estudados onde, (a) representa a granulometria fina e (b) representa a granulometria grossa.

3.2.1. Gravimetria

Este método de inspeção não destrutivo possui grande aplicabilidade nas áreas químicas, geológicos, geofísicos e oceanográficos (LUCENA, 2005). Contudo sua aplicabilidade, neste caso, se restringe a estimar as proporções de dois materiais presentes em uma amostra de um sólido qualquer. As proporções entre os materiais são calculadas pela comparação de valor de densidade, medido pela técnica, com um valor estimado de densidade teórica de referência para cada material.

Para a análise gravimétrica é necessária a determinação das densidades dos materiais em questão. Então inicialmente verificaram-se as densidades do WC-Co e da alpaca. Para isto, através de uma balança com resolução de 0,001 gramas, mesurou-se a massa do material em questão. E com um tubo de ensaio com escala milimétrica obteve-se

o volume do material ao ser mergulhado em água destilada. A Tabela 3.2 mostra os valores encontrados para as massas, volumes e densidades dos materiais estudados.

Tabela 3. 2 – Valores de massa, volume e densidade dos carbonetos de tungstênio estudados mensurados.

Material	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/cm^3)
Amostra Alpaca 01	5,715	0,7	8,1
Amostra Alpaca 02	1,814	0,2	9,1
Amostra WC-Co 01	4,302	0,3	14,3
Amostra WC-Co 02	11,972	0,8	14,9

Estas amostras foram retiradas de uma vareta de WC-Co, onde o material foi fundido, com uma tocha oxi-acetilenica, sobre uma base de cobre resfriada para possível separação dos dois materiais. Com os materiais separados e caracterizados através da Equação 3.1 foram determinadas suas densidades.

$$D = m/v \qquad 3.1$$

Onde, D é a densidade, m a massa medida e V o volume.

A densidade determinada de cada material é bem próxima do valor da literatura, sendo de 14,6 g/cm^3 do carboneto de tungstênio, segundo *Metals Handbook Desk Edition* (1998). A variação encontrada deste valor mostra pouca significância para o estudo gravimétrico. Por isso, foram utilizados os valores teóricos.

Determinados os valores de densidade de cada material pesquisado, realiza-se a caracterização dos valores de massa e densidade das varetas. Foi utilizada uma balança com resolução de 0,01 g, com a opção de medição de massa por suspensão, um suporte para a balança e um reservatório contendo água destilada. Foram medidas as massas ao ar livre e dentro do recipiente com água destilada.

Tendo estas medidas e através de uma sequência de Equações (3.2 a 3.10) mostradas a seguir pode ser determinada a relação de WC-Co e alpaca em cada vareta analisada.

$$V_{ld} = V_{am} = \frac{E}{\rho_{H_2O} \cdot g} \qquad 3.2$$

$$E = P_{ar} - P_{ag} \qquad 3.3$$

$$\rho_{am} = \frac{P_{ar}}{V_{am}} \qquad 3.4$$

$$\rho_{am} = X.\rho_{WC} + (1 - X).\rho_{Alpaca} \quad 3.5$$

$$X = \frac{\rho_{am} - \rho_{Alpaca}}{\rho_{WC} - \rho_{Alpaca}}.100 \quad 3.6$$

$$V_{am} = V_{Alpaca} + V_{WC} \quad 3.7$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad 3.8$$

$$\frac{m_{am}}{\rho_{am}} = \frac{m_{Alpaca}}{\rho_{Alpaca}} + \frac{m_{WC}}{\rho_{WC}} \Rightarrow \frac{m_{am}}{\rho_{am}} = \frac{m_{am} - m_{WC}}{\rho_{Alpaca}} + \frac{m_{WC}}{\rho_{WC}} \quad 3.9$$

$$m_{WC} = \frac{\rho_{WC}.m_{am}(\rho_{Alpaca} - \rho_{am})}{\rho_{am}.(\rho_{Alpaca} - \rho_{WC})} \quad 3.10$$

Onde inicialmente foi mesurada a massa da amostra de WC + Alpaca determinando a massa ao ar (P_{ar}) e em seguida na água (P_{ag}).Foi calculado o empuxo, que é determinado pela diferença de massas (Equação 3.2). Com este valor calcula-se o volume do liquido deslocado pela amostra [V_{ld}] que equivale ao próprio volume da amostra [V_{am}] onde ρ_{H_2O} é a densidade da água, igual a 1 kg/dm^3, e g é a aceleração da gravidade, 9,8 m/s^2.

Com o volume da amostra (V_{am}) e o peso da amostra ao ar (P_{ar}) determina se a densidade real da amostra (P_{am}), em [kg/m^3], como mostra a Equação 3.4. Sabendo que a densidade da amostra é igual ao produto da porcentagem de carboneto pela sua densidade mais o produto da porcentagem de alpaca pela sua densidade, podemos obter a porcentagem em volume de carboneto, conforme mostra a Equação 3.5 onde X é a porcentagem em volume de carboneto, então, isolando X tem-se a Equacão 3.6. Sabendo que o volume total da amostra (V_{am}) é a soma dos volumes de carboneto e alpaca, pode-se escrever a Equação 3.8, e através da Equação 3.9, podemos obter a Equação 3.9. Isolando a massa de carboneto (m_{WC}) em função da massa total da amostra (m_{am}), da densidade da amostra (P_{am}), da densidade da alpaca (P_{alpaca}) e da densidade do carboneto (P_{WC}), conclui-se a Equação 3.10.

3.2.2. Processamento e Análise de Imagens dos consumíveis

Para esta etapa foi utilizada uma rotina computacional desenvolvida no Laprosolda/UFU (ARAÚJO *et al*, 2005). Através desta técnica é possível caracterizar se uma vareta possui uma distribuição uniforme de carbonetos ou não, baseando-se em análises estatísticas que avaliam o intervalo de confiança do processamento de imagens.

As imagens das varetas a serem analisadas pelo programa e suas sub-rotinas desenvolvidas são adquiridas utilizando-se uma câmera digital. Para adquirir as imagens recomenda-se que seja utilizada uma câmera digital de no mínimo 3.0 megapixel ajustada para adquirir no formato RGB e extensão '*.JPEG*'. A distância e o alinhamento não tem importância, já que foram desenvolvidas rotinas para alinhar a imagem e fazer a calibração, contudo é recomendado que a imagem seja adquirida numa posição perpendicular à superfície que se encontra a vareta, e que ela esteja centralizada na imagem.

De acordo como o autor que desenvolveu a rotina computacional, a vareta metálica tem grande capacidade de refletir a luz incidente, por isto o "flash" da máquina deve estar desligado. Sendo que para a análise dos consumíveis, o programa se baseia nos contornos da imagem, devem ser tomados cuidados com a iluminação para que sejam eliminadas as sombras produzidas pelas varetas, para isto a vareta deve ser colocada sobre uma superfície translúcida (que deixa passar apenas uma parte da luz que nela incide, recomenda-se utilizar papel branco comum). É necessário também colocar ao lado da vareta uma escala que será necessária para a calibração da imagem (recomenda de uma escala igual ou superior a 100 mm).

Em adição a análise original, procurou-se investigar a variação do ângulo da vareta. Para isto foi desenvolvido um dispositivo que rotaciona a amostra a cada 15 graus da posição original. O dispositivo utilizado é mostrado na Figura 3.3 e acoplado a lâmpada utilizada.

Sendo feita uma variação de 0 a 75 graus da amostra. Não havendo sentindo analisar o contorno da amostra que se apresenta "lisa", como mostrada na Figura 3.4. Com os resultados determinados para esta variação é realizada uma média, que determina o valor final, que é analisado. Esta variação foi uma medida arbitrária escolhida em vista de facilitar a réplica dos resultados e análise.

O resultado final da análise retorna os dados estatísticos de avaliação, assim como a imagem monocromática da vareta. Evidenciando a qualidade do consumível.

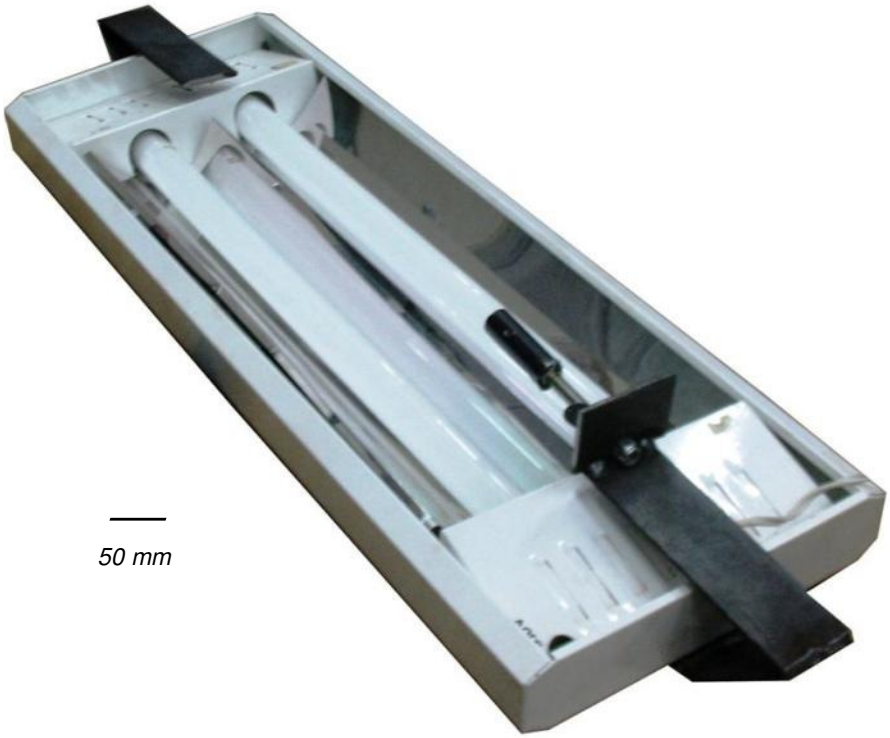


Figura 3. 3 – Dispositivo e lâmpada utilizada para aquisição da imagem variando-se os graus de visualização da vareta de WC-Co.

Figura 3. 4 – Visualização da parte “inferior” da vareta de WC-Co , mostrando a superfície ausente de carbonetos.

3.3. Ensaio de produção

Partindo-se de uma vareta qualificada, torna-se muito importante garantir que tanto o brasador quanto o procedimento de brasagem da ferramenta sejam qualificados. Assim, foram propostos dois ensaios, um destrutivo e um não-destrutivo, para verificar a conformidade do produto. Considerando a responsabilidade de cada ferramenta, cujos prejuízos por falha precoce são muito maiores do que os seus próprios custos, estes ensaios poderiam ser sobre amostragem total. Uma vez assumidos e qualificados os procedimentos e consumíveis de brasagem, pode-se procurar avaliar a conformidade da ferramenta.

A partir de uma vareta qualificada é realizada a brasagem do material para a confecção de dois tipos de placa de teste, mostrados nos tópicos a seguir. Estes apresentam dimensões diferentes, entretanto confeccionados a partir do mesmo tipo de consumível. O primeiro tipo de corpo de prova é confeccionado para a análise de imagem e segundo para o ensaio impacto de Izod modificado. Estes são classificados como ensaio não-destrutivo e destrutivo, respectivamente.

3.3.1. Processamento e análise de imagens da placa de teste brasado

Deve-se garantir um padrão de qualidade de uma superfície abrasiva confeccionada por processo de brasagem, a fim de se conseguir um apropriado emprego, no momento de sua fabricação. Isto pode ser feito baseando-se na distribuição uniforme dos grãos abrasivos ao longo de toda a superfície. Neste sentido, foi utilizada uma rotina computacional (ARAÚJO *et al*, 2005), que por meio de uma imagem digital da superfície, faz uma qualificação da distribuição dos grãos abrasivos, mostrando se a superfície está ou não apta exercer sua função. Isto se baseando em análises estatísticas que avaliam o intervalo de confiança do processamento de imagens.

Deste modo a rotina computacional tem como função fazer uma análise de superfície de um material compósito de forma a qualificar a fabricação e a utilização deste, por meio apenas de uma foto digital do material. A prática deste software tem como finalidade substituir o julgamento visual do brasador e adotar uma análise padrão para que possa ser feita por qualquer pessoa.

O objetivo do trabalho desenvolvimento tem uma rotina computacional de processamento, verificando desta forma se há uma boa homogeneidade em toda a superfície com relação aos carbonetos de tungstênio depositado numa base de aço.

Inicialmente a rotina converte a foto digital em uma imagem binária (preto e branco) para uma posterior análise estatística, obtendo como resultado dados com relação à distribuição dos carbonetos.

Esta transformação é atingida verificando célula por célula da matriz a intensidade de cada pixel. Se a célula for maior do que um determinado valor, troca-se esta célula por um e se ao contrário, for menor, troca-se por zero.

Completada a matriz binária o software passa para a verificação estatística de um grupo de células binárias no qual o tamanho deste grupo é previamente escolhido no início do programa. Esta verificação é realizada calculando a porcentagem de zero e um para cada grupo, e a própria rotina correrá toda a matriz mudando os grupos. Cada resultado estatístico terá uma célula de outra matriz no qual será denominada matriz porcentagem.

Para executar tal tarefa é necessária a padronização do tipo de foto a ser tirada com relação a posição da câmera e da luminosidade do material. A posição da luminosidade deve ser de tal forma que a sombra de um carboneto não interfira nos outros ao lado conforme a Figura 3.5. As mesmas observações acima são válidas também para a posição da câmera, de forma que os carbonetos não fiquem na frente de outros.

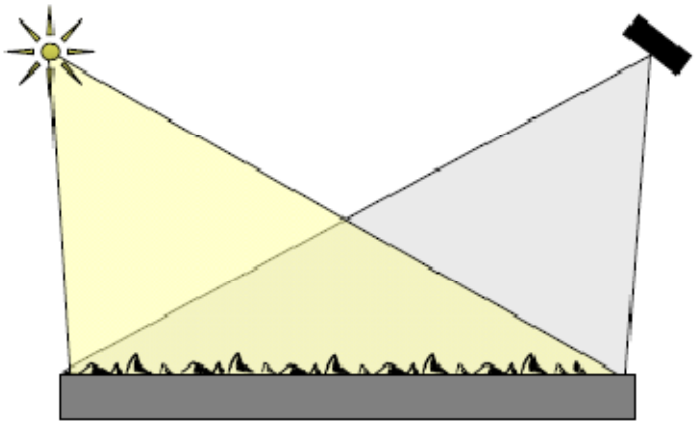


Figura 3. 5 – Configuração necessária para captura da imagem, sendo necessário um ponto luminoso e câmera no lado oposto.

A imagem pode ser capturada por uma câmera digital com resolução 640x480, distancia focal de 4.2 a 42 mm e passada para o software onde será transformada em uma matriz com os valores de cores no formato RGB (red-green-blue) correspondendo a cada pixel ("picture element" ou "pel") da imagem.

A Figura 3.6 apresenta uma das placas de teste de granulometria fina e grossa estudados. Onde os carbonetos foram brasados sobre uma superfície metálica (aço SAE

4340). Esta análise visa verificar se a brasagem foi realizada de forma correta pelo brasador. Esta placa de teste será futuramente mais explorada no próximo tópico do estudo.

Figura 3.6 – Placa de teste brasado que é estudada a distribuição dos carbonetos após o processo sendo mostrados respectivamente os de carbonetos de granulometria fina e grossa

3.3.2. Ensaio de Impacto Izod Modificado

A análise da fratura de uma placa de testes depositada com o revestimento de carboneto de tungstênio e alpaca pode inferir sobre a qualidade do mesmo. Projetou-se e desenvolveu-se uma modificação técnica em uma máquina de ensaio Charpy para que esta funcione como uma máquina de ensaio de impacto Izod modificada segundo norma da ASTM (SCOTTI, FERRARESI, VILARINHO, 2008).

Após a construção e modificação da máquina de ensaios, diferentes amostras foram ensaiadas e os resultados permitiram caracterizar, tanto pela análise da fratura, quanto pelo valor de energia absorvida no impacto, a qualidade do depósito.

A partir de placas de teste com depósitos brasados de carboneto de tungstênio numa matriz de alpaca, foram retiradas as amostras, posteriormente utilizadas para o ensaio de impacto de Izod modificado. Foi retirado um total de 18 amostras, sendo nove amostras de cada tipo de granulometria.

A Figura 3.7 mostra como é realizada a sequência, de forma simples, para a preparação da amostra. Onde inicialmente é realizado o brasamento sobre uma peça metálica. Desta peça são retiradas as amostras por eletroerosão, que possuem uma dimensão de 25 mm de comprimento, 10 mm de largura e 20 mm extensão da região brasada.

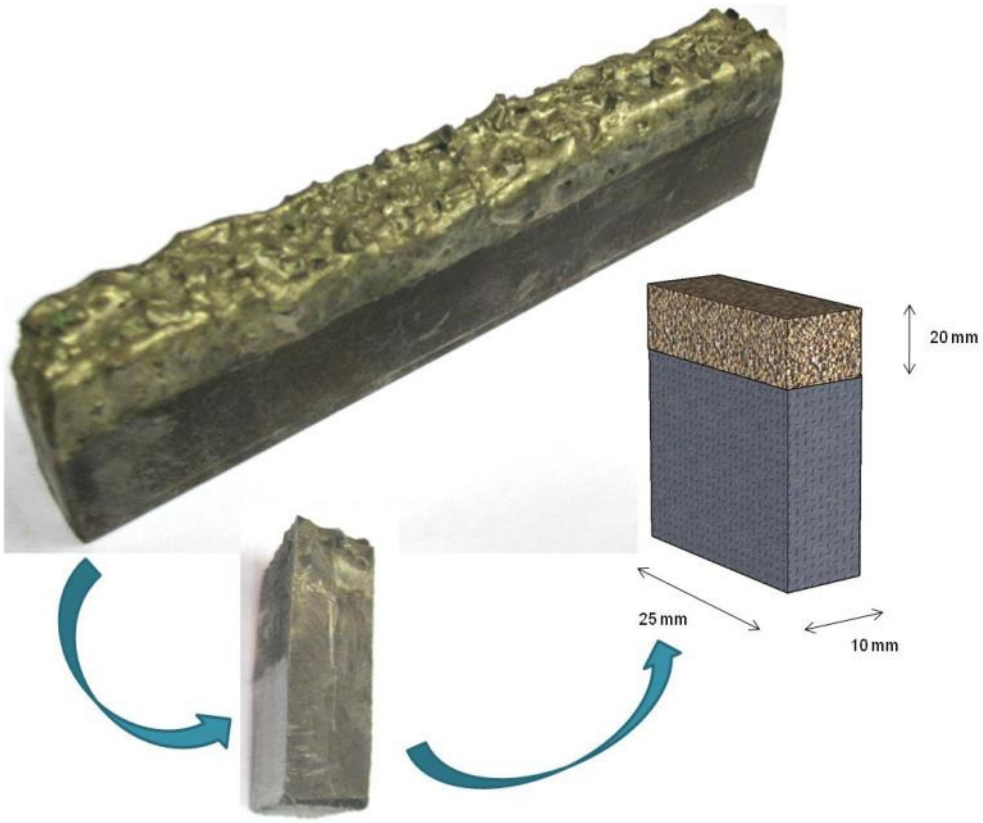


Figura 3. 7 – Sequência de preparação da amostra que consiste a partir de uma placa de teste brasada retira uma amostra com as suas respectivas dimensões necessárias

Como o carboneto de tungstênio é um material de elevada dureza, a preparação das amostras se tornou muito limitada. Sendo apenas possível realizá-la utilizando o processo de eletroerosão. Foi utilizado o equipamento de eletroerosão modelo EDM 440NC série L. A Figura 3.8 mostra um esquema do equipamento utilizado.

As amostras têm um tamanho definido representados na Figura 3.7. O qual define os requisitos e procedimentos para o ensaio de impacto de Izod Modificado. Detalhes da confecção dos corpos de prova para este ensaio seguem no Anexo D.

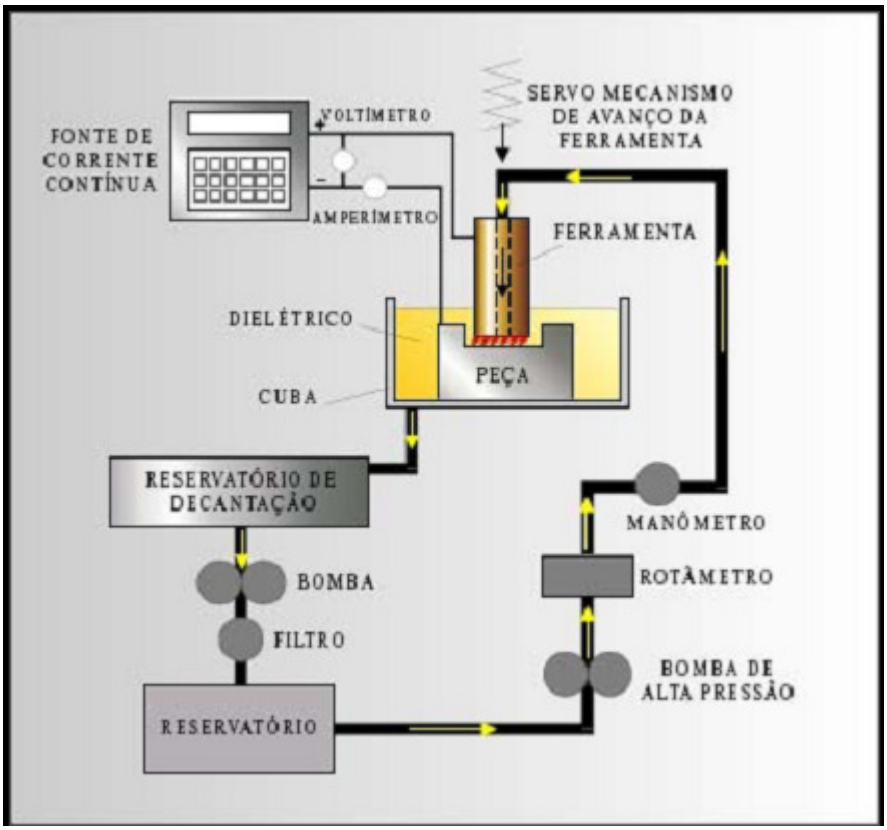


Figura 3.8- Esquema dos principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por descargas elétricas (EDM) (ARANTES, 2001)

Após a confecção dos corpos de prova necessários, o teste foi realizado utilizando uma máquina de ensaio Charpy para que esta funcione como uma máquina de ensaio de impacto Izod modificada segundo norma da ASTM A370-10. Elevando o martelo até o ponto adequado o martelo é liberado liberando a carga sobre a zona brasada da amostra. Com este teste é possível avaliar onde se encontra o ponto de maior fragilidade. Na zona de ligação do metal brasado com o de base ou se o próprio material brasado é mais frágil.

3.4. Ensaio simulativo

Propõe-se um ensaio simulativo (simulação física) que reproduza em escala a operação de destruição. Este ensaio deve reproduzir de uma forma mais simples as condições de operação, possibilitando estudar e confirmar a eficácia de novos procedimentos e novos consumíveis. É avaliada a necessidade de se manter a mesma força média aplicada entre 330 a 660 lbf (150 a 300 kgf), em virtude da capacidade do dinamômetro e a sua segurança. Os resultados são expressos a partir do desgaste da peça e/ou ferramenta.

Com base no escopo e requisito apresentado para a simulação física (real) do depósito brasado, foi utilizado um ambiente de simulação composto por uma fresadora modificada para execução dos ensaios (Figura 3.9) com função de suporte e movimentação, onde está fixada uma cuba, com temperatura controlada, onde será colocada a amostra em meio à água e, no eixo árvore ou principal, será fixada a ferramenta de destruição com movimentação espacial e de geometria variável. A descrição de tal sistema é feita em maiores detalhes no seu manual apresentado no Anexo A.

O ensaio consiste no desgaste do material brasado através do contato entre a ferramenta e o corpo de prova, que será posicionado estrategicamente dentro do recipiente a uma temperatura controlada. Todo este processo automatizado será supervisionado por uma central (Figura 3.10) que recebe os parâmetros de força e torque de um dinamômetro, sendo este último acoplado ao eixo da fresadora junto a um anel deslizante, para garantir o contato elétrico com o eixo girante.

Esta central de controle e aquisição é responsável com a comunicação lógica dos motores de movimentação e o quadro de controle de motores (QCM) da fresadora. Este é representado pela Figura 3.11. Onde neste equipamento é realizado o acionamento de cada motor desejado.

O corpo de prova pode a superfície variável antes e até mesmo durante o desgaste, devido ao modo como o depósito foi brasado, assim a fresadora em processo rotativo o pressiona ininterruptamente com força constante até diminuir o atrito entre eles e consequentemente o torque. Esta situação corresponde ao desgaste do depósito brasado, onde aconteceu o desgaste da ponte cortante do carboneto. Assim, o sistema deverá levantar a ponta da fresadora e mapear outro local do material e dar continuidade ao ensaio.

Assim, fica evidenciado que, dentre os parâmetros mais importantes do estudo deste ensaio simulativo, está o monitoramento da força e torque do sistema, pois estes são utilizados como referência para toda a simulação física. A opção tecnologicamente mais interessante para se medir estes parâmetros é através de um dinamômetro rotativo, solidário ao eixo da fresadora, que transmite os sinais de força e torque (baseados no uso de extensometria), através de um anel deslizante (escovas de carvão), que está solidário à carcaça da fresadora, ou seja, o dinamômetro e a aquisição de sinais elétricos dos extensômetros, acoplados em locais estratégicos deste equipamento.

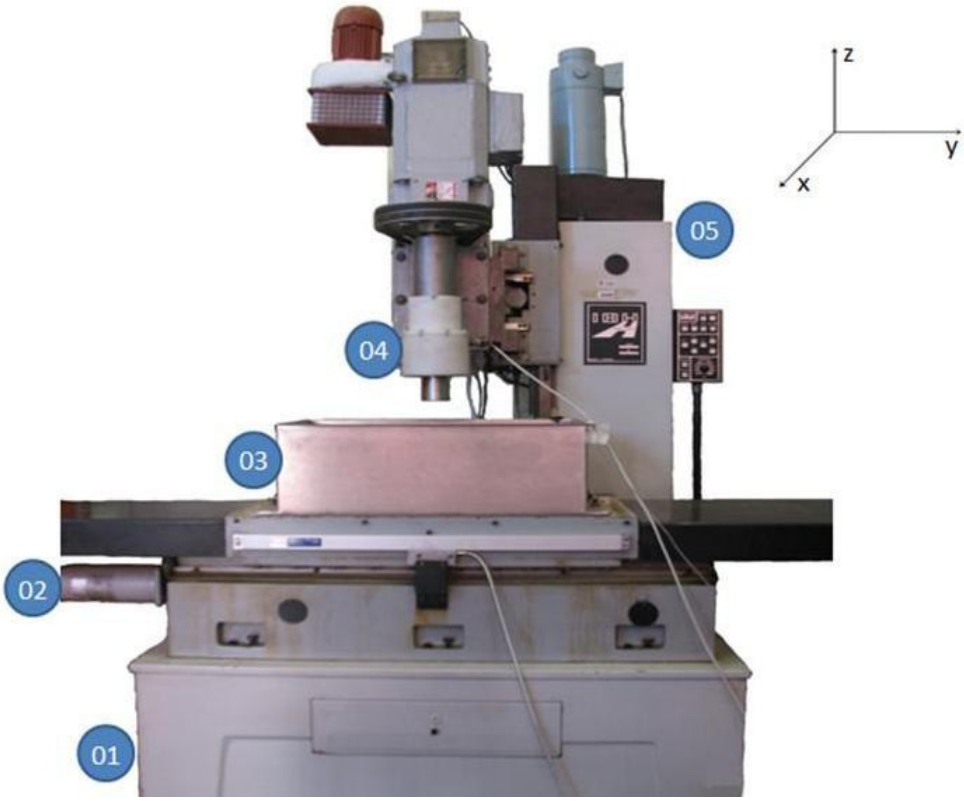


Figura 3.9 – Fresadora modificada: 01 – Parte inferior onde se localiza o reservatório de fluídos; 02 – Motor responsável pela movimentação do eixo y; 03 – Cuba; 04 – Dinamômetro; 05 – Braço principal responsável pela movimentação x e z.

Figura 3. 10 - Central de controle e aquisição: 01 – Botão de parada de emergência; 02 – botão de acionamento da central; 03 – tela de visualização da interface gráfica.

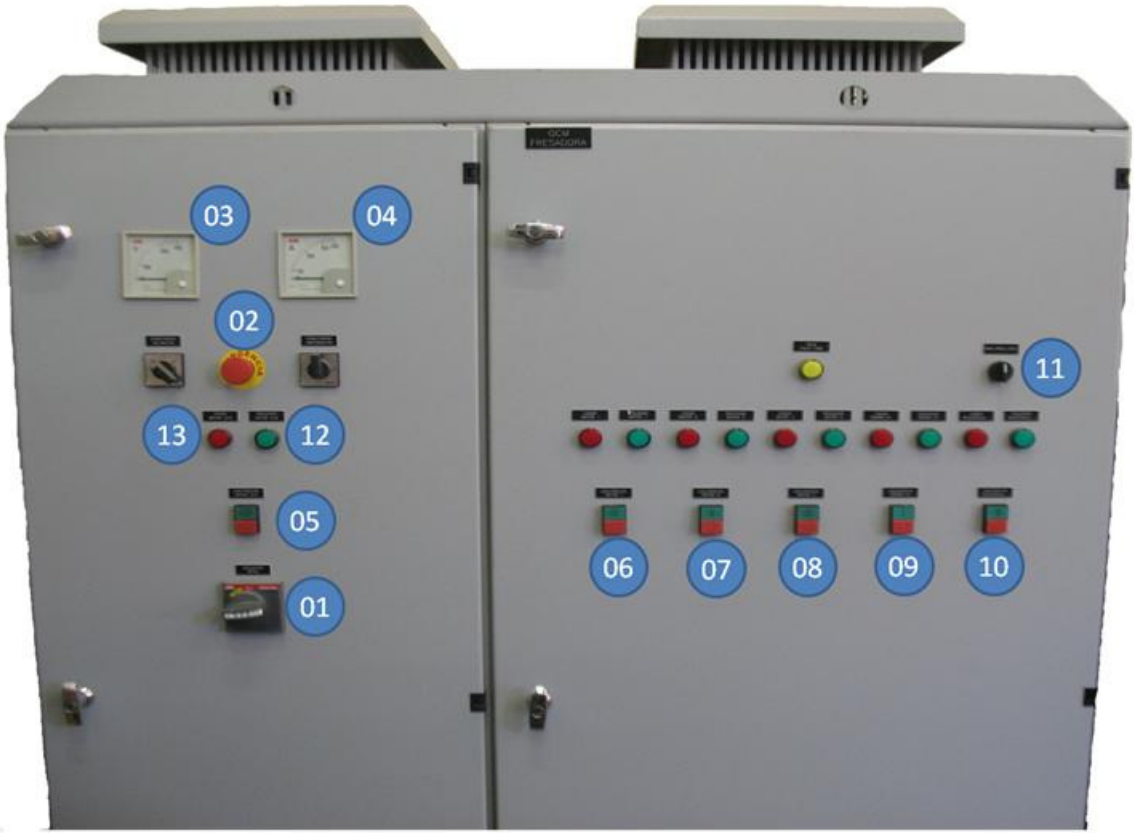


Figura 3.11 - QCM da Fresadora: 01 – Chave de acionamento do QCM da fresadora; 02 – botão de parada de emergência; 03 – mostrador analógico de tensão; 04 – mostrador analógico de corrente; 05 – botões para acionar e desligar o motor responsável pela rotação; 06 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo x; 07 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo y; 08 – botões para acionar e desligar o motor responsável movimentação do eixo z; 09 – botões para acionar e desligar o motor responsável pela bomba; 10 – botões para acionar e desligar a resistência elétrica; 11 – chave de seleção do automático / desligado / manual da resistência elétrica; 12 – mostrador da chave respectiva desligada; 13 – mostrador da chave respectiva ligada.

Quando uma força peso é aplicada na extremidade de uma mola ela se deforma e aplicando pesos nesta mola pode-se calibrá-la para medir qualquer escala de pesos. O conjunto dessas molas ou hastes móveis relacionado ao conjunto de resistências variáveis e calibradas para determinada aplicação chama-se dinamômetro. Fisicamente o dinamômetro é composto de duas placas redondas paralelas unidas por quatro hastes transversais, sendo todas móveis.

Esse dispositivo em rotação aliado a um sistema de aquisição de sinal elétrico assistido por um software que o converte em dados de força e torque, não possui investimento em âmbitos nacionais. Os dinamômetros existentes hoje no mercado

internacional são de elevado custo (acima de R$ 120.000,00), e não possuem as características necessárias para esta determinada aplicação, compondo assim a etapa crítica do projeto.

3.4.1. Dinamômetro

Uma etapa importante para a realização dos ensaios com o equipamento de simulação foi realizar a verificação do desempenho do dinamômetro.

a) Estabilidade

Inicialmente teve-se como objetivo avaliar a estabilidade do dinamômetro desenvolvido no Laprosolda/UFU utilizado no equipamento de simulação de ferramenta de destruição. Foi necessária para se ter uma maior fidelidade da operação em campo onde se estabelece os valores de força aplicados. Este valor de força é aplicado para que se possa ter uma análise da taxa de penetração que é um valor de suma importância nesta operação assim como na perfuração de poços.

Neste ponto foram estudados situações de testes preliminares. Onde foram testadas diferentes tensões de entrada e cargas aplicadas ao longo do tempo. Também foi explorada a influência da variação de tensão devido a outros equipamentos utilizados simultaneamente. Onde foram realizados testes no período de trabalho (diurno) e no período noturno.

O equipamento pode ser trabalhado com dois valores de tensão de entrada, sendo de 5 e 10 V. Como o equipamento utiliza no mínimo 5 V para ser utilizado inicialmente optou-se por analisar com uma tensão de 10 V para se evitar quaisquer interferências ou fugas decorrentes da utilização da tensão mínima. A partir de testes exploratórios a condição inicial para analisar a estabilidade do dinamômetro foi utilizar uma tensão de entrada de 10 V aplicando-se uma carga média de 15 kgf. Foi avaliado que este valor de tensão de entrada ao longo do tempo era maior do que o necessário. E o valor de carga muito baixo para ser analisado. A Figura 3.12 mostra a variação do sinal ao longo do tempo. Contudo nota-se ao longo do tempo um aumento no valor do sinal de entrada. Isto, provavelmente ocorreu devido ao aquecimento dos extensômetros, devido à entrada de tensão maior do que o necessário. Por isto optou-se dar continuidade aos testes com 5 V.

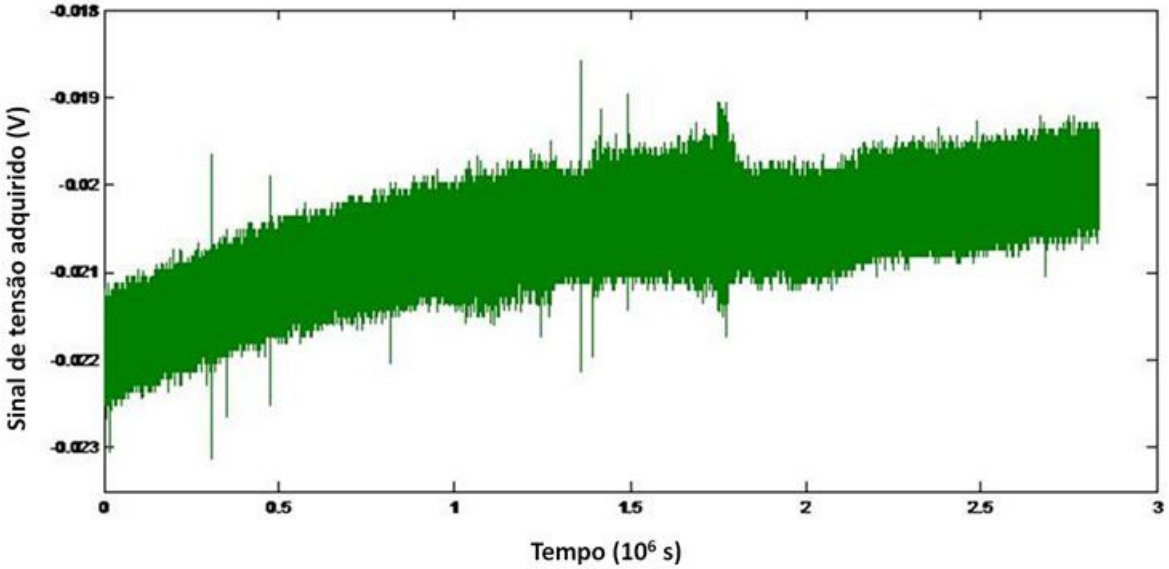


Figura 3.12 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 8 horas com 10 V de entrada e carga de 15 kgf com outros equipamentos desligados (período noturno) com um aumento do valor do sinal mantendo-se a carga constante

Ao utilizar a tensão de entrada de 5 V notou-se uma maior estabilidade dos valores. Os valores tenderam a se estabilizar ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 3.16. Isto porque ao se utilizar um valor de tensão de 10 V, provavelmente, houve o acréscimo do valor do sinal devido ao aqeucimento os straingauges que são extremamente sensíveis. Foi tambem utilizada a carga média de 15 kgf. E para uma melhor análise da variação do sinal optou-se por uma aplicação de carga maior ao longo do tempo.

Foi realizada uma análise do sinal quanto à interferência de outros equipamentos. Para isto foram adquiridos os sinais num período de quatro horas consecutivas durante o horário de trabalho e outros equipamentos sendo ligados. Observa-se, pela Figura 3.14, que houve uma oscilação em alguns pontos ao longo do tempo. Esta oscilação acredita-se, que é decorrente da falta de aterramento. Para diminuir este problema foi realizado o aterramento do equipamento de forma adequada antes da realização dos testes, posteriormente descritos.

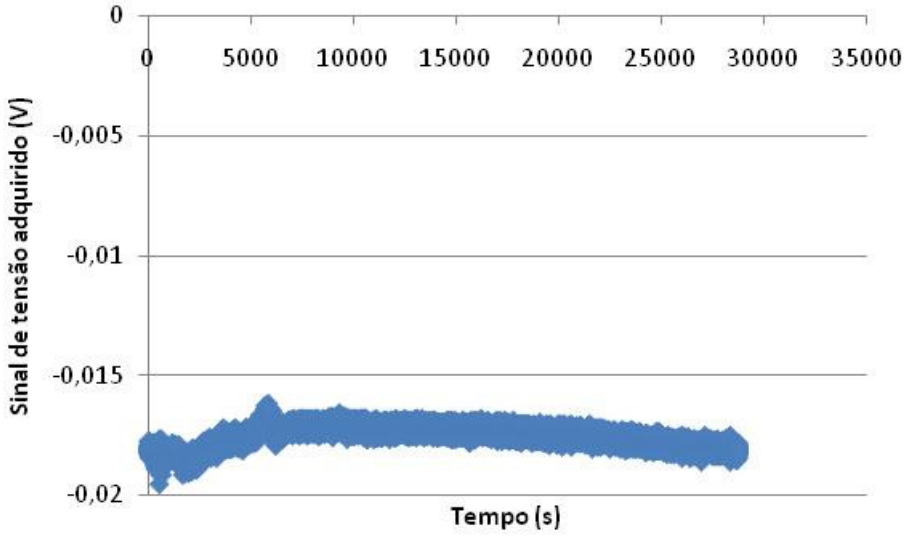


Figura 3.13 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 8 horas com 5 V de entrada e carga de 15 kgf com outros equipamentos desligados (período noturno) com pouca variação do valor do sinal mantendo-se a carga constante

Posteriormente foi realizado um teste de estabilidade com uma carga de 170 kgf, que é uma carga dentro dos valores que é estudado, sendo utilizada a tensão de entrada de 5 V. Esta carga foi imposta com o dinamômetro acoplado ao equipamento e a carga mensurada com a utilização de uma célula de carga HBM MB35, menor e calibrada (Figura 3.15). Confirma-se que a estabilidade do equipamento com a tensão de entrada de 5 V se apresentou com um desempenho melhor do que quando utilizada tensão de 10 V. Isto porque mostrou um valor de sinal mais estável ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 3.16. Assim como pode se observar a influência da carga aplicada.

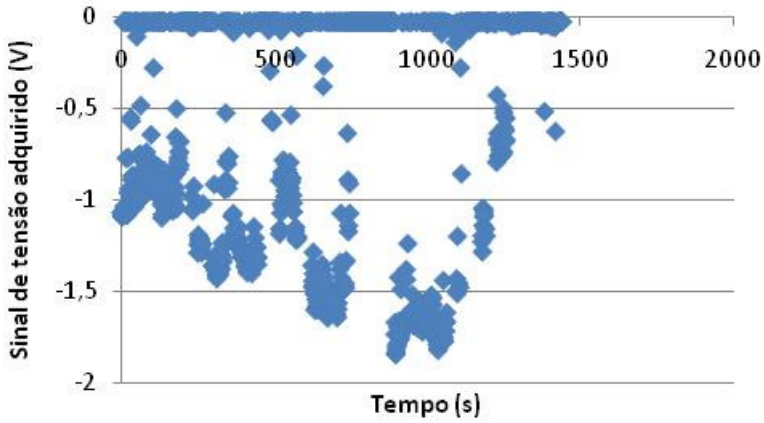


Figura 3.14 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 4 horas com 5 V de entrada e carga de 15 kgf com outros equipamentos ligados (período diurno)

Figura 3. 15 – Célula de carga HBM MB35.

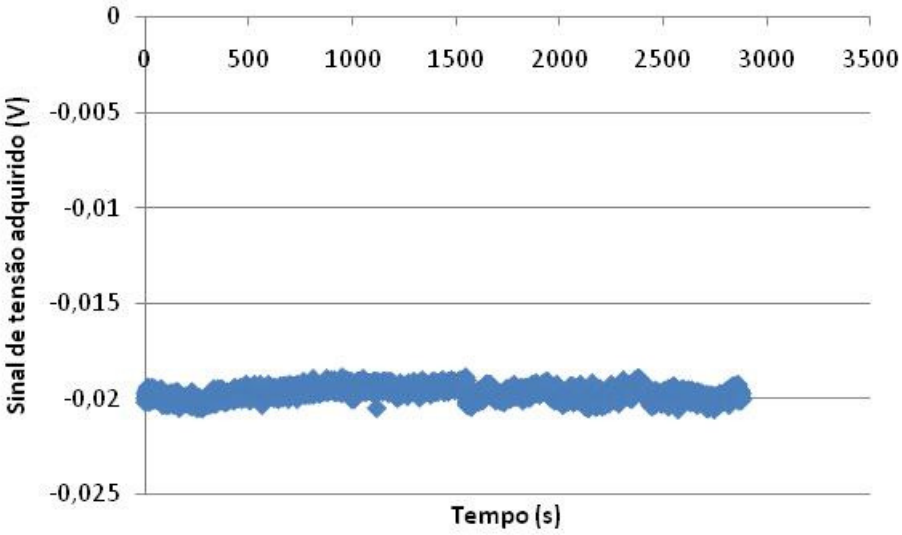


Figura 3. 16 – Dados de saída do dinamômetro ao longo de 8 horas com 5 V de entrada e carga de 170 kgf com outros equipamentos ligados (período diurno) mostrando uma ótima estabilidade dos dados

Com o equipamento apresentando um sinal adequado e limpo ao longo do tempo se pode prosseguir com os testes, a fim de concretizar mais uma etapa que é a avaliação do equipamento quanto à carga e sua calibração.

b) Calibração

Para a calibração e verificação do comportamento do sinal quanto a carga a aplicada foi utilizado o equipamento de ensaios mecânicos de tração e compressão. Assim como a utilização de seu respectivo programa de controle de cargas. A carga neste caso foi imposta e após cerca de 5 minutos, tempo de estabilização, foi adquirido o valor do sinal.

No equipamento de ensaios mecânicos (Figura 3.17a) foram adaptados os dispositivos para ensaios de compressão, mostrado em detalhe na Figura 3.17b. Em máquina de ensaios mecânicos da Shimadzu é possível selecionar a carga desejada. Foram realizados cinco testes, onde no primeiro, segundo e quarto testes foram aplicadas cargas variando 20 kgf a partir do ponto zero (sem carga). O terceiro e quinto teste teve como ponto inicial o ultimo ponto (200 kgf) do teste precedente. Isso foi realizado para se analisar a histerese do material. Nos três primeiros testes para a aquisição de dados utilizou-se uma frequência de 1 Hz durante 10 segundos resultando em dez pontos para análise. Os dois últimos testes foram realizados com uma frequência de 100 Hz durante 10 segundos, adquirindo 1000 pontos.

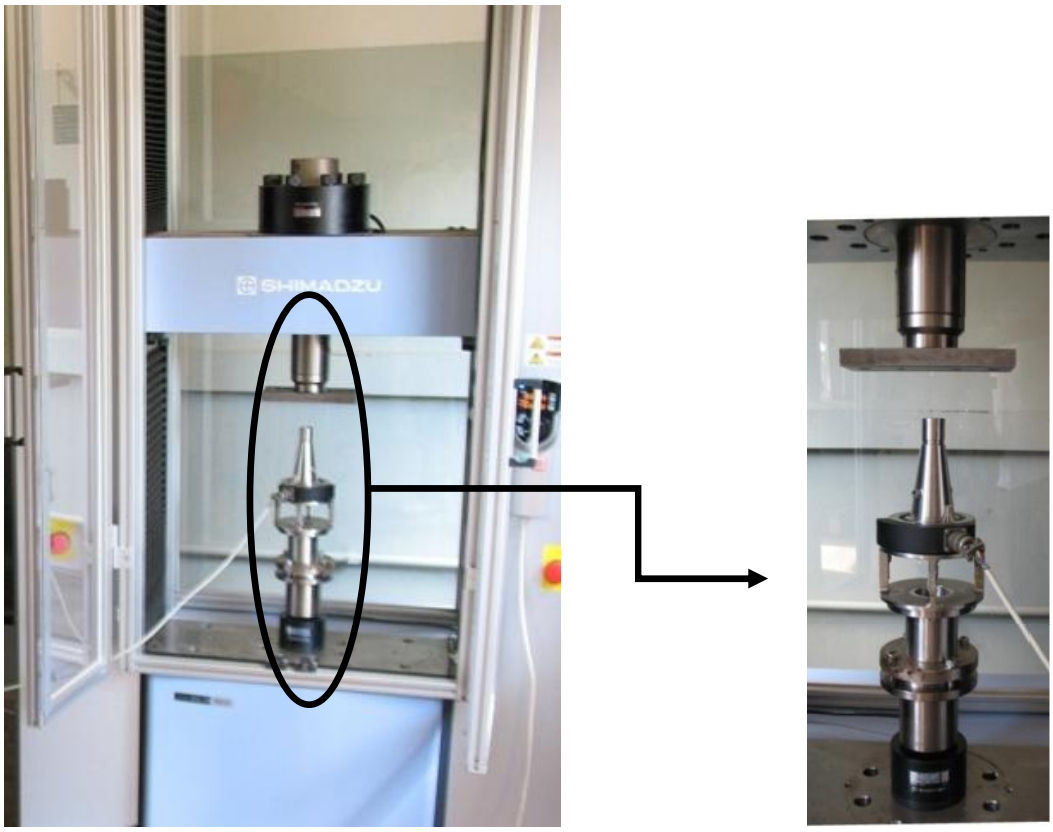


Figura 3. 17 – Instalação do dinamômetro no equipamento de ensaios de tração e compressão, onde (a) mostra o equipamento e (b) o detalhe da instalação

Para que os dados fossem adquiridos foi utilizado o programa desenvolvido no LabView como mostrado na Figura 3.18. Para analisar os dados foi utilizada uma planilha eletrônica. Este programa tem as opções de seleção de tempo e taxa de aquisição que são selecionadas na tela do programa e gera um arquivo contendo os dados de tempo e o valor do sinal adquirido.

Os testes realizados no equipamento de ensaios mecânicos apresentaram resultados satisfatórios. A Tabela 3.3 mostra os valores médios dos testes realizados no equipamento de ensaios mecânicos. O primeiro teste foi realizado de forma independente dos demais. Com a taxa de aquisição de 1 Hz durante 10 s e sem análise da histerese do dinamômetro.

O segundo e terceiro testes, assim como o quarto e quinto testes, foi analisada a histerese do dinamômetro. Para isto após adquirir o primeiro ponto sem carga, foram adquiridos os dados com cargas múltiplas de 20 kgf até a máxima de 200 kgf. Na primeira análise de histerese a taxa de aquisição foi de 1 Hz durante 10s par cada ponto. Na segunda análise a taxa de aquisição foi de 100 Hz durante 10s.

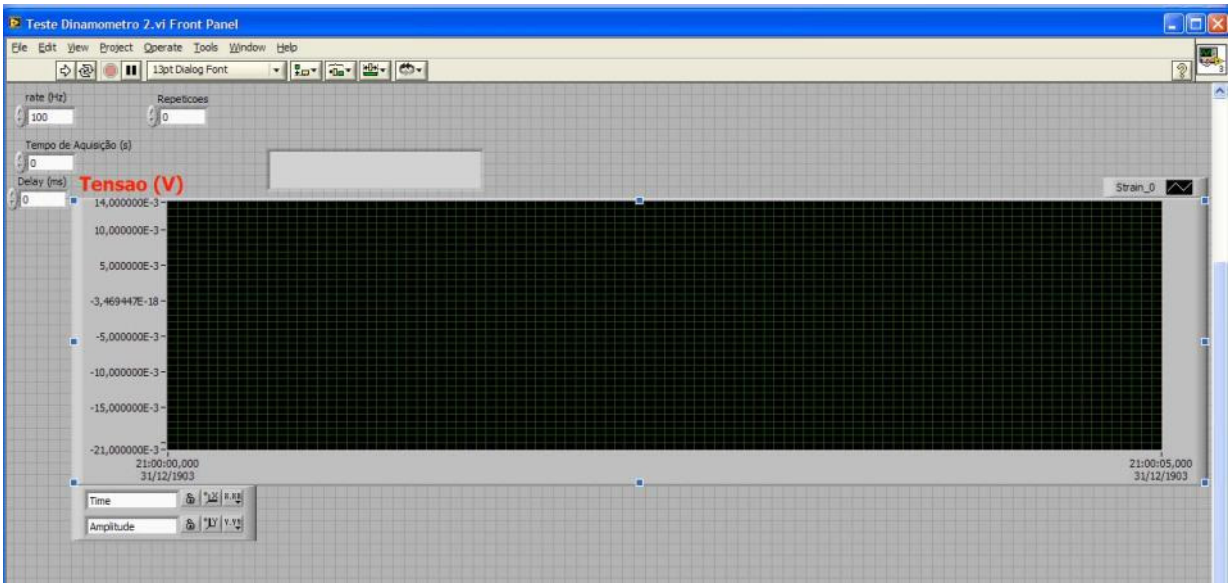


Figura 3. 18 – Visualização do programa utilizado para a aquisição dos dados

Tabela 3. 3 – Valores da carga empregada com as respectivas médias dos dados adquiridos para a aquisição utilizando o equipamento de ensaios mecânicos.

Carga empregada (kg)	Média dos dados da 1ª calibração	Média dos dados da 2ª calibração	Média dos dados da 3ª calibração	Média dos dados da 4ª calibração	Média dos dados da 5ª calibração
0	-0,000009766	-0,000010151	-0,000008996	-0,000012615	-0,000010263
20	-0,000010009	-0,000010028	-0,000008379	-0,000011928	-0,000009930
40	-0,000009731	-0,000009466	-0,000007786	-0,000011745	-0,000009701
60	-0,000009065	-0,000008988	-0,000007223	-0,000011329	-0,000009311
80	-0,000008556	-0,000008364	-0,000006684	-0,000010910	-0,000008980
100	-0,000008341	-0,000007763	-0,000006322	-0,000010300	-0,000008446
120	-0,000007794	-0,000007270	-0,000005875	-0,000009520	-0,000008012
140	-0,000007123	-0,000006684	-0,000005328	-0,000008802	-0,000007480
160	-0,000006530	-0,000006152	-0,000004858	-0,000008082	-0,000007006
180	-0,000005898	-0,000005590	-0,000004573	-0,000007223	-0,000006546
200	-0,000005004	-0,000004881	-0,000004881	-0,000006436	-0,000006436

A Figura 3.19 mostra o comportamento das cinco calibrações realizadas no equipamento de ensaios mecânicos. Pode-se notar que todos seguem a mesma tendência de evolução com relação à carga imposta. Estes resultados também mostram que o dinamômetro apenas variou o offset. Pode-se que a primeira, segunda e quarta curvas são as que serviram de ponto inicial. Ou seja, a terceira e quinta calibração são as curvas de análise de histerese.

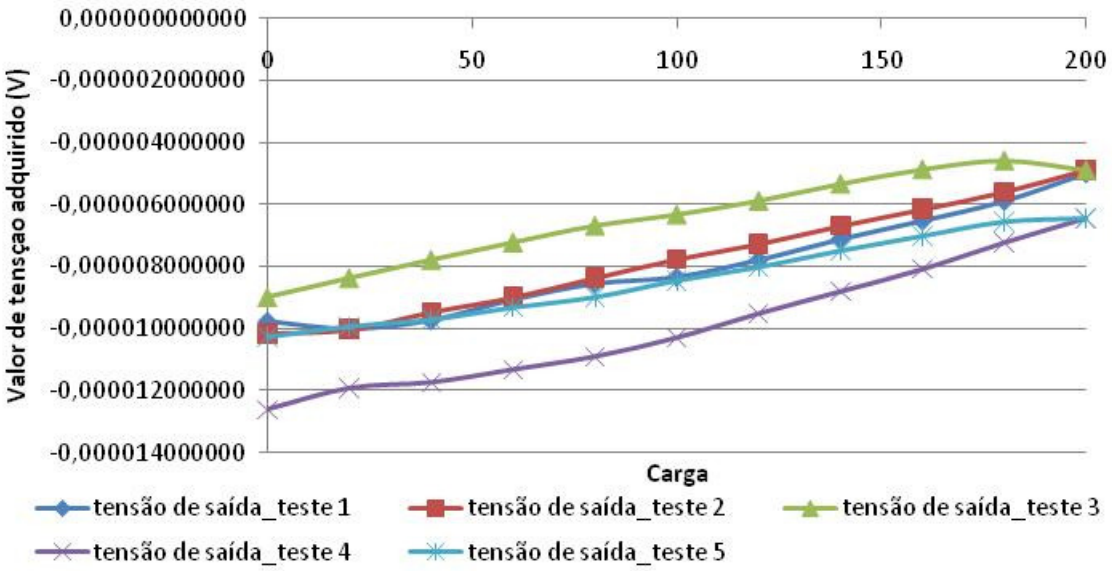


Figura 3. 19 – Comportamento das curvas de calibração

Analisando as curvas de calibração, mostradas na Tabela 3.4, que correspondem à equação da regressão linear das curvas exibidas na Figura 3.19. Observa-se que os coeficientes angulares são próximos. Deve-se ser considerado que as equações estão multiplicadas por 10^{-6}.

Tabela 3. 4 – Curvas de calibração e R2 para cada ensaio realizado

Curva de calibração do 1º ensaio	y = (38.82x + 409.9)*E-6 R^2 = 0.961
Curva de calibração do 2º ensaio	y = (36.62x + 384.1)*E-6 R^2 = 0.994
Curva de calibração do 3º ensaio	y = (43.20x + 378.4)*E-6 R^2 = 0.965
Curva de calibração do 4º ensaio	y = (32.02x + 417.0)*E-6 R^2 = 0.977
Curva de calibração do 5º ensaio	y = (48.02x + 502.1)*E-6 R^2 = 0.990

Os ensaios realizados com o equipamento de ensaios mecânicos apresentaram resultados coerentes, onde a curva de ajuste levantada apresentou alto coeficiente de correlação, sendo adotada a média dos ensaios como valor final a ser utilizado.

Por fim, antes do inicio dos testes foi observado um índice de ruído do sinal quando imposta a calibração selecionada. Este foi problema foi amortizado com a utilização de dois filtros (média móvel e passa-baixa) na programação do software utilizado para o acompanhamento dos testes. O esquemático da rotina computacional utilizada para controle geral do sistema pode ser visualizada na Figura 3.20.

Uma vez que o dinamômetro está corretamente calibrado para evidenciar o valor desejado de força, se iniciou os testes de avaliação da ferramenta pelo desgaste do material brasado.

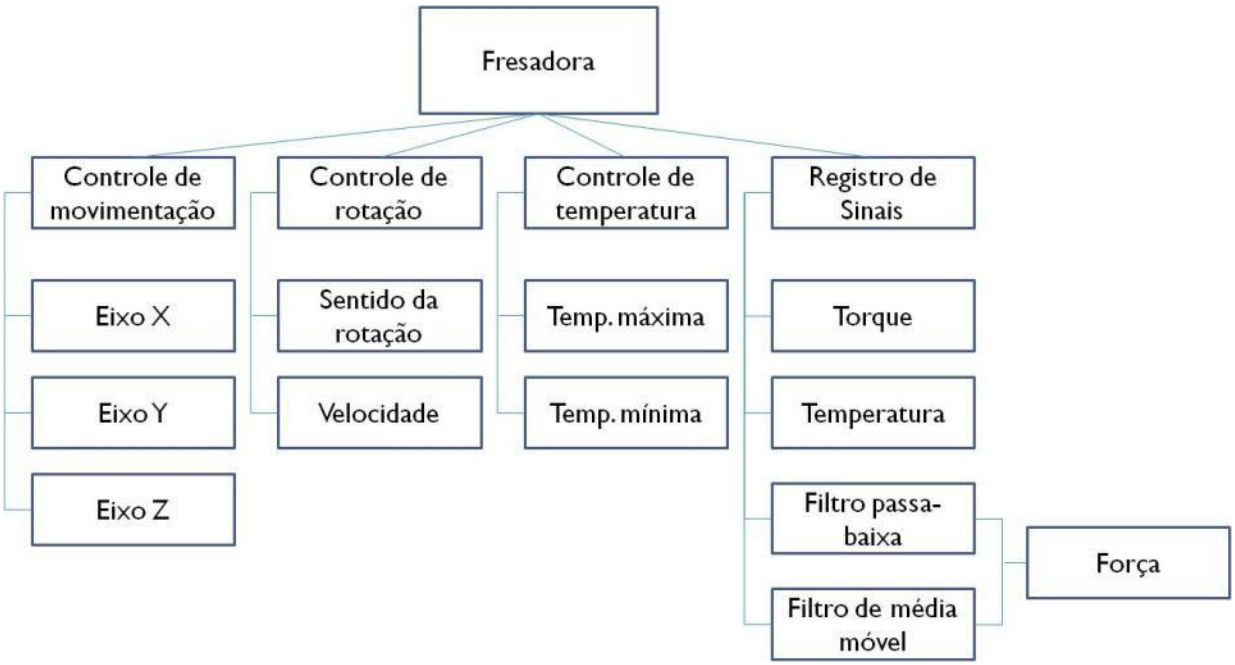


Figura 3. 20 – Visualização do esquemático da rotina computacional utilizada para controle e operação do sistema

3.4.2. Ensaios a serem realizados

Neste trabalho, o ensaio simulativo visa analisar e comparar dentre as duas granulometrias qual destas apresenta o melhor desempenho para uma ferramenta de destruição em poços de petróleo. Utilizando o equipamento de simulação de desgaste de ferramentas e procurando estabelecer o tipo de ferramenta mais adequada para tal operação, assim como analisar se o depósito brasado foi realizado de forma satisfatória.

A partir das placas brasadas dentre as granulometrias, fina e grossa, que foram estudadas pela análise de imagem das varetas brasadas e depositadas; estas foram selecionadas entre os pontos que apresentaram melhores resultados.

Para isto, a partir das placas de teste iniciais, foram usinadas para que pudessem ser alocadas de forma adequada na cuba dentro da máquina de ensaio. Após serem usinadas foram selecionados os pontos de melhor representatividade de um material com melhor acabamento brasado dentre as amostras.

Os parâmetros estabelecidos para este ensaio foram: temperatura, força, placa de teste, tempo, rotação e granulometria, sendo estes dois últimos variáveis para cada ensaio realizado.

A temperatura foi estabelecida para cerca de 80 ℃. Sendo mais importante saber que a área de contato peça-carboneto estabelece uma zona de maior temperatura. A força

aplicada manteve-se em cerca de 150 a 200 kgf. Como descrito anteriormente esta carga foi selecionada para segurança da integridade do dinamômetro. Uma carga maior poderia comprometer o equipamento devido a ocorrência de alguma instabilidade do sistema ou o aumento da resultante do vetor força com vetor torque que pode sofrer um aumento abrupto em consequência do engastamento do corpo de prova com um carboneto da superfície brasada. O corpo de prova foi acoplado diretamente ao dinamômetro fixado por parafusos.

O tempo de ensaio para cada placa de teste foi estabelecido em quatro horas para o desgaste. Sendo que a cada 30 minutos realizava-se a pausa do ensaio e se mensurava a massa do corpo de prova e da placa de teste. Os corpos de prova foram confeccionados de aço ABNT 1045 temperado e suas dimensões mostradas na Figura 3.21. Estas dimensões foram estabelecidas de forma arbitrária. Foi realizada uma análise da dureza de algumas dos corpos de prova sendo selecionados de forma aleatória. Como pode ser visto na Tabela 3.5, os corpos de prova apresentaram uma média de 48 Rockweel C (equivalente a 497 Vickers). Este ensaio de dureza seguiu a norma DIN 50103.

Foram estabelecidas duas granulometrias, sendo fina e grossa. A primeira é composta por carbonetos de 2 a 4 mm e a segunda de 6 a 8 mm. Sendo esta análise de suma importância porque denota qual o desgaste é mais acentuado, mantendo-se as demais variáveis constantes. Também porque não há estudos específicos com esta visão de aplicação.

A rotação foi estabelecida de acordo com o que mais é utilizado em campo de prospecção de petróleo. Foram utilizados dois valores de rotações de 75 e 150 rpm. Procurando avaliar inicialmente se a rotação possui uma influência significativa no desgaste. E possuindo esta influência evidenciando qual a mais importante. Lembrando que como descrito anteriormente que muitas empresas do ramo aconselham a utilização de 100 rpm.

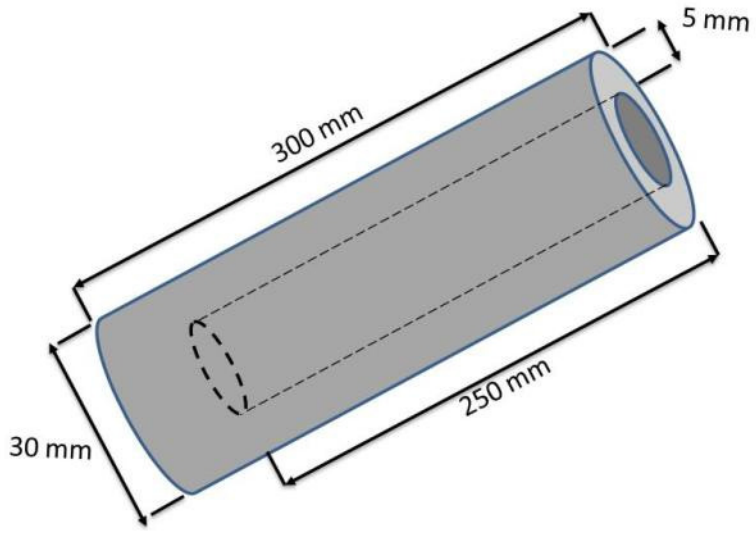


Figura 3. 21 – Esquemático do corpo de prova utilizado

Tabela 3. 5 – Medição dos corpos de prova de aço 1045 temperados selecionados de forma aleatória

AMOSTRA	Dureza Rockwell C				
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
AMOSTRA 1	46	49	50	51	47
AMOSTRA 4	41	46	45	46	46
AMOSTRA 5	51	51	51	51	49
AMOSTRA 7	45	46	48	47	43
AMOSTRA 10	46	49	46	51	48
AMOSTRA 12	50	52	52	52	52
MÉDIA	47	49	49	50	48
DESVIO	3,6	2,5	2,8	2,5	3,0

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Recebimento de consumíveis

Inicialmente se procedeu à análise dos consumíveis através da gravimetria e processamento de imagem das varetas de carboneto de tungstênio com adição de cobalto (WC-Co) em uma matriz de alpaca (liga de Cu, Zn, Ni). Os resultados destas análises de recebimento no contexto da proposição da metodologia proposta (Figura 3.1) são apresentados a seguir.

4.1.2. Análise gravimétrica

Com o intuito de determinar a massa de WC-Co foram mensuradas as massas dos consumíveis, estando submersos em água destilada (para fins de cálculos) e suspensas no ar. Baseado nos resultados obtidos com a medição de massa e realizado os cálculos descritos na metodologia obteve-se a concentração da porcentagem de carbonetos de tungstênio em cada vareta estudada. Os resultados são mostrados na Tabela 4.1.

De acordo com um estudo desenvolvido pelo Laprosolda em conjunto com a Petrobrás foi levantado que é aceitável o recebimento de consumíveis com valores entre 44,13 e 53,32% para a proporção mássica do WC-Co, dependendo do estado visual e distribuição dos carbonetos (SCOTTI, FERRARESI, VILARINHO, 2008).

Com isto é possível afirmar que, a princípio, quatro dentre seis varetas apresentaram resultados dentro dos padrões aceitáveis. Entretanto, somente alinhada com a análise de imagens da vareta é possível obter melhores resultados para a aceitação quanto ao recebimento dos consumíveis (varetas), pois além da proporção correta de carbonetos, a sua distribuição ao longo da vareta também ocorre. Tal verificação da distribuição de carbonetos é mostrada a seguir, realizada com processamento de imagens.

Tabela 4.1 – Resultados da gravimetria apresentando os valores de porcentagem de massa dos carbonetos em cada amostra por cada granulometria, sendo P_{ar} a massa media em ar e $P_{água}$ a massa media em água

Medição	Fino 1	Fino 2	Fino 3	Grosso 1	Grosso 2	Grosso 3
Massa medida em ar (g)	277,36	254,56	296,57	482,66	424,65	446,15
Massa medida em água (g)	252,73	227,76	265,42	438,41	387,79	405,31
Empuxo (P_{ar}-$P_{água}$)	24,63	26,80	31,15	44,25	36,86	40,84
Volume da amostra (cm^3)	25,11	27,32	31,75	45,11	37,57	41,63
Densidade amostra (Kg/m^3)	11,05	9,32	9,34	10,70	11,30	10,72
Volume do WC-Co (%)	41,84	10,35	10,74	35,53	46,48	35,82
Massa do WC-Co (g)	149,59	40,25	48,58	228,19	248,69	212,38
Massa do WC-Co (%)	**53,93**	**15,81**	**16,38**	**47,28**	**58,56**	**47,60**

4.1.2. Análise de imagens das varetas

Dando continuidade a etapa de recebimento de consumível uma vez que analisada sua relação de massa entre a alpaca e os carbonetos é realizada a análise dos contornos do material. Esta análise, como descrito anteriormente, é importante para que o funcionário responsável pelo processo de brasagem receba os consumíveis em condições adequadas para que possa concretizar o processo de forma satisfatória ou não, que será posteriormente analisada pelos ensaios de produção.

Baseando-se na análise realizada por Araújo *et al*. (2005), procurou-se desenvolver uma análise de imagem mais completa de cada vareta. Para isto, foram analisadas seis diferentes posições angulares de observação da mesma vareta, girando-a de 0 a 75 graus. Com isto procurou-se descartar a influência de fatores externos como o operador que poderia de certo ângulo aceitar ou desqualificar o consumível.

Baseando-se nisto, o ensaio deverá mostrar que a variação do ângulo de análise pode ou não classificar o consumível como bom ou ruim. Esta classificação é dita pela rotina utilizada que após retornar a figura em formato binário, analisa os contornos superiores e inferiores. Distinguindo-os estes são tratados como sinais elétricos para que sejam realizadas as análises estatísticas, retornando o resultado de qualificada ou não.

Durante o processamento e análise dos dados, a rotina computacional retorna diversas variáveis. D1 e D2 correspondem ao desvio padrão do contorno superior e inferior, respectivamente, da geometria do consumível após serem diferenciadas pelo contorno binário retornado pelo programa. P1 e P2 se referem à densidade da normal padrão da linha superior e inferior do contorno do consumível. A variável p_rel é a densidade da normal padrão relativa ao contorno superior e inferior do consumível, sendo baseado numa relação

de P1 e P2, sendo uma variável final de análise assim como difZ que corresponde ao valor da Transformada Rápida de Fourier em relação aos contornos do consumível.

Realizadas as análises das imagens nos ângulos desejados (de 0 a 75º variando 15°) foram obtidos estes valores destas variáveis. A rotina computacional se baseia numa relação das variáveis p_rel e difZ, onde a vareta é considerada boa caso o valor de difZ seja menor ou igual a 70 e p_rel menor ou igual a 50, que foram determinadas de forma arbitrárias. Fora desta faixa, o consumível é considerado ruim (Araújo *et al.*, 2005).

As variáveis D1, D2, P1 e P2 correspondem à linha verde (contorno superior) e vermelha (contorno inferior) (FIG.4.1). O valor de p_rel é baseado na relação de P1 e P2 conforme a equação 4.1.

$$\mathrm{p_rel} = \left|\frac{\mathrm{P1-P2}}{\mathrm{P1}} \times 100\right| \qquad 4.1$$

A segunda amostra do consumível de granulometria fina se mostrou com o melhor desempenho dentre os outros. Retornando os melhores valores médios e com os menores desvios padrões dentre as demais amostras. As Figuras 4.1 a 4.5 mostram os resultados gerados pelo programa que são apresentados sequencialmente. Respectivamente, são mostradas: a porção da imagem a ser analisada e seus contornos superior e inferior (Figura 4.1), a frequência de cada contorno (Figura 4.2), o histograma dos mesmos (Figura 4.3) e as suas respectivas probabilidades acumuladas (Figura 4.4 e 4.5).

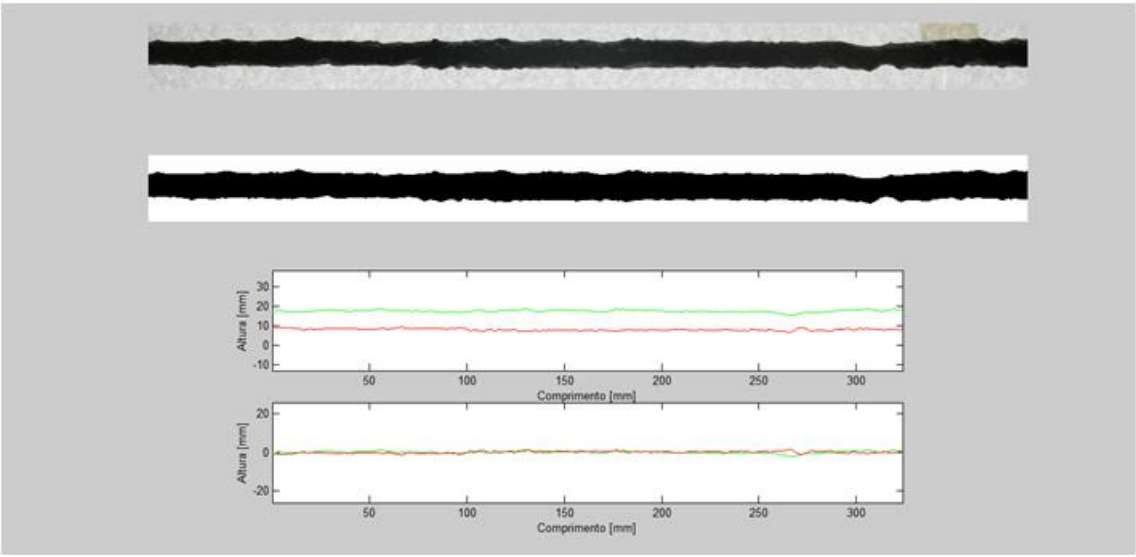


Figura 4. 1 - Porção da imagem a ser analisada com seus respectivos contornos superior e inferior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina

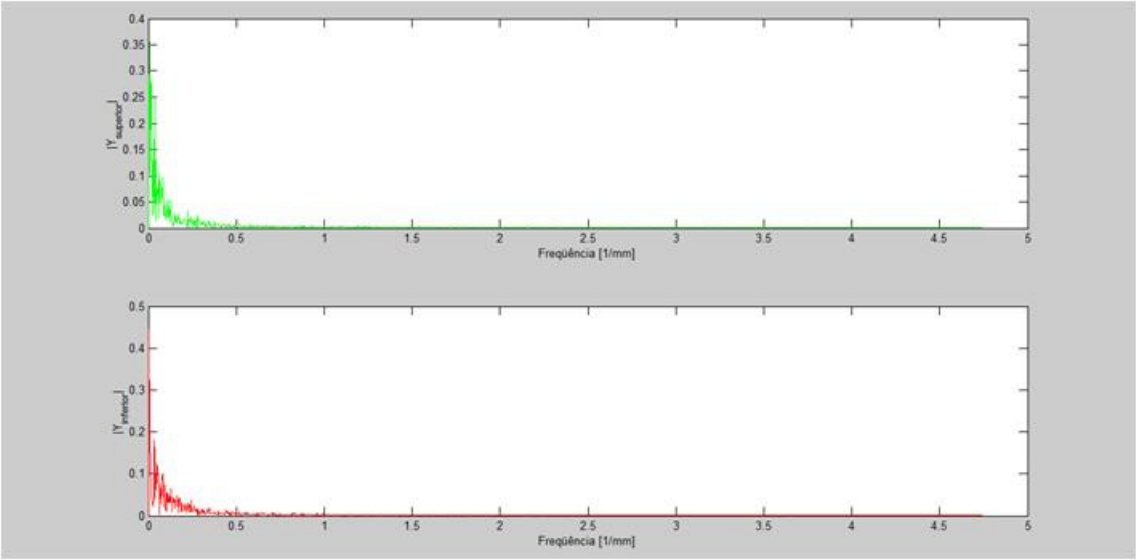


Figura 4. 2 - Frequência de cada contorno superior e inferior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina

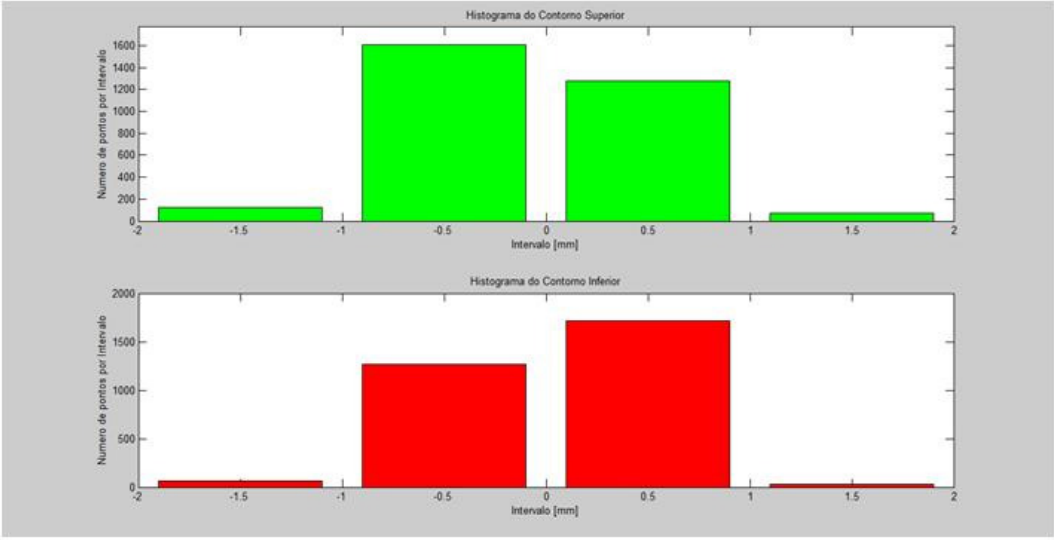


Figura 4. 3 - Histograma dos mesmos gerados dos contornos superiores e inferiores da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina

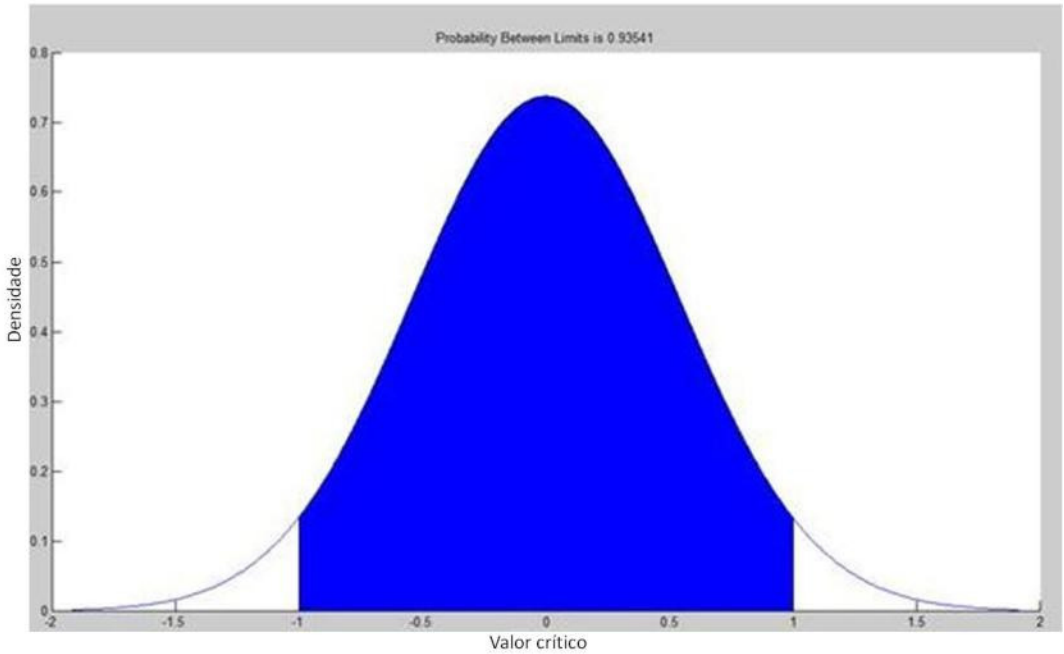


Figura 4. 4 - Probabilidade acumuladas do contorno superior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina

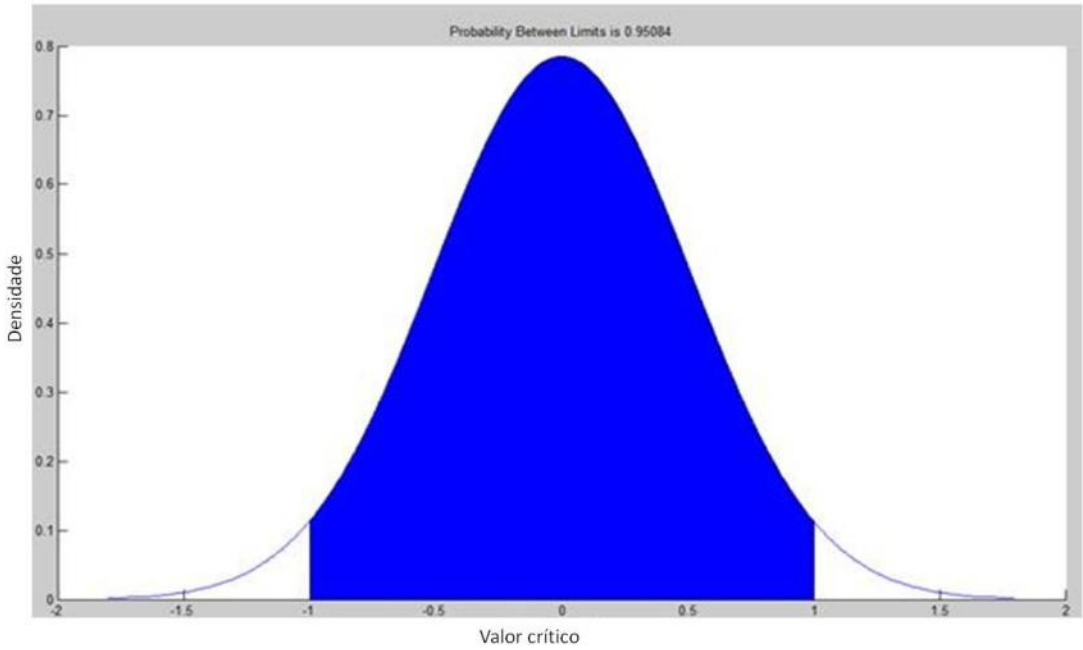


Figura 4. 5 - Probabilidade acumuladas do contorno inferior da imagem a ser analisada rotacionada no ângulo de 30º em relação da posição inicial, da segunda amostra de granulometria fina

As terceiras amostras de cada granulometria dos consumíveis se mostraram com o menor desempenho dentre os outros. Retornando os valores médios e desvios padrões

mais distantes dos padrões estabelecidos. As Figuras 4.6 a 4.10 mostram os resultados gerados pelo programa que são apresentados sequencialmente da terceira amostra de granulometria grossa. Respectivamente, são mostradas: a porção da imagem a ser analisada e seus contornos superior e inferior (Figura 4.6), a frequência de cada contorno (Figura 4.7), o histograma dos mesmos (Figura 4.8) e a probabilidade suas respectivas probabilidades acumuladas (Figura 4.9 e 4.10).

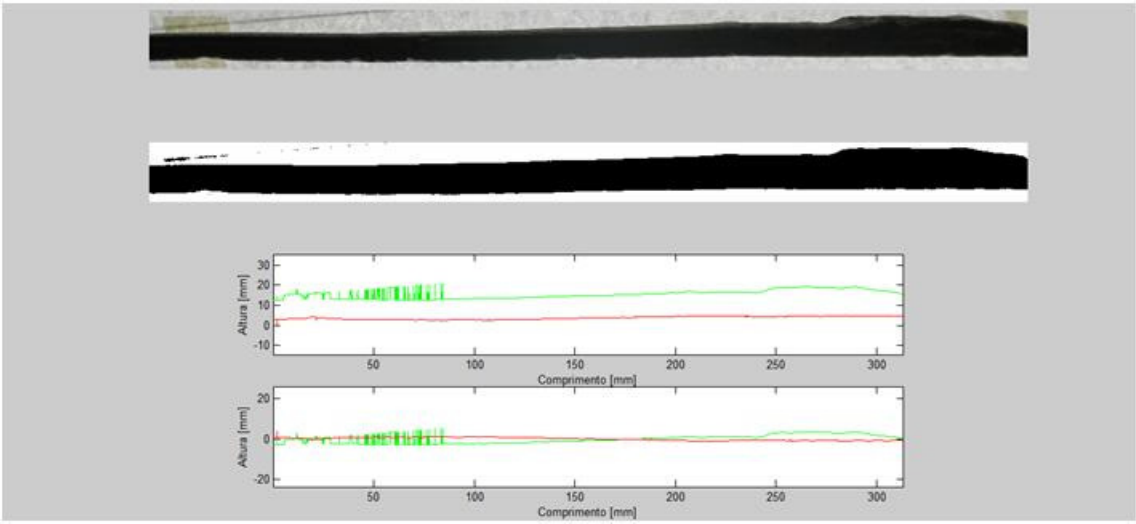


Figura 4. 6 - Porção da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa

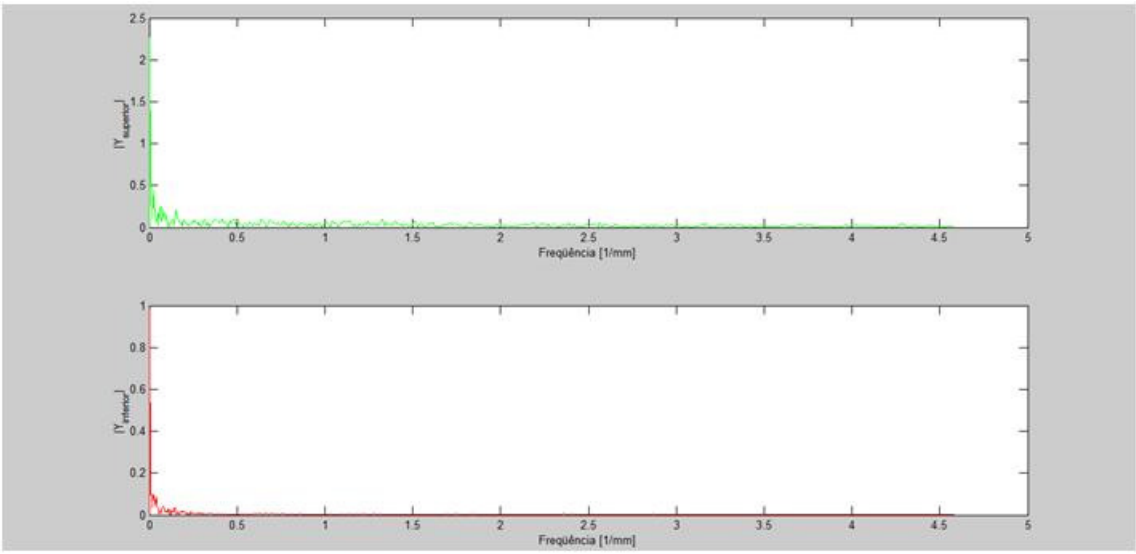


Figura 4. 7 - Freqüência de cada contorno superior e inferior da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa

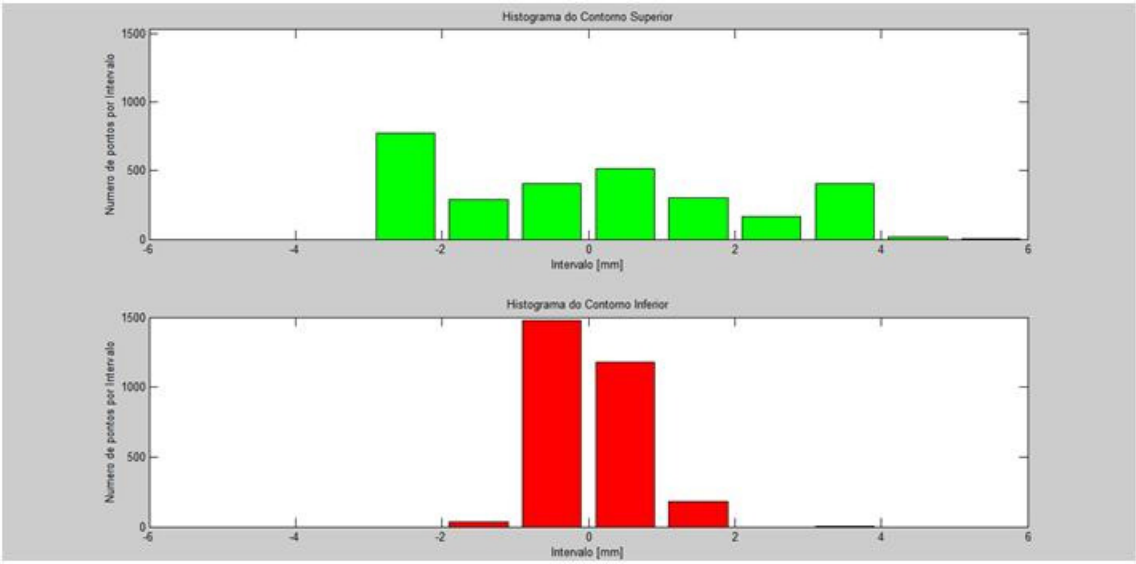


Figura 4. 8 - Histograma dos mesmos gerados dos contornos superiores e inferiores da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa

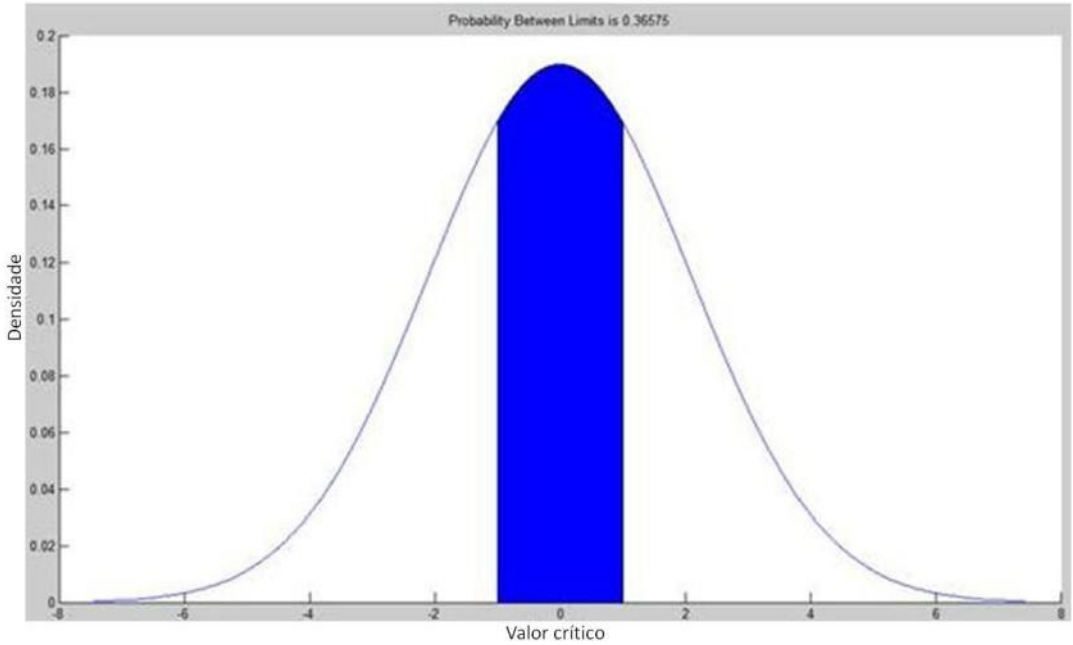


Figura 4. 9 - Probabilidade acumuladas do contorno superior da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa

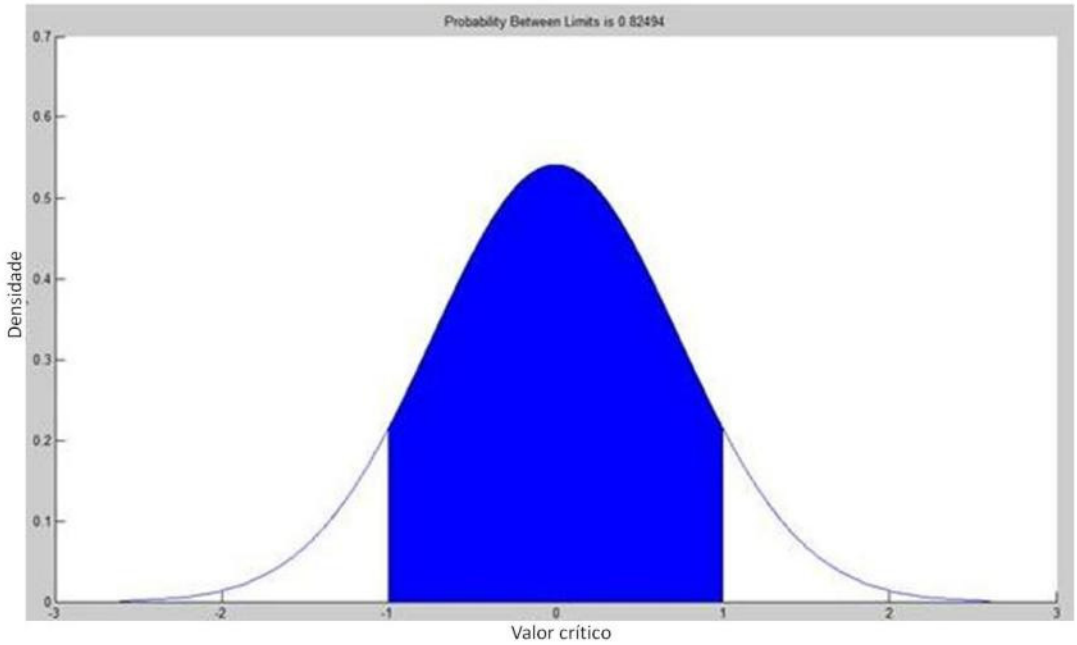


Figura 4. 10 - Probabilidade acumuladas do contorno inferior da imagem a ser analisada com a devida escala para análise na posição inicial, da terceira amostra de granulometria grossa

Pode-se observar que pelas probabilidades acumuladas é possível já distinguir quais amostras apresentam melhores resultados. No caso, tem-se que na amostra de granulometria fina obteve-se um gráfico de probabilidade acumulada de maior base e área. No caso da amostra de granulometria grossa obteve-se uma área de menores proporções.

Depois de capturadas as imagens de cada consumível nos ângulos desejados, o programa foi executado analisando as mesmas. Das Tabelas 4.2 a 4.7 são apresentados os resultados referentes por cada granulometria e amostra. As amostras Fina 1 e Fina 2 apresentaram os melhores resultados das análises obtendo no primeiro caso resultado bom em cinco dos seis ângulos estudados e o segundo caso resultados classificado como bom em todos os casos. A amostra Grossa 2 apresentou resultados que a priori não são conclusivos por retornar três resultados bons e três ruins, necessitando de uma análise maior para o resultado final. A amostra Grossa 1 foi rejeitada por apresentar 4 resultados ruins. Os terceiros casos de cada consumível de cada granulometria (Fina 3 e Grossa 3) mostraram resultados bastantes fora dos intervalos de padrão estabelecidos, sendo necessariamente descartados.

Tabela 4. 2 – Resultados da análise de imagem da 1ª amostra de consumível de granulometria fina

Medição	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Desvio padrão do contorno superior	0,5411	0,6247	0,6921	16.996	0,5245	0,5212
Desvio padrão do contorno inferior	0,5083	0,7566	0,8668	11.457	0,7802	0,8209
Resolução utilizada (mm)	0,10525	0,094566	0,097563	0,10479	0,093309	0,093442
Máxima inferência mm	0,052627	0,047283	0,048781	0,052395	0,046654	0,046721
Densidade da normal padrão do contorno superior	0,9354	0,8905	0,8515	0,4437	0,9434	0,945
Densidade da normal padrão do contorno inferior	0,9508	0,8137	0,7514	0,6172	0,8001	0,7769
Densidade relativa da normal padrão dos contornos	1,6496	8,6268	11,7581	39,1092	15,1937	17,7887
Resultado da Transformada Rápida de Fourier	6,1371	34,0915	13,2213	70,9047	44,5863	58,4133
Condição da vareta	Boa	Boa	Boa	Ruim	Boa	Boa

Tabela 4. 3 – Resultados da análise de imagem da 2ª amostra de consumível de granulometria fina

Medição	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Desvio padrão do contorno superior	12.934	16.830	13.283	13.280	12.717	12.142
Desvio padrão do contorno inferior	14.169	19.255	13.022	11.929	13.003	0,987
Resolução utilizada (mm)	0,10271	0,10603	0,094137	0,096869	0,098932	0,1077
Máxima inferência mm	0,051357	0,053014	0,047068	0,048434	0,049466	0,053849
Densidade da normal padrão do contorno superior	0,5606	0,4476	0,5484	0,5486	0,5683	0,5898
Densidade da normal padrão do contorno inferior	0,5197	0,3965	0,5575	0,5982	0,5581	0,689
Densidade relativa da normal padrão dos contornos	7,2952	11,4217	1,6435	9,0376	1,7954	16,8104
Resultado da Transformada Rápida de Fourier	39,8820	19,5916	38,1710	43,9815	26,6467	41,3926
Condição da vareta	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa

Tabela 4. 4 – Resultados da análise de imagem da 3ª amostra de consumível de granulometria fina

Medição	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Desvio padrão do contorno superior	12.558	13.294	14.476	15.791	17.455	16.521
Desvio padrão do contorno inferior	0,2855	0,3549	0,4795	0,7214	0,2572	0,3264
Resolução utilizada (mm)	0,10368	0,096715	0,094048	0,099714	0,10341	0,099342
Máxima inferência mm	0,051839	0,048357	0,047024	0,049857	0,051705	0,049671
Densidade da normal padrão do contorno superior	0,5742	0,5481	0,5103	0,4734	0,4333	0,455
Densidade da normal padrão do contorno inferior	0,9995	0,9952	0,963	0,8343	0,9999	0,9978
Densidade relativa da normal padrão dos contornos	74,0876	81,5747	88,7050	76,2230	130,7748	119,2953
Resultado da Transformada Rápida de Fourier	72,4595	83,9756	69,2186	64,7648	84,4193	81,1532
Condição da vareta	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim

Tabela 4. 5 – Resultados da análise de imagem da 1ª amostra de consumível de granulometria grossa

Medição	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Desvio padrão do contorno superior	0,6192	0,5774	14.124	0,8762	16.665	19.857
Desvio padrão do contorno inferior	13.527	11.144	0,8324	0,5498	0,6717	10.200
Resolução utilizada (mm)	0,098862	0,1035	0,10647	0,10752	0,092508	0,09424
Máxima inferência mm	0,049431	0,05175	0,053236	0,053758	0,046254	0,04712
Densidade da normal padrão do contorno superior	0,8937	0,9167	0,5211	0,7462	0,4515	0,3855
Densidade da normal padrão do contorno inferior	0,5403	0,6305	0,7704	0,931	0,8634	0,6731
Densidade relativa da normal padrão dos contornos	39,5485	31,2247	47,8501	24,7651	91,2199	74,6221
Resultado da Transformada Rápida de Fourier	302,3458	189,7410	49,9145	38,8975	74,3825	68,6762
Condição da vareta	Ruim	Ruim	Boa	Boa	Ruim	Ruim

Tabela 4. 6 – Resultados da análise de imagem da 2ª amostra de consumível de granulometria grossa

Medição	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Desvio padrão do contorno superior	0,967	0,609	0,347	0,4195	11.078	11.199
Desvio padrão do contorno inferior	14.191	13.141	10.822	0,9111	0,7729	0,7246
Resolução utilizada (mm)	0,089463	0,089399	0,092539	0,094637	0,095205	0,09165
Máxima inferência mm	0,044732	0,0447	0,046269	0,047318	0,047602	0,045825
Densidade da normal padrão do contorno superior	0,6989	0,8994	0,996	0,9829	0,6333	0,6281
Densidade da normal padrão do contorno inferior	0,519	0,5533	0,6445	0,7276	0,8043	0,8324
Densidade relativa da normal padrão dos contornos	25,7421	38,4789	35,2921	25,9727	26,9946	32,5285
Resultado da Transformada Rápida de Fourier	24,3884	151,5377	140,8708	95,2897	45,0895	61,8381
Condição da vareta	Boa	Ruim	Ruim	Ruim	Boa	Boa

Tabela 4. 7 – Resultados da análise de imagem da 3ª amostra de consumível de granulometria grossa

Medição	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Desvio padrão do contorno superior	16.050	15.620	21.019	18.836	25.513	18.327
Desvio padrão do contorno inferior	0,4783	0,4146	0,7374	0,4018	0,9128	0,4376
Resolução utilizada (mm)	0,098678	0,099554	0,10895	0,10542	0,106	0,11087
Máxima inferência mm	0,049339	0,049777	0,054474	0,05271	0,053	0,055435
Densidade da normal padrão do contorno superior	0,4667	0,478	0,3658	0,4045	0,3049	0,4147
Densidade da normal padrão do contorno inferior	0,9634	0,9841	0,8249	0,9872	0,7267	0,9777
Densidade relativa da normal padrão dos contornos	106,4147	105,9048	125,5464	144,0411	138,3388	135,7624
Resultado da Transformada Rápida de Fourier	55,1893	45,2175	86,9538	82,1480	76,9473	52,2068
Condição da vareta	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim

Algumas amostras apresentaram resultados divergentes entre si. Estes resultados são devidos ao ângulo de análise e a superfície em questão. Como a primeira amostra de granulometria fina que apresentou um resultado ruim no ângulo de 45 graus. Isto porque a amostra apresentava uma parte não aceitável neste ângulo. Isto é, uma parte lisa da amostra que em relação ao ângulo inicial não poderia ser visuzalizado.

Analisando a média dos resultados apresentados, a Tabela 4.8 mostra os valores de cada variável necessária para a análise. E mostra que apenas dois consumíveis de granulometria fina são adequados para a aprovação. Os demais consumíveis não apresentaram resultados aceitáveis pela média.

Tabela 4. 8 – Valores médios e os desvios padrões das variáveis p_rel (Densidade relativa da normal padrão dos contornos) e difZ (Resultado da Transformada Rápida de Fourier)

Amostra	Resultados da média		Resultados do desvio padrão		Avaliação do consumível
	p_rel	difZ	p_rel	difZ	
Fino 1	15,6877	37,8924	12,7718	25,2477	Boa
Fino 2	8,0006	34,9442	5,8276	9,6187	Boa
Fino 3	95,1101	75,9985	23,9991	8,3163	Ruim
Grosso 1	51,5384	120,6596	26,0549	104,2266	Ruim
Grosso 2	30,8348	86,5024	5,3943	51,8541	Ruim
Grosso 3	126,0014	66,4438	16,4963	17,6495	Ruim

Caso fossem aceitas todas as amostras dentro das faixas abrangentes da média ao limites superiores e inferiores dos resultados das variáveis p_rel e difZ, seria possível considerar mais dois consumíveis, neste caso, de granulometrias grossa. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os valores médios com os limites superiores e inferiores, baseado nos valores do desvio padrão, das variáveis, respectivamente. Entretanto os resultados estão muito longe do valor estabelecido na análise e mesmo assim não podendo ser aceitos numa avaliação mais abrangente.

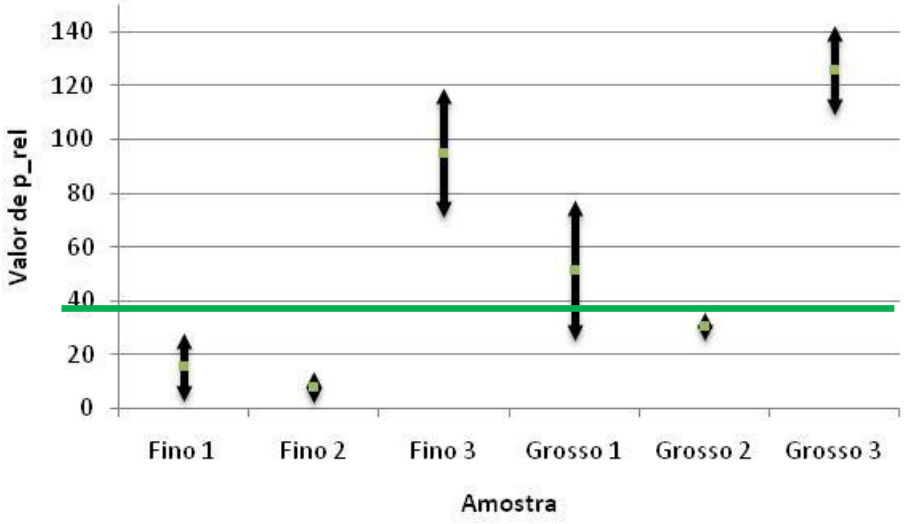


Figura 4. 11 – Representação gráfica da variável p_rel apresentando seu valor médio e seus limites inferiores e superiores de cada amostra dos dois tipos de granulometria tendo o valor de referência de 70 unidades para a variável

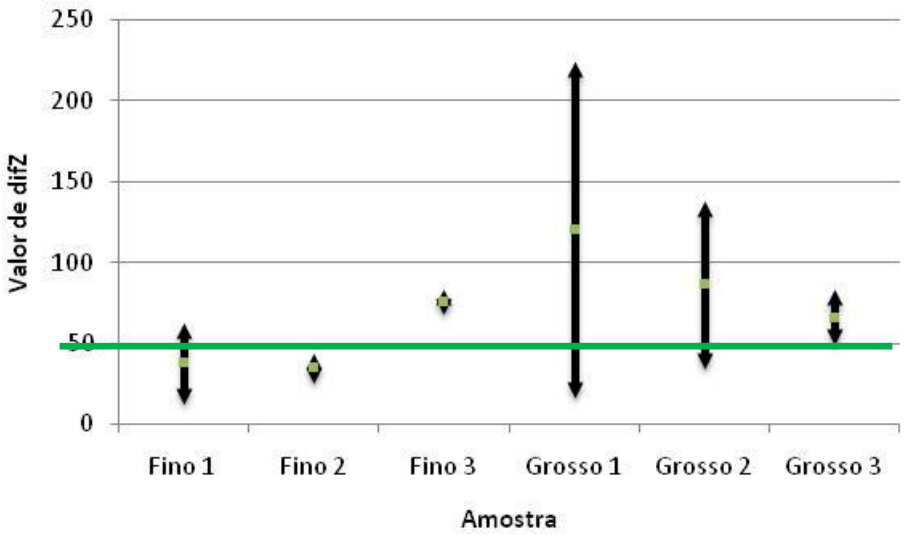


Figura 4. 12 – Representação gráfica da variável difZ apresentando seu valor médio e seus limites inferiores e superiores de cada amostra dos dois tipos de granulometria tendo o valor de referência de 50 unidades para a variável

Como descrito na metodologia, as amostras de consumíveis são fabricadas em fornos apoiadas sobre uma base o que confere um aspecto liso na parte “inferior”. Desta forma, uma análise mais abrangente da variação dos ângulos não apresentaria bons resultados. Apenas resultados com condições do consumível não aceitáveis.

Considerando os valores encontrados pela gravimetria e associando os resultados da análise de imagem, apenas a primeira amostra de granulometria fina foi considerada adequada dentro dos padrões. Isto por apresentar a média dos resultados da análise de imagem como consumível aceitável e por apresentar o resultado da massa de WC-Co dentre dos padrões utilizados neste trabalho.

Os demais resultados de cada consumível por cada granulometria e ângulo são mostrados no Anexo B. São apresentados os 36 resultados que foram obtidos pela análise de imagem gerada pela rotina computacional.

Uma vez qualificada as varetas (consumíveis), pelo proposto na Figura 3.1, o próximo passo é efetuar o estudo do ensaio de produção, ou seja, verificar se a operação de brasagem e o brasador são adequados. Para tanto, duas abordagens são propostas: o processamento e análise da imagem do depósito brasado e o ensaio de impacto Izod modificado de amostras deste depósito.

É muito importante deixar claro que amostras estabelecidas para o recebimento de consumíveis não são as mesmas para os demais ensaios que se seguem, pois se assim o fossem, apenas o depósito brasado realizado pela primeira vareta poderia ser analisado. As amostras de depósito a serem analisadas neste trabalho foram realizadas pela Petrobrás

nas suas instalações em Macaé, dentro dos padrões de qualidade desta empresa, que estão sendo utilizados como balizadores deste trabalho. Desta forma, pode-se dar continuidade dos ensaios analisando-se o mesmo número de amostras de WC-Co com granulometria fina e grossa.

4.2. Ensaios de Produção

Esta etapa, dividida em dois tipos de ensaios, processamento e análise de Imagens do corpo de prova brasado e ensaio de Impacto de Izod modificado, consiste em analisar, após o recebimento de consumíveis, e qualificar a operação de brasagem e brasador com os consumíveis que foram aceitos.

4.2.1. Processamento e Análise de Imagens do corpo de prova brasado

Este ensaio visa caracterizar a superfície da zona brasada evidenciando as regiões que não são satisfatórias ("vazios"). Estas são demarcadas pela rotina computacional desenvolvida no Laprosolda (SCOTTI, FERRARESI, VILARINHO, 2008) que a partir do tamanho da região estabelecida apresenta se a superfície possui ou não estes espaços ("vazios").

Tais regiões a serem analisadas são delimitadas pelo comando da *Matriz Scan* que neste trabalho foram avaliadas 25, 50, 75 e 100, e que representam o comprimento em pixel da imagem. Também foi avaliada a influencia da resolução da imagem. Estes valores foram avaliados para as mesmas regiões em cada peça estudada. Este comando determina o tamanho da área a ser evidenciada caso exista.

Foram analisadas duas escalas de resolução. A imagem original com 3264 por 2448 pixels. A partir destas imagens foram redimensionadas para 800 por 600 pixels. E para cada amostra estudada em cada resolução foram utilizados os quatro valores de *Matriz Scan* citados acima. Como foram analisadas seis amostras (três de granulometria fina e outras três de granulometria grossa), obteve-se um total de 48 análises de imagem em relação às placas com depósito brasado.

A Figura 4.13 mostra uma sequencia de análises de imagem da primeira amostra com depósito de carbonetos finos com resolução de 3264 por 2448. A Figura 4.14 mostra a mesma análise realizada sendo utilizadas as imagens com 800 por 600 pixels. É possível observar que utilizando uma menor resolução das imagens obteve-se um melhor desempenho da rotina computacional, já que as imagens resultantes apresentaram as áreas

que apresentam os “vazios” da superfície. Na análise feita com maior resolução não foi possível evidenciar os mesmos.

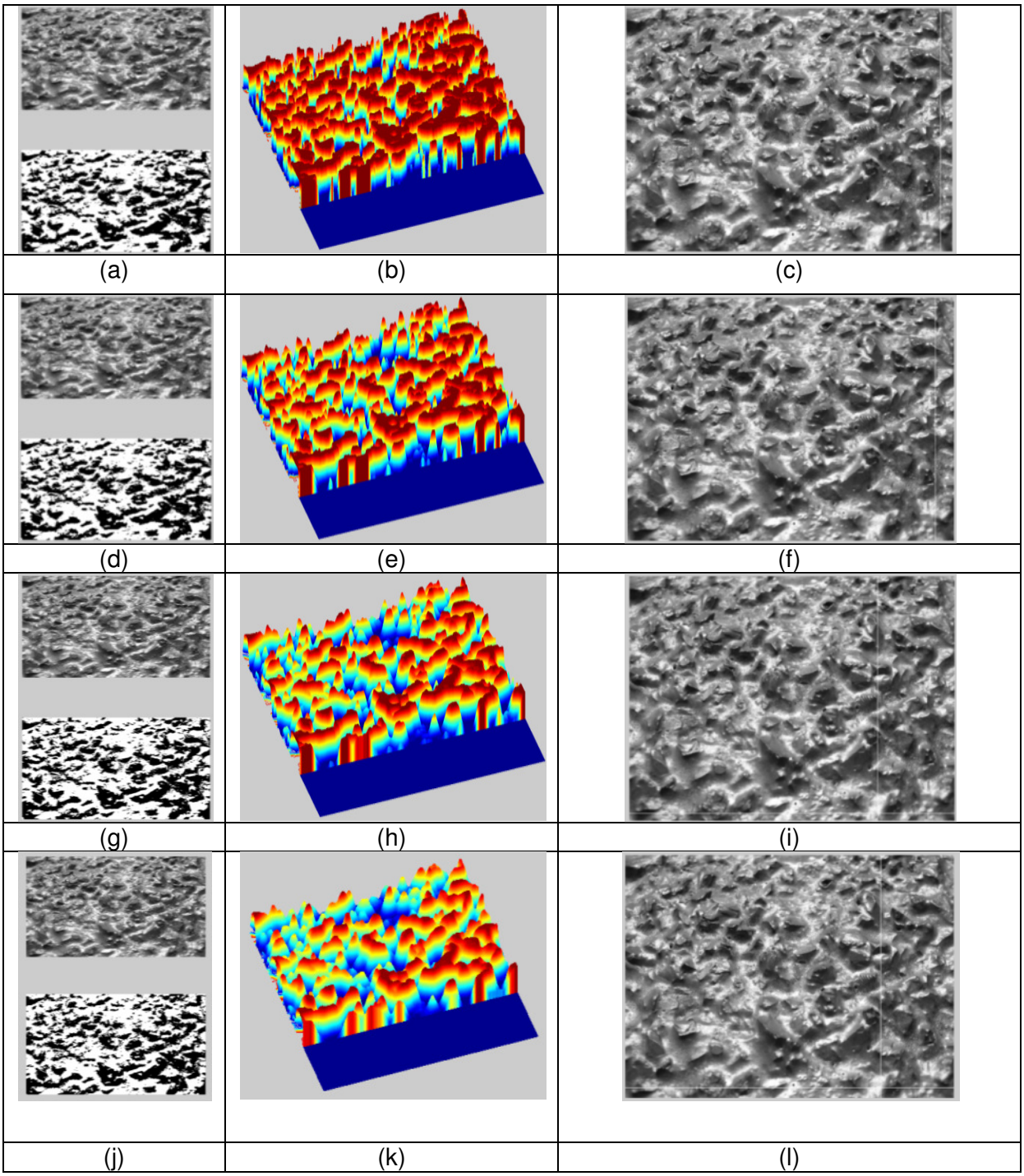


Figura 4. 13 – Resultados do processamento de imagem para a primeira amostra de granulometria fina com resolução de 3264 x 2448 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan*

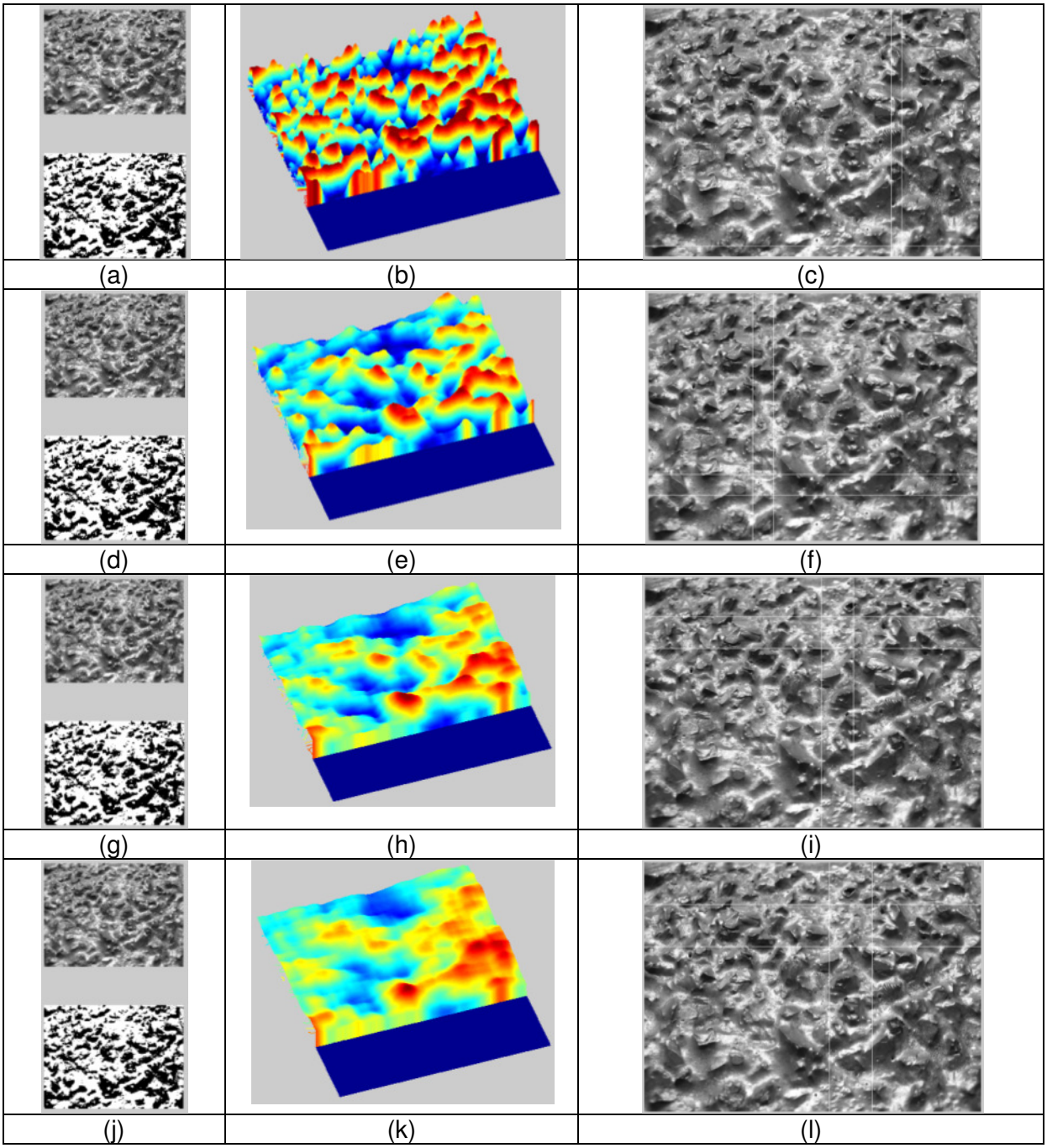
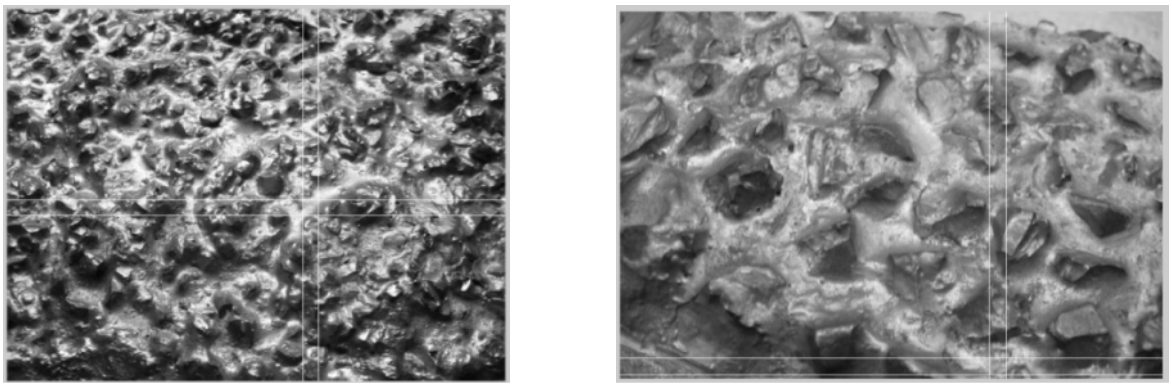


Figura 4. 14 - Resultados do processamento de imagem para a primeira amostra de granulometria fina com resolução de 800 x 600 sendo (a), (d), (g) e (j) a área selecionada com o resultado binário; (b), (e), (h) e (k) porcentagem do WC-Co; (c), (f), (i) e (l) o resultado da análise, representadas, respectivamente pelos valores 25, 50 75 e 100 de *Matriz Scan*

Os resultados utilizando o valor de 25 para a *Matriz Scan*, dentre as análises realizadas, se mostraram menos eficientes, uma vez que os espaços vazios apresentados possuíam um dimensionamento inadequado. Nestes casos, os resultados dos dimensionamentos das áreas se mostraram pequenas não retornando um valor significativo de análise ou mesmo de possível rejeição da peça (Figura 4.15).



(a) (b)

Figura 4. 15 – Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 25 sendo (a) e (b) para a segunda amostra de granulometria fina e primeira amostra de granulometria grossa respectivamente das imagens com resolução de 800 por 600 pixels

No caso das amostras com a granulometria fina o melhor resultado encontrado para a *Matriz Scan* foi de 50 a 75. Estes valores enquadraram nas imagens utilizadas espaços vazios com um bom dimensionamento sem inserir carbonetos na área destacada.

Nas amostras com granulometria grossa utilizando o valor 75 para a *Matriz Scan,* este evidenciou resultados satisfatórios em todas as amostras para esta granulometria, não enquadrando indevidamente carbonetos e apresentando uma boa área destacada (Figura 4.16).

O valor 100 da *Matriz Scan*, por outro lado, se mostrou em insatisfatório para as amostras com granulometria fina por apresentar na área destacada a presença de carbonetos como pode ser visto na Figura 4.17.

No caso da granulometria grossa, a *Matriz Scan* com valor de 50 se mostrou pequena não destacando uma área viável de análise na região delimitada pela rotina computacional como pode ser vista na Figura 4.18.

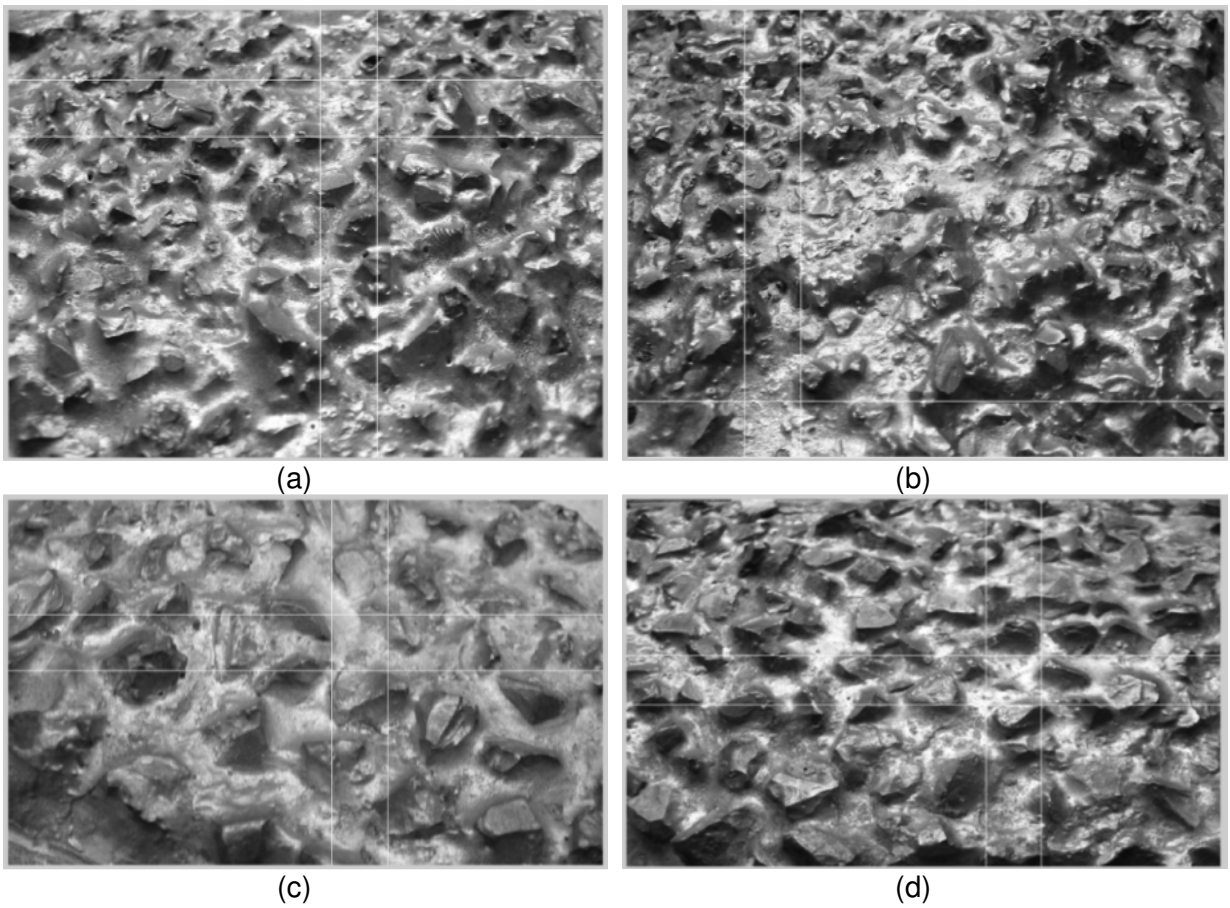


Figura 4. 16 - Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 75 sendo (a), (b), (c) e (d) para a segunda amostra de granulometria fina, terceira de granulometria fina, a primeira de granulometria grossa, segunda de granulometria grossa respectivamente das imagens com resolução de 800x 600 pixels

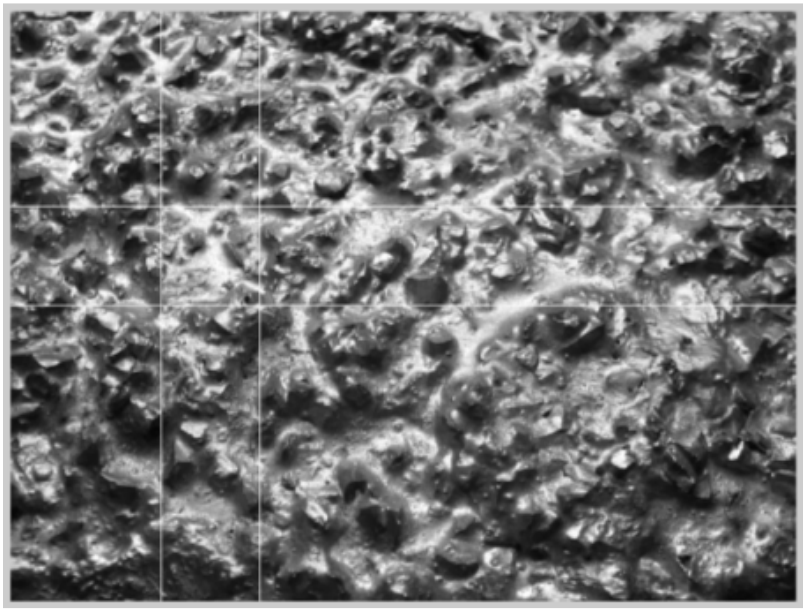


Figura 4. 17 - Resultado do processamento de imagem com o valor de *Matriz Scan* de 100 para a segunda amostra de granulometria fina da imagem com resolução de 800x600 pixels